

Tese de Doutorado

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE EM
HORIZONTES DE TALUDES DE CORTE
RODOVIÁRIO POR MEIO DE
PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E DE
CAMPO**

NUGEO

AUTOR: BRUNO DE OLIVEIRA COSTA COUTO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - MAIO DE 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C871e Couto, Bruno de Oliveira Costa .
Estudo da erodibilidade em horizontes de taludes de corte rodoviário
por meio de procedimentos de laboratório e de campo. [manuscrito] /
Bruno de Oliveira Costa Couto. - 2020.
254 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Romero Cesar Gomes.
Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de
Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Geotecnia.
Área de Concentração: Geotecnia.

1. Solos - Erosão - Quadrilátero Ferrífero (MG). 2. Taludes (Mecânica
do solo) - Estabilidade . 3. Laboratórios experimentais - Quadrilátero
Ferrífero (MG). 4. Taludes (Mecânica do solo). I. Gomes, Romero Cesar. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

ESTUDO DA ERODIBILIDADE EM HORIZONTES DE TALUDES RODOVIÁRIOS POR MEIO DE PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 26 de maio de 2020, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero Cesar Gomes (UFOP) - Orientador
Participação por Videoconferência

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar (UFOP) - Membro Titular
Participação por Videoconferência

Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira (UFOP) - Membro Titular
Participação por Videoconferência

Prof. Dr. Márcio Marangon (UFJF) - Membro Titular
Participação por Videoconferência

Prof. Dr. José Camapum de Carvalho (UnB) - Membro Titular
Participação por Videoconferência

***“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)***

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

A meus pais, Meire e Gilmar, por serem meus exemplos de vida, dedicação e por sempre me apoiarem nesta jornada.

Ao Professor Romero César Gomes por todos os ensinamentos, dedicação e esforço no decorrer desta pesquisa.

Ao professor e Amigo Lucas Deleon Ferreira pelos ensinamentos e contribuições durante o trabalho.

Ao amigo Roberto Filgueiras pelos conhecimentos, ideias e discussões que se fizeram de grande importância para a formulação e desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Eduardo Severiano e ao laboratório de física do solo do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde pelo auxílio e dedicação na realização dos ensaios de estabilidade de agregados

Ao Amigo Henrique Amorim pelo suporte na descrição pedológica dos perfis de solos amostrados.

Aos amigos Fabricio Miranda e Renata Delicio pelo apoio na descrição geológica dos horizontes amostrados.

Ao professor Augusto Bezerra e ao Laboratório de Materiais de Construção do CEFET/MG pelo suporte nas análises por fluorescência de raios x e microscopia eletrônica de varredura. A República FG, moradores, ex-alunos e amigos pelos pelo incentivo, suporte e pelos bons momentos vividos em Ouro Preto.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde pelo apoio e suporte oferecidos na conclusão desta etapa.

Ao NUGEO por todo suporte e infraestrutura necessária a execuções dos ensaios de laboratório e visitas de campo.

A CAPES e UFOP pelo suporte financeiro e estrutural que sem os quais não seria possível a conclusão deste estudo.

Obrigado a Todos.

RESUMO

A erodibilidade é comumente definida como a facilidade com a qual as partículas do solo são carregadas pela ação de um agente erosivo. Apesar de muitos estudos com enfoque agrônômico e geotécnico, ainda existem lacunas no que se refere a taludes de corte rodoviários, principalmente pelas condições diferentes existentes entre o uso e a estrutura do solo. Este trabalho apresenta o estudo da erodibilidade de solos em taludes de corte localizados na região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, conformados por dois horizontes de comportamento antagônico frente a erosão. Ao se estudar materiais sob as mesmas condições ambientais, pode-se minimizar a interferência de outros parâmetros, condicionando majoritariamente o efeito da erosão às propriedades intrínsecas dos solos. Com a definição dos pontos, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, e, posteriormente, realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e da metodologia MCT em laboratório. Para avaliação da resistência do solo “*in situ*” foram utilizados mini *vane test* e penetrômetro portátil. Como metodologia de estimativa direta, é proposto um erosímetro para avaliar as perdas de solo, baseado no teste de resistência à erosão do “*Council for Scientific and Industrial Research*” (CSIR) da África do Sul. As frações de argila se mostram superiores nos horizontes resistentes, ao passo que a fração silte tende a ser maior nos solos suscetíveis à erosão. O ensaio de estabilidade de agregados por via úmida se mostra bastante eficiente na distinção de solos potencialmente erodíveis. Os parâmetros químicos: pH (Δ pH), CTC, matéria orgânica e os teores de óxidos majoritários aliados aos coeficientes de intemperismo demonstram que solos em maior grau de intemperismo são menos suscetíveis aos processos erosivos. Os ensaios da metodologia MCT, principalmente o método expedido das pastilhas e o critério de erodibilidade ilustram o comportamento diferenciado entre os horizontes estudados, demonstrando que as propriedades lateríticas conferem resistência à erosão. A resistência “*in situ*” e as perdas de massa obtidas pelo erosímetro se mostram promissoras na investigação da erodibilidade, permitindo distinguir o comportamento de solos resistentes e erodíveis. A contextualização pós ensaio se mostrou interessante, uma vez que permitiu verificar a sensibilidade dos métodos utilizados em relação ao comportamento dos solos em campo, sendo possível formular um procedimento para investigação da erodibilidade em taludes de corte, com destaque para as perdas de solo determinadas por meio do erosímetro proposto.

PALAVRAS CHAVE: Erosão; Erodibilidade; Resistência; Ensaios de Campo e Laboratório; Taludes de Corte.

ABSTRACT

Erodibility is commonly defined as the proneness which soil particles have for being carried by erosive agent action. Although many studies with agronomic and geotechnical focus have already been developed, there are still gaps regarding cut road slopes, mainly due to the different conditions existing among soil structure. This work presents the erodibility study of soils in cut slopes located in the Cuadrilátero Ferrífero region, formed by two horizons with antagonist behavior against erosion. By studying materials under the same environmental conditions, the interference of other parameters can be minimized, conditioning the effect of erosion mainly to the intrinsic soil properties. The disturbed and undisturbed samples were collected and tests of physical, chemical, mineralogical characterization and MCT methodology in laboratory were performed. Soil resistance was evaluated “*in situ*” condition, by mini vane test and portable penetrometer. As a direct estimation methodology, an erosimeter is proposed to assess soil losses based on South African “*Council for Scientific and Industrial Research*” (CSIR) erosion resistance test. Clay fractions are higher in resistant horizons (HS), while silt fraction tends to be higher in susceptible soils (HI). The wet aggregate stability test is very efficient in distinguishing potentially erodible soils. The chemical parameters pH (Δ pH), CEC, organic matter and major oxides combined with weathering coefficients show that soils with a higher degree of weathering are less susceptible to erosion processes. The MCT methodology, mainly the tablets test and erodibility criterion, illustrate the different behavior between resistant and susceptible horizons, demonstrating that the lateritic properties confer resistance to erosion. The “*in situ*” strength and soil mass losses obtained by the erosimeter are promising in the erodibility investigation, allowing to distinguish the behavior of resistant and erodible soils. The post-test contextualization proved to be interesting, since it allowed to verify the sensitivity of the methods used in relation to soil behavior in the field, making it possible to formulate a procedure for erodibility investigation in cut slopes, with emphasis on soil losses determined by the proposed erosimeter.

KEY WORDS: Erosion; Erodibility; Resistance; Field and Laboratory Tests; Cut Slopes.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Desenho esquemático demonstrando a influência do tamanho das partículas dos solos na erosão por salpicamento. Onde D: diâmetro das gotas de chuva; d_{50} : diâmetro das partículas do solo (Adaptado de Choo <i>et al.</i> , 2018)	9
Figura 2.2 – Voçorocas (<i>gully erosion</i>) e <i>piping</i> como processos geomorfológicos complexos, resultantes da ação conjunta da erosão hídrica e de movimentos de massa (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018)	12
Figura 2.3 – Vista geral de uma voçoroca localizada em Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto – MG (Marques, 2011)	14
Figura 2.4 – Ordem de estabilidade dos minerais, adaptado de Goldich (1938)	19
Figura 2.5 – Medição direta da erodibilidade e perdas de solo em campo: A) sob condições de chuva natural (Fonte: Cândido, 2014) e B) com uso de simuladores de chuva (Fonte: Barbosa, 2010)	27
Figura 2.6 – Parcela experimental desenvolvida em laboratório para avaliação do efeito da intensidade da precipitação no desenvolvimento da erosão em sulcos (Fonte: adaptado de Shen <i>et al.</i> , 2015)	29
Figura 2.7 – Nomograma desenvolvido por Wischmeier et al. (1971) para determinação do fator de erodibilidade K (Fonte: Adaptado de Morgan, 2005)	33
Figura 2.8 – Gráfico de Classificação MCT (Fonte : Adaptado de Nogami e Villibor, 1981)	35
Figura 2.9 – Critério de Erodibilidade MCT (Fonte: Nogami e Villibor, 1995)	39
Figura 2.10 – Equipamentos de Inderbitzen existentes na literatura: A) Lemos (2002); B) Bastos (1999); C) Aguiar (2009)	40
Figura 2.11 – Esquema do ensaio do furo de agulha (Fonte: Modificado da ABNT, 1988 <i>apud</i> Matheus, 2006)	43
Figura 2.12 – Equipamento desenvolvido pelo CSIR para execução do teste de resistência a erosão: A) detalhes do equipamento B) Ensaio em execução. (Fonte: Jones e Ventura, 2003 <i>apud</i> Range e Horak 2005)	44
Figura 2.13 – Resultado do teste de resistência a erosão para saprolitos. (Fonte: Modificado de Range e Horak 2005)	46
Figura 2.14 – Fluxo de água no solo e geração de pressão na fase ar (Fonte: Campaum de Carvalho <i>et al.</i> , 2006).....	47

Figura 2.15 – Exemplo de curva de retenção de água, onde θ_s = umidade volumétrica de saturação e θ_R = umidade volumétrica residual (Fonte: Menezes, 2010).....	48
Figura 2.16 – Influência da textura do solo na curva de retenção de água (Fonte: Modificado de Fredlund <i>et al.</i> , 2012).....	49
Figura 3.1 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, segundo Dorr (1969). (Fonte: modificado por Alkmin e Marshak, 1998 <i>apud</i> Messias <i>et al.</i> 2012).....	52
Figura 3.2 – Coluna estratigráfica do quadrilátero ferrífero (Fonte: Farina <i>et al.</i> , 2016 <i>apud</i> Pedrosa-Soares <i>et al.</i> 2018).....	53
Figura 3.3 – Localização dos taludes amostrados no Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Adaptado de Costa, 2007).....	57
Figura 3.4 – Talude localizado próximo ao município de Itabira-MG (ITA).....	58
Figura 3.5 – Esquema do perfil pedológico do talude Itabira (ITA).....	59
Figura 3.6 – Talude localizado próximo a comunidade de Vargem Alegre – MG.....	60
Figura 3.7 – Esquema do perfil pedológico do talude Vargem Alegre (VAR).....	61
Figura 3.8 – Talude localizado próximo ao município de Ouro Branco (OBR).....	62
Figura 3.9 – Esquema do perfil pedológico do talude Ouro Branco (OBR).....	62
Figura 3.10 – Talude localizado em Mariana - MG (MRN).....	63
Figura 3.11 – Esquema do perfil pedológico do talude mariana (MRN).....	64
Figura 3.12 – Talude próximo à mina de Alegria (ALG).....	65
Figura 3.13 – Esquema do perfil pedológico do talude Alegria (ALG).....	66
Figura 3.14 – Talude localizado no município de Ouro Preto (PTO).....	67
Figura 3.15 – Esquema do perfil pedológico do talude Ouro Preto (PTO).....	67
Figura 3.16 – Talude localizado no distrito de Antônio Pereira (ATP).....	68
Figura 3.17 – Perfil Pedológico do talude Antônio Pereira (ATP).....	69
Figura 3.18 – Talude localizado no distrito de Lavras Novas (LVN).....	70
Figura 3.19 – Esquema do perfil pedológico do talude Lavras Novas (LVN).....	70
Figura 3.20 – Talude localizado na Avenida Maria Firmino, Ouro Branco-MG (AMF)....	71
Figura 3.21 – Esquema perfil pedológico do talude da Avenida Maria Firmino (AMF)....	72
Figura 3.22 -Talude localizado na Avenida Congonhas, Ouro Branco-MG (CNG).....	73
Figura 3.23 – Esquema do perfil pedológico do talude da Avenida Congonhas (CNG).....	74
Figura 4.1 – Inspeções de campo.....	75
Figura 4.2 – Coleta de amostras indeformadas.....	76

Figura 4.3 – Análise granulométrica realizada com e sem o uso de defloculante químico.....	77
Figura 4.4 – Preparação dos agregados com umedecimento prévio e execução do ensaio com peneiramento via úmida.....	78
Figura 4.5 – Preparação das amostras para determinação da curva de retenção.....	80
Figura 4.6 – Ensaio da metodologia MCT: A) ensaio de compactação mini-MCV; B) ensaio de perda de massa por imersão.....	83
Figura 4.7 – Procedimento do método das pastilhas: A) Moldagem das pastilhas nos anéis; B) confecção das esferas; C) Contração diametral após período em estufa; D) Pastilha (sem o anel) colocada em pedra porosa para reabsorção de água. (obs.: A amostra MG 443 corresponde a amostra PTO).....	84
Figura 4.8 – Procedimentos do método das pastilhas: A) Determinação do inchamento diametral, com detalhe das trincas existentes; B) Penetração utilizando cone de abertura 60° e 10 gramas.....	85
Figura 4.9 – Critério de erodibilidade MCT A) Ensaio de infiltrabilidade; B) Ensaio de perda de massa por imersão modificado.....	87
Figura 4.10 – Ensaio de mini Vane. A) Detalhes do equipamento utilizado; B) aplicação da metodologia no campo.....	89
Figura 4.11 – Penetrômetro de bolso utilizado. A) Detalhes do equipamento; B) aplicação da metodologia no campo.....	89
Figura 5.1 – Curva de retenção de água para o talude Itabira (ITA), com diferenciação entre os horizontes superior (ITAHS) e inferior (ITAHl).....	98
Figura 5.2 – Frequência de poros para o talude Itabira (ITA), com diferenciação entre os horizontes superior (ITAHS) e inferior (ITAHl).....	99
Figura 5.3 – Curva de retenção de água para o talude Mariana (MRN), com diferenciação entre os horizontes superior (MRNHS) e inferior (MRNHI).....	101
Figura 5.4 – Frequência de poros para o talude Mariana (MRN), com diferenciação entre os horizontes superior (MRNHS) e inferior (MRNHI).....	102
Figura 5.5 – Curva de retenção de água para o talude Lavras Novas (LVN), com diferenciação entre os horizontes superior (LVNHS) e inferior (LVNHI).....	103
Figura 5.6 – Frequência de poros para o talude Lavras Novas (LVN), com diferenciação entre os horizontes superior (LVNHS) e inferior (LVNHI).....	104
Figura 5.7 – Correlação entre os valores de K_i e K_r	114

Figura 5.8 – Ensaio de MEV para amostra ITAHS (500 x).....	115
Figura 5.9 – Ensaio de MEV para amostra ITAHI (500 x).....	116
Figura 5.10 – Classificação MCT para os solos estudados.....	118
Figura 5.11 – Avaliação da contração e do inchamento diametral na erodibilidade.....	123
Figura 5.12 – Diferenças entre os produtos da interação das esferas após imersão em água. A) Amostra OBRHS. B) Amostra OBRHI.....	124
Figura 5.13 – Critério de erodibilidade MCT (condição de umidade natural).....	127
Figura 5.14 – Critério de erodibilidade MCT (condição seca ao ar).....	127
Figura 5.15 – Influência de teor de umidade na “ <i>in situ</i> ” (S_I).....	130
Figura 5.16 – Influência da umidade na resistência “ <i>in situ</i> ” (S_I) – Talude ITA.....	131
Figura 5.17 – Boxplot para a resistência “ <i>in situ</i> ” (S_I), considerando a diferenciação entre cada uma das amostras estudadas.....	133
Figura 5.18 – Boxplot para a resistência “ <i>in situ</i> ” (S_I), considerando agrupamento das amostras apenas em horizontes superiores (HS) e inferiores (HI).....	135
Figura 6.1 – Desenho esquemático do equipamento desenvolvido.....	142
Figura 6.2 – Equipamento desenvolvido para avaliação da erodibilidade.....	143
Figura 6.3 – Desenho esquemático do amostrador utilizado no ensaio.....	143
Figura 6.4 – Amostrador utilizado: A) Detalhe das partes componentes; B) Detalhe do crivo utilizado para fixação na parte inferior da rampa.....	144
Figura 6.5 – Parte inferior da rampa: A) Detalhe das hastes para fixação do corpo de prova; B) Posicionamento de uma das partes do cilindro no fundo da rampa.....	144
Figura 6.6 – A) Detalhe da parte superior da rampa. B) posicionamento do corpo de prova, onde metade do seu diâmetro fica acima do nível da rampa.....	145
Figura 6.7 – Sistema de aspersão. A) detalhe do sistema de aplicação e dos orifícios. B) Detalhe do sistema de posicionamento.....	146
Figura 6.8 – Ajuste de inclinação. A) parafuso de rosca sem fim. B) escala para aferição do ângulo de inclinação.....	146
Figura 6.9 – Extravasador para direcionamento do fluxo de água e sedimentos para a peneira de coleta.....	147
Figura 6.10 – Dispositivo para nivelamento.....	147
Figura 6.11 – Teste para carga de 0,45 metros em amostra seca ao ar e saturada.....	150
Figura 6.12 – Perda de solo acumulada em função do tempo.....	151
Figura 6.13 – Avaliação da inclinação da rampa nas perdas de solo.....	152

Figura 6.14 – Perda de solo acumulada em função do tempo – talude Itabira (ITA).....	154
Figura 6.15 – Resultado das amostras no final do ensaio. A) ITAHS – horizonte resistente a erosão; B) ITAHI – horizonte erodível.....	154
Figura 6.16 – Perdas de solo determinadas pelo erosímetro na condição seca por 72 horas. Detalhe para os teores de umidade atuantes.....	157
Figura 6.17 – Perdas de solo determinadas pelo erosímetro na condição saturada. Detalhe para os horizontes e os teores de umidade atuantes.....	157
Figura 6.18 – Correlação das perdas de solo obtidas pelo erosímetro na condição seca (K_{Dry}) e as metodologias indiretas para estimativa da erodibilidade. A) Bouyoucos (1935). B) Wischmeier <i>et al.</i> (1971). C) Método RUSLE (Ye <i>et al.</i> , 2018). D) Lima <i>et al.</i> (1990).....	166
Figura 6.19 – Correlação das perdas de solo obtidas pelo erosímetro na condição saturada (K_{Sat}) e as metodologias indiretas para estimativa da erodibilidade. A) Bouyoucos (1935). B) Wischmeier <i>et al.</i> (1971). C) Método RUSLE (Ye <i>et al.</i> , 2018). D) Lima <i>et al.</i> (1990).....	167
Figura 7.1 – Procedimento proposto para investigação da erodibilidade de solos em taludes de corte.....	191

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Índice de Intemperismo e ordem de estabilidade de minerais para fração argila, adaptado de Jackson (1968).....	20
Tabela 2.2 – Principais pesquisas realizadas no Brasil e no mundo para a determinação indireta da erodibilidade dos solos.....	31
Tabela 2.3 – Guia para classificação de solos tropicais (Godoy e Bernucci, 2000).....	37
Tabela 2.4 – Resumo da evolução das metodologias e do equipamento de Inderbitzen desenvolvidos no Brasil.....	41
Tabela 2.5 – Especificações do teste de resistência a erosão (CSIR).....	45
Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica e relações de dispersão dos solos estudados.....	92
Tabela 5.2 – Índice físicos dos horizontes estudados.....	94
Tabela 5.3 – Características de plasticidade para os horizontes estudados.....	96
Tabela 5.4 – Avaliação da estabilidade de agregados para os horizontes estudados....	106
Tabela 5.5 – Propriedades químicas da TFSA dos horizontes estudados.....	109
Tabela 5.6 – Teor dos óxidos majoritários determinados por fluorescência de raios x.....	112
Tabela 5.7 – Parâmetros classificatórios da Metodologia MCT.....	117
Tabela 5.8 – Parâmetros obtidos pelo método expedito das pastilhas, segundo Godoy e Bernucci (2002).....	122
Tabela 5.9 – Critério de Erodibilidade MCT para os horizontes estudados.....	126
Tabela 5.10 – Avaliação da resistência a penetração para os horizontes estudados.....	129
Tabela 5.11 – Teste de Tukey para médias independentes, considerando todas as amostras.....	134
Tabela 5.12 – Teste de Tukey para médias independentes, considerando agrupamento em Horizontes Superiores (HS) e inferiores (HI).....	136
Tabela 5.13 – Correlação entre S_1 e as principais propriedades físicas e químicas dos solos.....	137
Tabela 6.1 - Estudo dos efeitos da carga aplicada e da condição de umidade inicial nas perdas de solo.....	149
Tabela 6.2 – Comparação dos resultados de perda de solo para o talude ITA.....	153
Tabela 6.3 – Perdas de solo e fator de erodibilidade K determinados pelo erosímetro.....	155

Tabela 6.4 – Correlação entre o fator erodibilidade determinado pelo erosímetro e as principais propriedades físicas dos solos.....	160
Tabela 6.5 – Correlação entre o fator erodibilidade determinado pelo erosímetro e as principais propriedades químicas dos solos.....	162
Tabela 7.1 – Contextualização Pós-ensaios – Itabira (ITA).....	172
Tabela 7.2 – Contextualização Pós-ensaios – Vargem Alegre (VAR).....	173
Tabela 7.3 – Contextualização Pós-ensaios – Ouro Branco (OBR).....	175
Tabela 7.4 – Contextualização Pós-ensaios – Mariana (MRN).....	176
Tabela 7.5 – Contextualização Pós-ensaios – Alegria (ALG).....	177
Tabela 7.6 – Contextualização Pós-ensaios – Ouro Peto (PTO).....	178
Tabela 7.7 – Contextualização Pós-ensaios – Antônio Pereira (ATP).....	180
Tabela 7.8 – Contextualização Pós-ensaios – Lavras Novas (LVN).....	181
Tabela 7.9 – Contextualização Pós-ensaios – Av. Maria Firmino (AMF).....	182
Tabela 7.10 – Contextualização Pós-ensaios – Av. Congonhas (CNG).....	184

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

- % Finos – soma dos percentuais de silte e argila
- A – Índice de atividade de argilas
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AE – Alta Erodibilidade
- Al³⁺ - íon alumínio
- ANOVA – Análise de variância
- A_s – Índice de atividade de argilas segundo Skempton
- BE – Baixa Erodibilidade
- Bi – horizonte B incipiente
- Bw – horizonte B latossólico
- Ca²⁺ - íon cálcio
- CO₃²⁻ - íon carbonato
- COT – Carbono orgânico total
- CSIR – *Council for Scientific and Industrial Research*
- CTC – Capacidade de troca catiônica
- CTC_e – Capacidade de troca catiônica efetiva
- CTC_t – Capacidade de troca catiônica total
- CV – Coeficiente de Variação
- D – diâmetro das gotas de chuva
- d₅₀ – diâmetro das partículas do solo
- DMG – diâmetro médio geométrico
- DMP – diâmetro médio ponderado
- e – índice de vazios
- e' – erodibilidade específica
- EC – Energia Cinética
- Fe²⁺ - íon ferro (II)
- Fe³⁺ - íon ferro (III)
- GC – Grau de compactação
- H⁺ - íon hidrogênio
- I – Intensidade da precipitação
- IEA – Índice de Estabilidade de Agregados

IEA-G – Índice de Estabilidade de Agregados determinado pelo DMG
IEA-P – Índice de Estabilidade de Agregados determinado pelo DMP
IP – Índice de plasticidade
IR ϵ – Índice de Resistência a Erosão
K – Fator erodibilidade da Equação Universal de Perda de Solos
K⁺ - íon potássio
K_{Dry} – fator erodibilidade determinado para o erosímetro na condição seca ao ar
K_{Sat} – fator erodibilidade determinado para o erosímetro na condição saturada
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de Plasticidade
M. O. – matéria orgânica
MCT – Miniatura Compactado Tropical
MCV – *Moisture Condition Value*
ME – Média Erodibilidade
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
Mg²⁺ - íon magnésio
n - porosidade
OH⁻ - íon hidróxido
P – Perda de solo total
P_{atm} – pressão atmosférica
pH – potencial hidrogeniônico
Pi – Perda de massa por imersão
Pi_M – Perda de massa por imersão modificada
QFe – Quadrilátero Ferrífero
R.E. – Resistência ao esmagamento das esferas (método das pastilhas)
RA – Razão de Argila
RC – Razão de Percolação
RD – Razão de Dispersão
RE – Relação de Erosão
Reabs. Reabsorção determinado pelo método das pastilhas
RUSLE – Equação Universal de Perda de Solos Revisada
s – Coeficiente de sorção
S – Grau de saturação
SCS – *Soil Conservation Service*

S_I – resistência *in situ*
 S_U – resistência não drenada
 T – índice de atividade segundo metodologia da Embrapa
TFSA – Terra fina seca ao ar
 T_P – taxa de perda de massa
 u_a – pressão na fase ar
USLE – Equação Universal de Perda de Solos
 u_w – pressão na fase água
 w – Teor de umidade
WEPP – *Water Erosion Prediction Project*
 w_f – teor de umidade do papel filtro
 ΔpH – diferença entre o pH determinado em KCl e o pH determinado em água
 Δv – coeficiente de variação
 $\Delta \tau_P$ - Diferença entre a resistência natural e de remoção com uso do penetrômetro
 ε - Razão de Erodibilidade
 θ – umidade volumétrica
 ψ_b – pressão de entrada de ar
 ψ_m – sucção mátrica
 γ – Peso específico aparente do solo
 γ_s - peso específico das partículas sólidas do solo
 τ_P – resistência média determinada pelo penetrômetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	3
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2 – A EROSÃO DOS SOLOS: CONCEITOS, PESQUISAS E APLICAÇÕES.....	7
2.1. INTRODUÇÃO.....	7
2.2. PROCESSOS DE EROSÃO DOS SOLOS.....	8
2.2.1. Salpicamento (“Efeito <i>Splash</i> ” ou “ <i>Splash Erosion</i> ”).....	8
2.2.2. Erosão Laminar (“ <i>Sheet Erosion</i> ”).....	10
2.2.3. Erosão em Sulcos (“ <i>Rill Erosion</i> ”).....	11
2.2.4. Erosão Interna (“ <i>Piping</i> ”).....	11
2.2.5. Voçorocas (“ <i>Gully Erosion</i> ”).....	13
2.3. A IMPORTÂNCIA DO INTEMPERISMO NOS PROCESSOS EROSIVOS.....	15
2.3.1. A influência do intemperismo na estabilidade mineral.....	18
2.4. FATORES CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS.....	20
2.4.1. Clima (“Erosividade”).....	21
2.4.2. Cobertura vegetal.....	22
2.4.3. Topografia (declividade e comprimento de rampa).....	22
2.4.4. Solo (“Erodibilidade”).....	23
2.5. MODELOS PARA ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO.....	23
2.6. A ERODIBILIDADE DOS SOLOS.....	25
2.6.1. O conceito de erodibilidade.....	25

2.6.2.	Estudos para estimativa da erodibilidade dos solos.....	27
2.6.3.	A metodologia MCT e os critérios de erodibilidade.....	33
2.6.4.	Equipamentos e ensaios para estimativa da erodibilidade.....	39
2.6.5.	Influência da Sucção e da distribuição de solos na erodibilidade.....	46
CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO.....		51
3.1.	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	51
3.2.	GEOMORFOLOGIA E PROCESSOS EROSIVOS.....	55
3.3.	TALUDES DE REFERÊNCIA.....	57
3.3.1.	Talude Itabira (ITA)	58
3.3.2.	Vargem Alegre (VAR)	60
3.3.3.	Talude Ouro Branco (OBR)	61
3.3.4.	Talude Mariana (MRN)	63
3.3.5.	Talude Alegria (ALG)	65
3.3.6.	Talude Ouro Preto (PTO)	66
3.3.7.	Talude Antônio Pereira (ATP)	68
3.3.8.	Talude Lavras Novas (LVN)	69
3.3.9.	Talude Avenida Maria Firmino (AMF)	71
3.3.10.	Talude Avenida Congonhas (CNG)	73
CAPÍTULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO E CAMPO.....		75
4.1.	ETAPA DE CAMPO.....	75
4.2.	AMOSTRAGEM.....	76
4.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	77
4.4.	MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	79

4.5.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	81
4.6.	ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT.....	82
4.6.1.	Classificação MCT convencional.....	82
4.6.2.	Método expedito das pastilhas.....	83
4.6.3.	Critério de erodibilidade MCT ($P_{iM/s}$)	86
4.7.	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA “IN SITU”.....	87
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		91
5.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	91
5.1.1.	Curvas de retenção de água.....	97
5.1.2.	Estabilidade de agregados	105
5.2.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	108
5.2.1.	Análise química da fração TFSA	108
5.2.2.	Fluorescência de raios x.....	111
5.2.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	115
5.3.	ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT	117
5.3.1.	Metodologia MCT convencional	117
5.3.2.	Método expedito das pastilhas.....	121
5.3.3.	Critério de erodibilidade MCT ($P_{iM/s}$)	125
5.4.	ENSAIOS PAR AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA “ <i>IN SITU</i> ”	128
CAPÍTULO 6 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE.....		141
6.1.	INTRODUÇÃO.....	141

6.2. O EQUIPAMENTO PROPOSTO.....	142
6.3. ENSAIOS PARA PADRONIZAÇÃO DO MÉTODO.....	148
6.4. AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE.....	155
6.5. INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO SOLO NAS PERDAS DETERMINADAS PELO EROSÍMETRO.....	159
6.6. VALIDAÇÃO DO EROSÍMETRO A PARTIR DE METODOLOGIAS INDIRETAS DE ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE.....	163
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DA ERODIBILIDADE.....	171
7.1. CONTEXTUALIZAÇÃO PÓS-ENSAIO.....	171
7.2. PROCEDIMENTO PARA INVESTIGAÇÃO DA ERODIBILIDADE EM TALUDES DE CORTE.....	184
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	192
8.1. CONCLUSÕES.....	192
8.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	197
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	198
APÊNDICE.....	215
APÊNDICE A - QUADRO RESUMO COM AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE CADA HORIZONTE AMOSTRADO.....	216
APÊNDICE B - IMAGENS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) PARA OS HORIZONTES ESTUDADOS.....	219
APÊNDICE C – GRÁFICOS DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA RESISTÊNCIA “ <i>IN SITU</i> ” (S_i).....	224

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A erosão consiste em um dos maiores problemas de degradação do solo, acarretando em diversos prejuízos tanto em ambientes rurais quanto urbanos. O desprendimento e arraste de partículas ocasiona diversos impactos ambientais, dentre eles os movimentos de massa, assoreamento de cursos d'água, diminuição da disponibilidade de recursos hídricos e perda de solos férteis.

Segundo Morgan (2005), o estudo da erosão é de grande relevância em terras agricultáveis, onde a movimentação e perda de material, a ruptura dos agregados, diminuição de matéria orgânica e nutrientes do solo resultam na redução da profundidade e diminuição de sua fertilidade. Segundo o mesmo autor, a ação erosiva também diminui a umidade disponível no solo, que restringe o que pode ser cultivado, resultando em maiores gastos com fertilizantes para manter os rendimentos.

Em 2015, o relatório do “*Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO)*” apresentou problemas relacionados a perdas de solos, com referência as taxas elevadas de erosão, principalmente em terrenos agrícolas. Segundo o documento, estima-se que as atuais taxas em “terras aráveis” ou de pastagem intensiva sejam de 100 a 1.000 vezes superiores as taxas encontradas em regiões naturais, valores muito maiores que as taxas conhecidas de formação do solo, o que leva a uma prática considerada como não sustentável (FAO, 2015).

No caso brasileiro, tem se dado maior enfoque à erosão hídrica, por ser o processo responsável pelas maiores taxas de perdas de solo. O fenômeno tem início no momento em que a chuva atinge o solo, onde o impacto das gotas é responsável pelo destacamento de partículas que podem ser futuramente carregadas pelo escoamento superficial, ou mesmo pela ação do vento.

À medida em que ocorre o processo de saturação do solo, durante a precipitação, são formadas pequenas poças que, posteriormente, se rompem dando início ao escoamento superficial. Inicialmente, de forma difusa (também chamado de escoamento laminar), este processo tende a se concentrar, pelos desníveis naturais do terreno e/ ou avanço da precipitação, resultando em um processo mais agressivo, também chamado por “erosão linear ou em sulcos”.

Apesar de uma definição simples, a erosão hídrica é um processo complexo, que sofre interferência de diversas variáveis, com destaque para: a) as condições climáticas da região, também chamadas de fator erosividade; b) as características físicas, químicas e mineralógicas do solo, também conhecidas por fator erodibilidade; c) a declividade, forma e comprimento de rampa, denominado fator topográfico ou morfológico; e d) a cobertura vegetal. A associação destes fatores resulta em solos de diferentes comportamentos frente à ação dos agentes erosivos.

Dentre as propriedades citadas acima, destaca-se a erodibilidade, definida como a suscetibilidade ou maior facilidade com que as partículas do solo são destacadas e carregadas pelo agente erosivo. Os estudos acerca da erodibilidade se concentram em metodologias de determinação direta e indireta. A primeira consiste na avaliação das perdas de solo reais em parcelas delimitadas em campo, sob condições de chuva natural ou simulada. A segunda se caracteriza pela previsão do comportamento dos solos a partir de propriedades físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas obtidas por meio de ensaios de campo e de laboratório.

A dificuldade na obtenção de dados consistentes e os altos custos envolvidos na determinação do potencial de perdas de solos por métodos diretos, resultam no desenvolvimento de diversas metodologias indiretas, geralmente fundamentadas em atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo, como os apresentados em: Wischmeier *et al* (1971) Denardin (1990), Pejon (1992), Roloff e Denardin (1994), Bastos (1999) e Couto (2015). No entanto, a maioria das metodologias existentes na literatura se baseia em solos oriundos de clima temperado, apresentando baixa aplicação em solos de clima tropical, principalmente nos latossolos brasileiros.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Apesar das diversas metodologias desenvolvidas para a estimativa indireta da erodibilidade dos solos, não existem critérios para uma prática universal, de maneira que os métodos disponíveis se encontram restritos a determinadas classes de solos ou condições climáticas específicas. No território brasileiro ainda existe uma carência de informações para a estimativa da erodibilidade de forma indireta, visto que os métodos internacionais consagrados na literatura apresentam baixa aplicação aos solos brasileiros devido, principalmente, aos fatores climáticos diferenciados.

Para Wang et al. (2013), devido à complexidade dos processos de erosão, à inerente natureza complicada da erodibilidade e aos conjuntos de dados inadequados ou incompletos de muitos estudos anteriores, existem grandes lacunas entre o que está disponível e o que é necessário nas atuais tecnologias de previsão de perdas e conservação do solo.

Na literatura, a erodibilidade dos solos é estudada por diferentes áreas, sendo mais desenvolvidos os métodos com enfoque agrônômico, visto as extensas áreas agricultáveis existentes ao redor do globo. Na área geotécnica, têm-se observado um aumento no número de trabalhos e propostas metodológicas, principalmente pelos impactos em áreas urbanas decorrentes da intervenção antrópica, tais como: movimentos de massa, ruptura de taludes, assoreamento de canais e reservatórios, etc.

Dentre as interferências antrópicas relacionados à erosão, destacam-se os taludes de corte localizados as margens das rodovias e estradas vicinais, onde, muitas vezes, inexistente cobertura vegetal adequada, acarretando em perdas de solo que levam ao acúmulo de sedimentos na via ou, até mesmo, a ruptura do talude. Considerando o estudo da erodibilidade em taludes de corte, torna-se difícil mensurar estas propriedades por métodos diretos, principalmente pelo fato destes taludes apresentarem geometria tortuosa e inclinação elevada que dificultam a instalação de parcelas em campo. Portanto, a abordagem de forma indireta, seja por ensaios de laboratório ou de campo, se mostra mais adequada para esta condição.

Vale ressaltar que a abordagem da erodibilidade sob o ponto de vista agrônômico e em taludes de corte também é distinta devido as condições da estrutura do solo. No primeiro caso, a estrutura e a composição química original do solo foram alteradas pelo preparo do terreno com uso de arado, onde a compactação e agregação posteriores resultam, principalmente, do tráfego de máquinas e equipamento utilizados na agricultura, ou seja, em se tratando de solos agrícolas, as condições originais são muito alteradas. Na segunda abordagem, a estrutura tem sua origem no processo de intemperismo e evolução pedológica, alterados apenas pelo corte durante a construção da rodovia ou estrada, apresentando menor alteração ao longo do tempo.

O presente estudo se insere na abordagem da erodibilidade do solo em taludes de corte rodoviários, por meio da associação de propriedades físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas, determinadas por procedimentos metodológicos executados em laboratório e no campo. Entretanto, visando minimizar a interferência de outras variáveis condicionantes dos processos erosivos, foi adotado um padrão de amostragem específico, onde foram escolhidos e amostrados taludes de corte com a presença de dois horizontes tipicamente distintos em relação a erosão na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

Este mesmo critério de escolha e amostragem dos taludes foi adotado por Couto (2015), afirmando que ao se estudar as variáveis geotécnicas que tenderiam a condicionar o comportamento distinto em ambos os horizontes, a partir de uma mesma referência espacial, tornando-se viável estabelecer correlações diretamente associadas às naturezas específicas das formações locais.

Outra forma de avaliação da erodibilidade se deve ao desenvolvimento de aparelhos que visam a simulação da resistência ou suscetibilidade do solo perante a ação de um agente erosivo, com destaque para o equipamento de Inderbitzen (1961) e suas adaptações. As limitações que tal método apresenta, principalmente pela falta de aplicação do método em condições de campo levaram o presente estudo à elaboração de novo aparelho e de metodologia para avaliação da erodibilidade. O equipamento em questão foi chamado de erosímetro e utilizado em laboratório para avaliação de todas as amostras em estudo, no intuito de formular um procedimento operacional simples com vistas a aplicação em campo.

Além do desenvolvimento de um novo ensaio, a presente pesquisa procurou avaliar a erodibilidade também por meio de ensaios de campo de forma direta, utilizando equipamentos para mensuração da resistência “*in situ*”. Este tipo de metodologia é pouco utilizado para avaliação da erodibilidade sob o ponto de vista geotécnico. Porém, suas respostas podem ser de grande valia, uma vez que permitem a avaliação da resistência do solo de forma simples, rápida e prática e, conseqüentemente, a tomada de decisões acerca da necessidade de intervenção para prevenção e /ou controle da erosão.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este estudo tem por objetivo principal a investigação da erodibilidade em taludes de corte, conformados por horizontes de comportamento antagônico em relação à erosão. A metodologia adotada contempla a observação das condições de campo e realização de procedimentos *in situ* e em laboratório para determinação dos melhores índices a serem utilizados na estimativa do potencial erosivo dos solos.

No contexto desta pesquisa, são definidos como objetivos específicos:

- Contextualizar os processos erosivos em relação à descrição do perfil e as características morfológicas de cada um dos horizontes, considerando os processos de intemperismo e a pedogênese;
- Determinar os principais atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos e suas relações com a suscetibilidade ou resistência à erosão hídrica;
- Desenvolver e validar um equipamento para estimativa de perdas de solo visando sua associação a erodibilidade;
- Contextualizar os resultados dos procedimentos de laboratório e de campo a realidade dos processos erosivos observados em campo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho em questão está estruturado em 8 capítulos divididos conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: apresenta as considerações preliminares, com introdução a problemática, além das justificativas, objetivos e escopo do estudo;

- Capítulo 2: apresenta o contexto bibliográfico sobre erosão dos solos e os fatores intervenientes, além da discussão acerca do conceito de erodibilidade dos solos. Também são apresentados os principais métodos diretos e indiretos para estimativa da erodibilidade, com enfoque nas metodologias de mensuração em ensaios de laboratório;
- Capítulo 3: descreve o contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero e apresenta a descrição geral dos taludes de corte amostrados, incluindo as feições geomorfológicas e a classificação pedológica.
- Capítulo 4: Descreve os procedimentos de amostragem e as metodologias utilizadas para a realização dos ensaios de laboratório e campo;
- Capítulo 5: Apresenta os resultados e suas análises, além das possíveis correlações existentes entre os diversos atributos do solo e a erodibilidade;
- Capítulo 6: Apresenta a necessidade de novos métodos para o estudo do potencial de erosão dos solos, com a proposição de um novo equipamento para estimativa das perdas de solo;
- Capítulo 7: Apresenta a contextualização após os procedimentos de laboratório e de campo, no intuito de verificar se as propriedades determinadas se associam à realidade dos processos erosivos observados em campo;
- Capítulo 8: Descreve as principais conclusões do estudo, além de sugerir novos tópicos para pesquisas futuras;

CAPÍTULO 2

A EROSÃO DOS SOLOS: CONCEITOS, PESQUISAS E APLICAÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

A palavra erosão se origina do Latim, derivada dos verbos “*rodere*” e “*erodere*”, cujos significados são roer e correr, respectivamente. O termo foi utilizado pela primeira vez para designar cavidades moldadas pela ação da água, ou seja, o desgaste do solo perante a ação da enxurrada (Zachar, 1982). Apesar deste conceito simples, o termo erosão é constantemente empregado em diferentes contextos, gerando certa ambiguidade, sendo mais comum sua associação à corrosão, abrasão e desgaste do solo por algum agente específico, sendo mais comuns a água e o vento.

Muitos autores utilizam o termo erosão como um sinônimo de desgaste do solo, causado principalmente por fatores físicos que levam a destruição mecânica, desconsiderando as reações químicas que levam a deterioração do material. Portanto define-se a erosão como um conjunto de processos naturais (físicos e químicos) que contemplam a degradação e destacamento das partículas do solo ou da rocha de origem, remoção, transporte e deposição deste material, por meio de um agente erosivo.

A erosão é um processo natural, também chamada de agente modelador do relevo, que provoca a modificação das paisagens terrestres, e como tal, é lento e medido pelo tempo geológico. As atividades antrópicas interferem neste processo natural, intensificando os processos erosivos, levando a maior deterioração do solo, produção e transporte de sedimentos (Bastos, 1999). Desta forma, distingue-se a erosão geológica ou natural, processada normalmente sem a intervenção humana, da erosão acelerada, resultado da ação antrópica.

O processo erosivo pode ser desencadeado por diferentes agentes, sendo os mais comuns: água, vento e gelo. Considerando o Brasil, tem-se dado grande importância a erosão hídrica, que tem a chuva como seu principal agente, sendo este processo o mais

estudado para fins de conservação dos solos, por ser o maior causador de degradação ambiental. Para entender melhor o fenômeno da erosão hídrica é necessário a divisão do mesmo em três parcelas: i) desprendimento do material de origem; ii) transporte; e iii) deposição das partículas carregadas em cotas inferiores.

Estes processos têm início no momento em que a água da chuva atinge o solo, também chamado de salpicamento (efeito “*splash*”). Quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração, ou mesmo quando o solo se encontra saturado, forma-se uma lâmina de fluxo superficial que escoar em direção às regiões mais baixas do terreno (erosão laminar). Em alguns pontos, devido às irregularidades na superfície, ocorre a concentração do fluxo de forma linear, levando a formação de sulcos (Couto, 2015). Desta forma, durante um mesmo evento de precipitação, pode-se ter diferentes processos ocorrendo de forma simultânea (salpicamento, erosão laminar, linear em sulcos, entressulcos, etc.) que inclusive podem receber contribuição da água subterrânea, ocasionando o fenômeno conhecido por erosão interna (“*piping*”).

2.2. PROCESSOS DE EROÇÃO DOS SOLOS

2.2.1. Salpicamento (“Efeito *Splash*” ou “*Splash Erosion*”)

O efeito “*splash*”, também conhecido pelo termo salpicamento, é o responsável pelo início da erosão hídrica, onde ocorre o desprendimento das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva em sua superfície, seguido de seu posterior transporte (Angulo-Martinez *et al.*, 2012). Ação erosiva da chuva está diretamente relacionada a sua energia cinética, a qual depende do tamanho das gotas, logo, precipitações de maior intensidade produzem gotas de chuva de diâmetros maiores e, conseqüentemente, a ação erosiva é maior.

De forma simultânea ao destacamento das partículas, a ação das gotas de chuva também é responsável pelo processo de selagem dos solos, processo de formação de uma camada compactada que antecede o escoamento superficial. A formação desta crosta está relacionada a ruptura dos agregados do solo e seu posterior transporte para os poros existentes, formando uma camada superficial de baixa permeabilidade. A formação

destas pequenas áreas “seladas” leva ao surgimento de poças de maneira irregular no terreno. Devido a continuidade da precipitação e saturação do solo, ocorre o aumento e posterior rompimento das poças, iniciando o escoamento superficial.

Apesar de ser um evento localizado pela ação pontual das gotas de chuva, as consequências do efeito *splash* podem atingir profundidades consideráveis em um solo desprovido de cobertura vegetal. Segundo Ryzak *et al.* (2015), a ação das gotas de chuva pode deslocar as partículas do solo em até 1,5 m verticalmente e com a ajuda do vento estas partículas podem atingir distancias horizontais superiores a 5 metros.

Além de estar associada a intensidade de precipitação, este processo tem seus efeitos condicionados a cobertura do solo, que seria a proteção natural dos solos contra a erosão. Em terrenos descobertos, um fator importante é o tamanho das partículas. Em geral, para gotas de chuva de mesmo tamanho e dotadas de mesma energia cinética, observa-se maior penetração e destacamento de partículas em solos de granulometria fina (Figura 2.1).

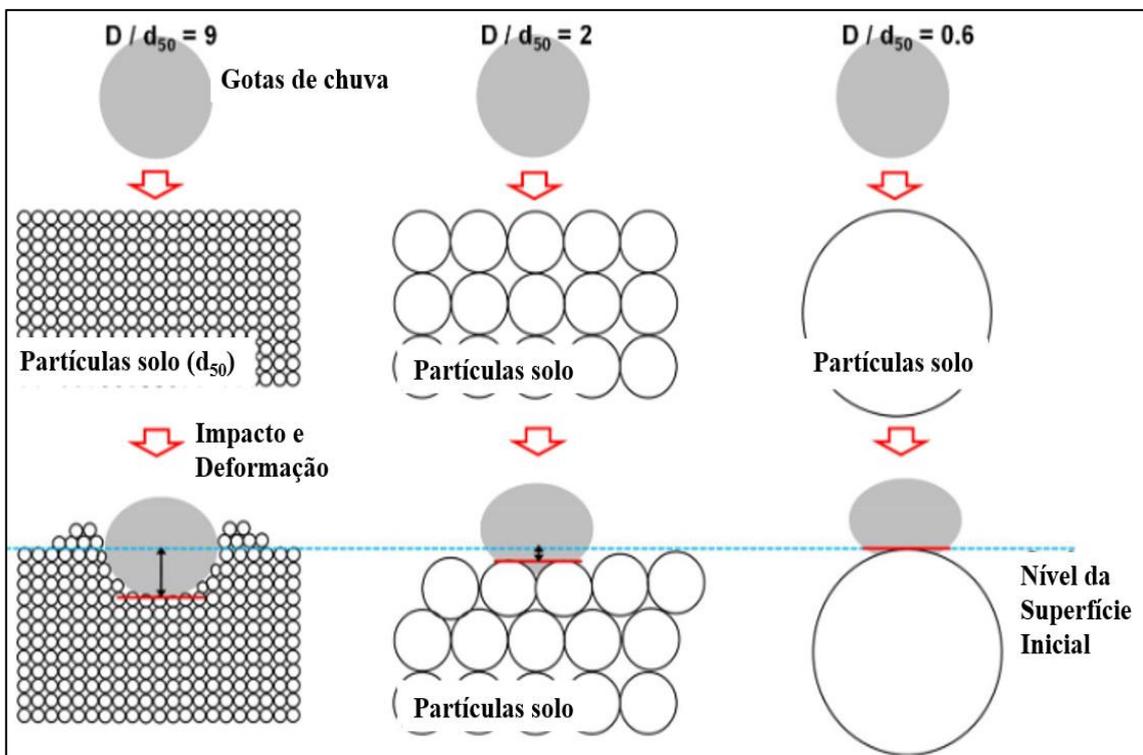


Figura 2.1 – Desenho esquemático demonstrando a influência do tamanho das partículas dos solos na erosão por salpicamento. Onde D : diâmetro das gotas de chuva; d_{50} : diâmetro das partículas do solo (Adaptado de Choo *et al.*, 2018)

2.2.2. Erosão Laminar (“*Sheet Erosion*”)

Quando a capacidade de infiltração do solo chega ao limite têm-se o início do escoamento superficial, que pode ocorrer de duas formas distintas: difusa (erosão laminar) ou concentrado (erosão linear). Segundo Fernandes (2015), os processos erosivos provocados pela ação das chuvas têm início na erosão laminar (“*sheet erosion*”), evoluindo para a formação de sulcos que por sua vez podem-se transformar em outras feições erosivas como ravinas e voçorocas.

A erosão laminar pode ser definida como a remoção de uma fina camada de solo de maneira homogênea e constante, onde não é possível notar a concentração do fluxo. Segundo Wu *et al.* (2019), a erosão laminar ocorre de maneira inter-relacionada com o efeito “*splash*”, onde, tanto o destacamento quanto o transporte de partículas, ocorrem, de forma simultânea, pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial.

Apesar do impacto visual causado pelas erosões em sulco e voçorocas, a erosão hídrica que mais causa perdas de solo no Brasil é a laminar. Por ser de difícil percepção, principalmente por pessoas não especializadas, ela é constante e não necessita de um fluxo de água concentrado para se formar, muitas vezes atingindo extensas áreas de maneira contínua (Lepsch, 2011).

Com o avanço da precipitação e devido as irregularidades no terreno, a erosão laminar pode evoluir para uma forma concentrada, porém esta transição não ocorre de forma clara, sendo que os dois processos acontecem de forma concomitante.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), quando sulcos ocupam quase toda a superfície do terreno, a erosão laminar se limita às partes lisas e regulares da superfície, ou seja, ocorre, entre os sulcos. Desta forma, o fluxo superficial concentrado pode ser denominado fluxo em sulcos, que pode evoluir para ravinas e voçorocas, e o fluxo que ocorre com distribuição uniforme é denominado fluxo entressulcos ou laminar (erosão entressulcos).

2.2.3. Erosão em Sulcos (“*Rill Erosion*”)

A erosão em sulcos pode ser considerada como fase subsequente a erosão laminar, que se inicia quando o fluxo de água se concentra em determinadas regiões no terreno. Com a concentração do escoamento, a tensão cisalhante no fundo e nas laterais dos pequenos canais formados é a principal responsável pela desagregação e carreamento das partículas. Portanto, o fenômeno ocorre quando as forças cisalhantes superam as forças coesivas, sendo esta condição denominada por tensão crítica de cisalhamento (Lafayette, 2006).

Na fase de surgimento dos sulcos, eles estão distribuídos de maneira uniforme ao longo do terreno, sem exibir grandes volumes de água. O aumento da concentração de água em determinados sulcos faz com que eles evoluam, então para ravinas e, em certos casos, para voçorocas. Não existe um critério específico para distinguir sulcos, ravinas e voçorocas, basicamente sua diferenciação ocorre devido a profundidade e largura dos canais abertos pela erosão hídrica. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2001), sulcos são pequenos canais, de até 10 cm, enquanto que o termo ravina deveria ser aplicado a canais com profundidade compreendida entre 10 e 50 cm. A partir de uma profundidade de 50 cm começam a ocorrer fenômenos de instabilidade que dão origem as voçorocas, que podem ou não estar associados a fenômenos de erosão interna (*piping*).

Alguns estudos demonstram que a intensificação do processo erosivo está diretamente associada ao início da erosão em sulcos, muitos deles relacionando sua ocorrência de forma simplificada à intensidade de precipitação e à declividade do terreno, principalmente. No entanto, a erosão em sulcos não pode ser condicionada apenas a estes dois fatores, uma vez que se trata de um processo influenciado também pela selagem dos poros superficiais, desenvolvimento dos sulcos, tensão cisalhante de fundo e pelo colapso das paredes do canal (Lafayette, 2006; Wirtz *et al.*, 2012)

2.2.4. Erosão Interna (“*Piping*”)

A Erosão interna ou “*piping*” corresponde ao processo no qual a percolação de água nos macroporos é superior a resistência das partículas e agregados, causando a remoção de

partículas e formando cavidades que avançam para o interior do solo (Wilson *et al.*, 2017). Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), este fenômeno ocorre nas seguintes situações: (i) quando a força de percolação supera a resistência do solo, também chamado de ruptura hidráulica; (ii) quando o gradiente hidráulico é maior que o crítico do solo, levando a formação de canais em seu interior; (iii) quando a fração grosseira não é filtro da fina, proporcionando deslocamento das partículas finas e, conseqüentemente, removendo a sustentação e propiciando a formação de cavidades no interior do maciço.

Segundo Bernatek-Jakiel e Poesen (2018), o “*piping*” não é apenas um processo de erosão hídrica (ou simples processo de destacamento de partículas por forças cisalhantes), é um processo similar ao que acontece em “voçorocas”, envolvendo a interação com movimentos de massa, tais como colapso de teto e paredes pela ação da gravidade (Figura 2.2).

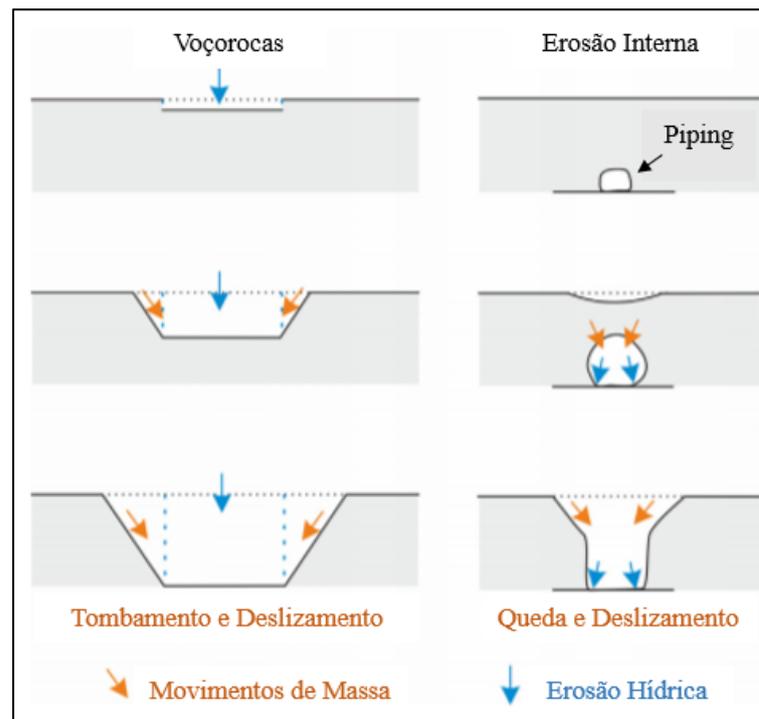


Figura 2.2 – Voçorocas (*gully erosion*) e *piping* como processos geomorfológicos complexos, resultantes da ação conjunta da erosão hídrica e de movimentos de massa (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018).

Segundo Fendrich *et al.* (1997, *apud* Lima, 2003), a erosão interna não se processa apenas nas proximidades do talude e pode se desenvolver ao longo de centenas de

metros de distância da voçoroca, enfraquecendo o solo e estabelecendo regiões de percolação preferencial, por vezes com afundamentos de uma porção do terreno, conhecido também por subsidência. Este processo tem associação direta com o material de origem e a ação do intemperismo químico, que atuam na dissolução e carreamento de minerais, diminuindo a instabilidade do terreno.

Associado aos processos de erosão interna, principalmente em taludes e encostas, têm-se o fenômeno da esquelização, que consiste na dissolução de componentes minerais, provocando um aumento de porosidade (Lima, 2003). O aumento da porosidade do solo termina por gerar a instabilidade dos taludes, podendo ser o fator responsável pelo início do processo erosivo.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), o aumento da porosidade no interior do maciço ocorre, principalmente, em condições não saturadas, levando ao surgimento de uma crosta superficial na face do talude, devido a deposição do material carreado. Esta crosta acaba retendo a umidade no interior do maciço, condição responsável pelo aumento da dissolução dos minerais, aumentando a degradação do solo em questão.

2.2.5. Voçorocas (“*Gully Erosion*”)

Voçorocas são feições encontradas em diversos tipos de ambientes sob diferentes processos condicionantes. O termo voçoroca tem origem da expressão indígena “*ayby-ceróg*” cujo significado é terra rasgada (Bacellar, 2000). Na literatura mundial este tipo de feição erosiva é conhecido pelo termo “*gully erosion*”, sendo muito comum estudos sobre os processos que iniciam este fenômeno bem como sua gênese evolutiva. Basicamente são feições que evoluem de forma acelerada no tempo e no espaço, podendo se apresentar largas e íngremes (Figura 2.3).

Segundo Castilho e Gómez (2016), existem diversos critérios na literatura para a identificação de voçorocas, sendo os mais comuns:

- Morfológicos e topográficos: incisões profundas no terreno, geralmente com paredes íngremes com baixa vegetação;
- Hidrológicos: cursos d’água que estão sujeitos a inundações repentinas durante grandes tempestades;

- Acessibilidade para práticas agrícolas: canais de escoamento cujo comprimento e largura não permite as práticas agrícolas convencionais;
- Instabilidade: incisões recentes em vales onde não haviam canais bem definidos.



Figura 2.3 – Vista geral de uma voçoroca localizada em Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto – MG (Marques, 2011)

A voçoroca tem origem a partir de causas naturais, porém a ação antrópica tem acelerado o seu aparecimento e a sua evolução, principalmente pelo desmatamento, ocupação urbana e manejo inadequado nas atividades agrícolas. Ainda existem grandes discussões acerca dos fatores condicionantes para o surgimento de voçorocas, dentre eles, o papel do fluxo subterrâneo.

No Brasil, Iwasa e Prandini (1982) apresentaram uma teoria sobre o surgimento de voçorocas baseada em processos de concentração do escoamento subsuperficial. O primeiro passo seria a formação de sulcos e ravinas, que devido as tensões cisalhantes de fundo aprofundam o canal no terreno em forma de “V”. Este processo é contínuo até o momento em que o canal atinge o lençol freático, onde podem se iniciar os processos de erosão subterrânea. A partir deste momento as paredes laterais perdem a sua sustentação, ocorrendo a ruptura e, conseqüentemente, podendo formar taludes íngremes e perfis em forma de “U”, que contribuem para o alargamento da feição (Figura 2.2). O processo é finalizado com a implantação de um curso d’água definitivo (com leito regularizado até o nível de base local) e o restabelecimento da vegetação.

Apesar de diversos modelos explicarem a evolução dos processos erosivos em voçorocas, é necessário atentar para as condições específicas nas quais cada um destes foi desenvolvido, uma vez que sofrem influência direta das características locais e regionais, que levam em consideração aspectos litológicos, pedológicos e climáticos.

2.3. A IMPORTÂNCIA DO INTEMPERISMO NOS PROCESSOS EROSIVOS

Na seção anterior foram descritos os principais processos de desagregação, transporte e deposição de partículas relacionados à erosão hídrica, que podem evoluir desde pequenos sulcos a feições mais agressiva, como as voçorocas. No entanto, devem ser considerados os processos intempéricos que antecedem a erosão, uma vez que atuam na estabilidade interna dos agregados do solo e na interação entre os mesmos, de maneira a diminuir ou a aumentar a resistência aos agentes erosivos.

O intemperismo pode ser definido como um conjunto de processos físicos e bioquímicos de degradação das rochas, modificando suas características físicas, químicas e mineralógicas, transformando-as em fragmentos pequenos e solubilizando alguns de seus constituintes (Lepsch, 2011). Os efeitos do intemperismo são visualizados na forma de rochas e minerais alterados e dissolvidos e na formação (geralmente imperceptível a curto prazo) de novos minerais e de novos solos (Melo e Alleoni, 2016a). Pelo fato de a escala geológica do intemperismo ser muito lenta, sua importância tende a ser ignorada ou mesmo subestimada, porém é inegável sua importância nos processos de degradação das rochas, formação de solos e, conseqüentemente, pelos processos erosivos.

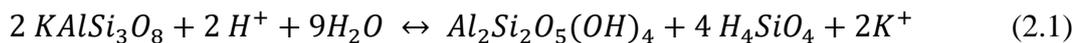
Os processos intempéricos podem agir de duas formas distintas, na primeira atuam apenas na fragmentação mecânica da rocha, em frações de menores dimensões, sendo mantida as características do material original: chamado de intemperismo físico. A segunda forma está relacionada a alteração química dos materiais, principalmente pela ação da água, que pode atuar na dissolução ou na formação de novos minerais: é chamado de intemperismo químico.

Os principais processos do intemperismo físico envolvem as oscilações de temperatura, tanto durante o dia quanto à noite, devido as dilatações produzidas pelo calor e as

contrações com o frio. O resultado é o aumento da superfície de exposição da rocha por meio de trincas e fraturas, que podem ser preenchidas com água ou por raízes de plantas, avançando para o intemperismo químico (Lepsch, 2011).

O intemperismo químico consiste na alteração da composição química dos minerais constituintes das rochas. Este tipo de intemperismo é predominante em regiões de clima tropical, onde as condições de elevadas temperaturas e umidade propiciam o desenvolvimento de espessas camadas de solos residuais (Irfan e Woods, 1988 *apud* Martins, 2005). Após um grande período de exposição, sob condições de chuva e calor, os minerais primários menos resistentes são intemperizados, enquanto que alguns mais resistentes persistem no meio e outros podem ser formados durante o processo, como os do grupo dos óxidos de ferro e alumínio.

Estas alterações dependem de uma série de fatores, dentre eles as características das rochas ou de seus minerais componentes e das condições do meio (água, temperatura, pressão, pH, concentração, etc.). O processo de intemperização química a partir de um determinado mineral poderá produzir minerais secundários diferentes, de acordo com as condições do ambiente. Como exemplo, pode-se citar o intemperismo químico do feldspato microclínio ($KAlSi_3O_8$) em caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), conforme equação 2.1.

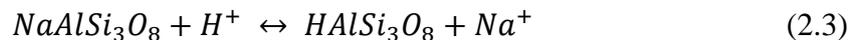


Em condições nas quais o solo permite a lixiviação dos produtos (H_4SiO_4 , K^+) a reação ocorre preferencialmente no sentido da formação da caulinita. No entanto, em condições onde não é permitido a drenagem, ou seja, a lixiviação, a permanência do íon K^+ poderá levar a formação da illita ($KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$) como mineral secundário ao invés da caulinita (Melo e Alleoni, 2016a), conforme equação 2.2.



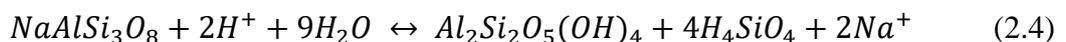
Conforme exemplificado acima, o intemperismo químico sofre grande influência da água, portanto existe uma predominância de processos de desagregação na fase aquosa, sendo os principais descritos a seguir:

- **Hidratação e Desidratação:** A hidratação é a entrada de moléculas de água na estrutura do mineral, enquanto o processo inverso é chamado de desidratação. Um exemplo deste tipo de reação é a anidrita (CaSO_4), que quando totalmente circundada por moléculas de água se transforma em gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- **Dissolução:** Alguns íons de minerais estão sujeitos a desestabilização quando em contato com a água, formando uma solução rica em sais. É o caso da calcita (CaCO_3) que sofre dissolução na presença de água (Ca^{2+} e CO_3^{2-}).
- **Hidrólise:** Ocorre quando os íons H^+ e OH^- entram nas estruturas minerais deslocando cátions, que são liberados na solução. A partir deste ponto a estrutura do material é rompida, liberando também silício (Si) e alumínio (Al) que vão para a fase líquida. O resultado é a substituição dos íons alcalinos por H^+ , que levam a desintegração da estrutura. Um exemplo clássico é a hidrólise da albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) segundo a equação 2.3:

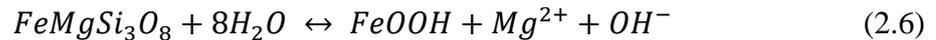


Segundo Melo e Alleoni (2016a) os átomos de Silício (Si) e os cátions básicos em solução podem ser eliminados do sistema ou então participar na formação de novos minerais (filossilicatos). A natureza destes novos minerais irá depender da intensidade da hidrólise e da lixiviação, ou seja, podem-se formar minerais diferentes, via solução, a partir de um mesmo mineral primário.

Portanto, em condições climáticas (fluxo de água) diferentes os minerais secundários formados serão diferentes. Em condições moderadas de fluxo de água, por exemplo, a albita se intemperiza formando argilominerais do tipo 1:1 como a caulinita (Equação 2.4). Por outro lado em condições de fluxo de água intenso, ocorre a dessilicatação completa da albita, permanecendo apenas o alumínio no sistema sob a forma de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), conforme equação 2.5.



- **Oxidação:** alguns elementos podem estar presentes nos minerais em mais de um estado de oxidação, como por exemplo o ferro, que se encontra nos minerais ferromagnesianos primários como a biotita, anfibólios, piroxênios ($\text{FeMgSi}_3\text{O}_8$) e olivinas sob a forma de Fe^{2+} (Teixeira *et al.*, 2000). Liberado em solução, oxida-se a Fe^{3+} , e precipita como um novo mineral, a goethita (FeOOH), conforme equação 2.6.



- **Complexação:** refere-se a compostos orgânicos capazes de se ligar com íons metálicos, o que pode aumentar a solubilidade de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) e de metais pesados tóxicos (Hg, Cd, Pb, etc.). Os produtos da dissolução na forma de complexos têm grande importância na pedogênese (processo de podzolização), uma vez que promovem ou inibem o desenvolvimento de novos minerais e afetam a diferenciação de horizontes no solo (Melo e Alleoni, 2016a).

2.3.1. A influência do intemperismo na estabilidade mineral

A suscetibilidade ou a resistência da rocha e dos solos às condições ambientais, associados ao grau de intemperismo, interfere diretamente na ocorrência dos processos erosivos, produzindo sedimentos que podem ser destacados, transportados e depositados pela erosão hídrica.

Segundo Bastos (1999), solos em avançado grau de intemperismo possuem maiores teores de argila que, aliados a óxidos de ferro e alumínio, produzem agregados mais estáveis, sendo mais resistentes a erosão. Rocha *et al.* (2002) comparou a resistência ao cisalhamento de diferentes tipos de solos aos seus respectivos graus de intemperismo, concluindo que solos mais jovens (pouco evoluídos) apresentaram os menores valores e, conseqüentemente, são mais suscetíveis à erosão.

As rochas não se comportam da mesma maneira frente aos processos de intemperismo, originando diferentes produtos sob diferentes velocidades de degradação, conseqüência de uma série de fatores, dentre eles: a composição mineralógica da rocha, textura, dureza, clivagem e área superficial específica.

A resistência de cada mineral define a intensidade com que tais processos necessitarão agir para degradá-los (Heidemann, 2015). Uma das abordagens clássicas para esta temática foi feita por Goldich (1938), que desenvolveu séries de estabilidade para as frações silte e areia, baseada na série de cristalização dos minerais em rochas ígneas estabelecidas por Bowen (1928). O intuito é demonstrar a suscetibilidade de minerais silicatados primários ao intemperismo (Figura 2.4).

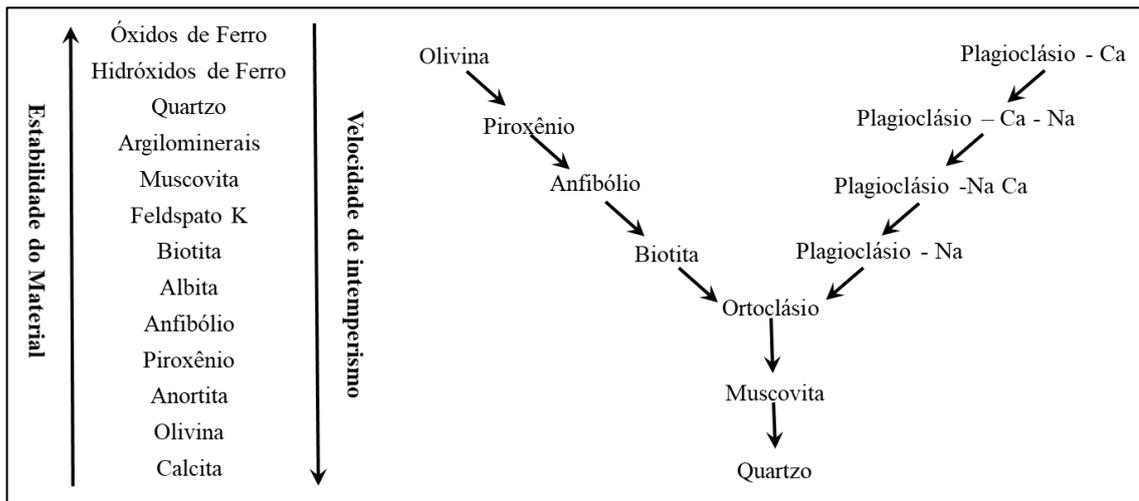


Figura 2.4 – Ordem de estabilidade dos minerais, adaptado de Goldich (1938).

Segundo a Figura 2.4, os minerais que se encontram no topo, como a olivina e a anortita (Plagioclásio – Ca), apresentam menor resistência e são facilmente intemperizáveis, sendo os primeiros a desaparecer. Por outro lado, minerais na base do diagrama, como o quartzo, são mais resistentes ao intemperismo.

A estabilidade dos minerais também sofre grande influência do ambiente no qual está inserido, portanto, em ambientes tropicais, tanto rochas quanto solos estão mais sujeitos ao intemperismo químico, consequência direta das altas precipitações e temperaturas. Segundo Melo e Alleoni (2016a), à medida que os solos evoluem, sua composição mineral passa a depender mais do ambiente do que do seu material de origem e por essa razão as associações de argilominerais são consideradas indicadores do grau de desenvolvimento dos solos. Utilizando as concentrações de argilominerais no solo, Jackson (1968) determinou um índice de intemperismo para a fração argila dos solos, constituído por 13 estágios em ordem crescente de estabilidade, podendo também determinar o seu grau de desenvolvimento (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Índice de Intemperismo e ordem de estabilidade de minerais para fração argila, adaptado de Jackson (1968).

	Índice de intemperismo	Mineral
Estágio recente (solos jovens)	1	Gipso, halita, sais solúveis
	2	Calcita, dolomita e apatita
	3	Olivina, anfibólios, piroxênios
	4	Biotita, glauconita, clorita e nontronita
	5	Albita, plagioclásios, feldspato potássico
	6	Quartzo, cristobalita, tridimita
Estágio Médio	7	Muscovita, illita
	8	Vermiculita
	9	Esmectitas (montmorilonita, beidelita) Clorita, vermiculita e esmectita
Estágio Avançado	10	Caulinita, haloisita
	11	Óxidos de Alumínio (Gibbsita)
	12	Óxidos de Ferro (goethita e hematita)
	13	Óxidos de titânio (anatásio, rutilo), zirconita e coríndon

Quando em menores tamanhos, os minerais primários têm estabilidade muito menor. Mesmo o quartzo e a muscovita, extremamente resistentes ao intemperismo, nas frações silte e areia (Figura 2.4) tornam-se mais facilmente intemperizáveis do que todos os minerais secundários da fração argila (Fontes, 2012). Por este motivo é difícil encontrar estes minerais na fração argila para a maioria dos solos (Tabela 2.1).

Desta forma, solos jovens apresentam elevada suscetibilidade ao intemperismo, onde a intensidade das condições climáticas locais pode degrada-los mais rapidamente, principalmente quando existe elevada disponibilidade de água. Por outro lado, os óxidos de alumínio, ferro e titânio indicam solos em avançado grau de intemperismo, uma vez que já são produtos da intemperização, situação verificada nos latossolos brasileiros.

2.4. FATORES CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS

A erosão tem sua origem no rompimento do equilíbrio natural no solo, em decorrência da ação de fatores climáticos associados às variáveis da região, onde a combinação destes diversos fatores determina a intensidade do processo erosivo (Pruski, 2009).

Alguns autores, como Bastos (1999), Morgan (2005), Bertoni e Lombardi Neto (2010), Fernandes (2015), descrevem como principais fatores condicionantes do processo erosivo: a) climáticos (chuva e vento); b) cobertura vegetal; c) topografia (declividade e comprimento a encosta e d) o solo e sua litologia

2.4.1. Clima (“Erosividade”)

O clima por meio de seus diversos agentes (água, vento, gelo, etc.) é o principal responsável pelo destacamento, transporte e deposição das partículas do solo. Dentre os estes agentes a ação da água, representado pela chuva, é o que apresenta maior potencial erosivo, devido a sua ação pelo impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial subsequente.

Os totais anuais precipitados têm pouca relevância nos processos de erosão hídrica, sendo muito importante a consideração da distribuição do tamanho, a velocidade de queda, o número, momento a energia cinética das gotas, bem como as intensidades, duração e frequência da chuva. O conjunto dessas características é comumente conhecido por erosividade da chuva, que representada a sua capacidade em provocar erosão (Pruski, 2009).

Como cada região apresenta suas próprias características climáticas, torna-se necessário o estudo do fator erosividade de forma específica, ocasionando no surgimento de diversas metodologias para sua estimativa. Dentre as metodologias mais usadas, destaca-se a equação proposta por Wischmeier e Smith (1958), que consideram a erosividade da chuva como um produto entre a energia cinética e a intensidade da precipitação, utilizando para tal a duração de 30 minutos consecutivos, conforme a equação 2. 7, modificada por Foster *et al.* (1981).

$$EC = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I \quad (2.7)$$

Onde EC é a energia cinética, em MJ.ha⁻¹.mm⁻¹, e I é a intensidade da precipitação em mm.h⁻¹, sendo consideradas apenas chuvas convectivas e frontais. Segundo Silva *et al.* (2010), a determinação dos valores de erosividade ao longo do ano, permite identificar os meses nos quais os riscos de perda de solo e água são mais elevados, razão pela qual

exerce papel relevante no planejamento de práticas conservacionistas fundamentadas na máxima cobertura do solo em épocas de precipitação intensa.

2.4.2. Cobertura vegetal

A vegetação atua como uma camada protetora entre a atmosfera e o solo. Os componentes acima do solo, como caules e folhas, absorvem parte da energia das gotas de chuva, água corrente e vento, diminuindo as forças que atuam diretamente sobre o solo. De maneira similar, os componentes abaixo do solo, compreendendo o sistema radicular, contribuem para o aumento da resistência mecânica à erosão (Morgan, 2005).

Existem diversos processos entre a vegetação e o solo que afetam diretamente a suscetibilidade aos processos erosivos, conforme descritos por Lal *et al.* (1994):

- Ligação física entre o solo e as raízes e caules da vegetação;
- Ligação eletroquímica e de nutrientes entre as raízes e os solos;
- Detenção do escoamento superficial pelo aumento da rugosidade (presença de folhas e raízes na superfície).
- Aumento de infiltração de água junto as raízes e também pela decomposição das mesmas, formando pequenos canais nos solos
- Aumento da incorporação de matéria orgânica, resultando melhor estrutura e retenção de água;
- Aumento da retenção de água no solo pelas raízes das plantas.

2.4.3. Topografia (declividade e comprimento de rampa)

A declividade, influencia diretamente nas perdas de solo, estando diretamente associada às taxas de infiltração e escoamento superficial do terreno, uma vez que locais íngremes favorece o escoamento superficial em detrimento da infiltração, proporcionando uma maior tensão cisalhante, que contribui para o avanço da erosão.

O comprimento de rampa não é menos importante que o declive, pois à medida que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas vão se avolumando proporcionalmente como, também, a sua velocidade de escoamento vai aumentando progressivamente (Bertoni e Lombardi Neto, 2005).

2.4.4. Solo (“Erodibilidade”)

O tipo de solo é importante nos estudos sobre erosão, uma vez que a resistência não é a mesma para todos os materiais. Isto acontece devido às diferentes propriedades exibidas por cada solo, sejam elas físicas (textura, estrutura, permeabilidade, etc.), químicas (pH, CTC, etc.) e biológicas que variam de acordo com as rochas de origem e seu processo de formação. Segundo Bacellar (2000), a litologia controla a erosão, ao condicionar diretamente o tipo de solo e o relevo.

Desta forma, é comum trabalhar a influência do solo na erosão sob o conceito específico de erodibilidade, cuja finalidade é estudar a suscetibilidade ou resistência frente aos processos erosivos. A erodibilidade em solos é o foco deste trabalho, sendo melhor abordada em tópico específico.

2.5. MODELOS PARA ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO

Para o controle da erosão, em áreas urbanas e rurais, é necessário o conhecimento dos fatores condicionantes dos processos erosivos e suas interações, o que muitas vezes pode-se dar de forma complexa. Dificilmente as interações entre estes fatores podem ser testadas de forma experimental, em campo ou em laboratório, transformando a simulação computacional em uma importante ferramenta, onde é possível investigar os impactos ambientais das atividades, assim como prever perdas de solos em determinados intervalos de tempo.

Neste contexto, Alkharabsheh (2013) afirma que os modelos para estimativa de perdas de solos podem fornecer uma melhor compreensão dos fenômenos naturais que regulam a erosão, tais como o transporte e deposição de sedimentos pelo escoamento superficial e permitir previsões razoáveis.

Diversos modelos foram desenvolvidos, principalmente, a partir de 1940, resultando em equações de perdas de solo que associavam vários condicionantes dos processos erosivos. Dentre estas, destaca-se o modelo da Equação Universal de Perda de Solos (USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), conforme Equação 2.8.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.8)$$

Onde: A = taxa de perda de solo por unidade de área e tempo, geralmente em t.ha⁻¹ anuais; R = fator erosividade da chuva; K = fator erodibilidade do solo; L = fator topográfico, também chamado de comprimento de rampa ou encosta; S = inclinação da rampa ou da encosta; C = fator relacionado a presença de cobertura vegetal, P = fator relacionado a práticas e cultivos de manejo.

Cada um dos fatores da equação é utilizado para representar sua influência nas perdas de solo, possuindo diversas formas de cálculo. Os fatores R, K, L e S são relacionados às condições locais, por outro lado os fatores C e P referem-se as práticas, uso e ocupação do solo, sistemas de manejo, etc. Uma das grandes vantagens da USLE é que a mesma permite a previsão de perdas por meio de erosão laminar e em sulcos, considerando um pequeno número de fatores quando comparados a outros modelos.

Como limitação, a USLE não leva em consideração, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e o transporte de partículas, ao invés disso são apenas discriminadas as significâncias dos diferentes fatores que regem os processos erosivos (Pruski, 2009). Além disso, apresenta baixa capacidade de prever a distribuição espacial e temporal da erosão hídrica, deposição e aporte de sedimentos.

Novas pesquisas foram desenvolvidas no sentido de melhorar as estimativas de perdas de solo, levando a Equação Universal de Perda de Solos Revisada – também chamada de RUSLE. Nesta metodologia, a estrutura da equação manteve a mesma do modelo USLE, porém com mudança significativa na determinação de cada componente, utilizando para isto programas computacionais. Entretanto, a RUSLE apresenta algumas limitações, como o fato de não considerar os processos deposicionais, limitando sua aplicação em regiões de microbacias onde o fenômeno é importante.

Para superar as limitações dos modelos USLE e RUSLE, o Serviço de Pesquisa Agrícola dos EUA, em convênio com demais instituições, desenvolveu o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP). O modelo representa uma nova geração tecnológica de

previsão de erosão, fundamentada na base física de processos como: teoria da infiltração, fitotecnia, hidrologia, propriedades físicas do solo (Flanagan *et al.*, 1995 *apud* Pudassaini *et al.*, 2004).

O WEPP consiste em um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão entressulcos e sulcos. Com sua utilização, é possível simular eventos que ocorrem em determinadas áreas de acordo com o estado atual do solo, cobertura vegetal, restos culturais e umidade. As características do solo e da cobertura vegetal são atualizadas diariamente e, quando ocorre precipitação, com base na característica do terreno, é possível determinar se haverá escoamento superficial (Pruski, 2009).

Com o método WEPP é possível estimar perdas de solo em uma encosta, malha ou bacia hidrográfica, podendo também determinar sua distribuição espacial e temporal, e então tomar medidas quanto a conservação dos solos. Entretanto, sua complexidade é vista como a principal desvantagem, visto o número de variáveis de entrada, além da limitação para a predição de processos erosivos mais avançados, como as voçorocas.

Para a estimativa das perdas de solo, seja utilizando os modelos USLE, RUSLE ou WEPP, é necessário a determinação do parâmetro erodibilidade, o qual pode ser feito de diversas formas, seja de forma direta, a partir de parcelas em campo, ou indireta em laboratório. Na seção a seguir é apresentado o conceito de erodibilidade, bem como as particularidades para a sua determinação.

2.6. A ERODIBILIDADE DOS SOLOS

2.6.1. O conceito de erodibilidade

A erodibilidade é definida, de forma simples, como a suscetibilidade do solo aos processos erosivos, ou em um conceito mais amplo, como a quantidade de material perdida em função de um determinado agente erosivo (Denardin, 1990; Bastos, 1999; Bacellar, 2000; Martins *et al.*, 2011, Fernandes, 2015; Lima *et al.*, 2016). Esta definição, apesar de ser uma das mais utilizadas, tende a resumir de forma grosseira os processos que governam a facilidade ou a dificuldade com que as partículas de solo são arrancadas e transportadas pelo agente erosivo, principalmente por não considerar as alterações das propriedades do solo em uma mesma precipitação.

Wang *et al.* (2013), estudando as experiências e perspectivas chinesas, verificou que conceito de erodibilidade não era aceito, de modo geral, entre o período de 1950-1990. Ao invés disso, os pesquisadores chineses utilizavam, comumente, dois termos para descrever o processo: anti-erodibilidade (“*anti-erodibility*”) e a anti-abrasividade (“*anti-scourability*”). O primeiro termo se refere a resistência do solo à dispersão, solubilização ou ao impacto das gotas de chuva. O segundo se refere a habilidade do solo em resistir ao destacamento pela ação abrasiva do escoamento superficial. Segundo o autor, estas duas propriedades eram avaliadas sob condições experimentais controladas em que vários processos erosivos ocorriam de forma simultânea, tornando-se difícil avaliar de forma isolada.

O comportamento dos solos frente ao processo erosivo é difícil de ser determinado, principalmente pelo número de propriedades intrínsecas, como textura, consistência, estrutura, matéria orgânica, pH, permeabilidade, agregação, óxidos de ferro e alumínio, etc. Segundo Bryan (2000), basicamente, estas propriedades interferem no fluxo de água, na distribuição das forças exercidas pelos agentes erosivos e na resistência ao arraste das partículas.

Além das diversas propriedades intrínsecas, pode-se dizer que a erodibilidade não é constante ao longo do espaço e tempo. De forma geral, esta variação está associada as mudanças das propriedades do solo, principalmente, aquelas relacionadas a umidade. Ao se considerar a variação da umidade para determinação das perdas, duas escalas temporais devem ser analisadas: a) a variação em um mesmo evento de precipitação e b) variação em escala sazonal. O primeiro considera os efeitos de saturação do solo e início do escoamento superficial durante uma precipitação isolada, assim em um intervalo de tempo relativamente curto ocorre uma mudança significativa da erodibilidade. O Segundo considera as oscilações entre as estações secas e chuvosas, onde, geralmente, ocorre maior perda de solo nas primeiras chuvas da estação úmida, provocadas pela elevação repentina da quantidade de água em solos secos.

É importante destacar que a maior parte das pesquisas acerca da erodibilidade é proveniente de estudos em solos agrícolas, onde as características do perfil do solo foram homogeneizadas, a macroporosidade foi destruída, e novas estruturas foram

restabelecidas pelo emprego do arado e de outras ferramentas agrícolas, ou seja, estes estudos se concentram em condições perturbadas (Bryan, 2000). Este fato deve ser considerado quando o objeto do estudo é diferente, como, por exemplo, o de erodibilidade em taludes, onde o arranjo das partículas se encontra melhor preservado e as declividades tendem a ser superiores quando comparados aos terrenos agrícolas. Em taludes, observa-se que em sua parte superior, a ação erosiva se deve basicamente ao impacto das gotas de chuva, enquanto que na base o escoamento superficial é o principal responsável pela remoção das partículas.

2.6.2. Estudos para estimativa da erodibilidade dos solos

As perdas de solo e o fator erodibilidade são avaliados por meio de procedimentos experimentais, que podem utilizar tanto estudos em laboratório, sob condições controladas, quanto determinações reais em campo a partir de condições naturais ou simuladas. Desta forma, pode-se estimar a erodibilidade dos solos a partir de duas metodologias: direta e indireta.

A determinação da erodibilidade de forma direta consiste na coleta, quantificação e análise do material erodido, sendo comum a instalação de parcelas em campo, para determinação das perdas de solo por meio de chuva natural (Figura 2.5 A).

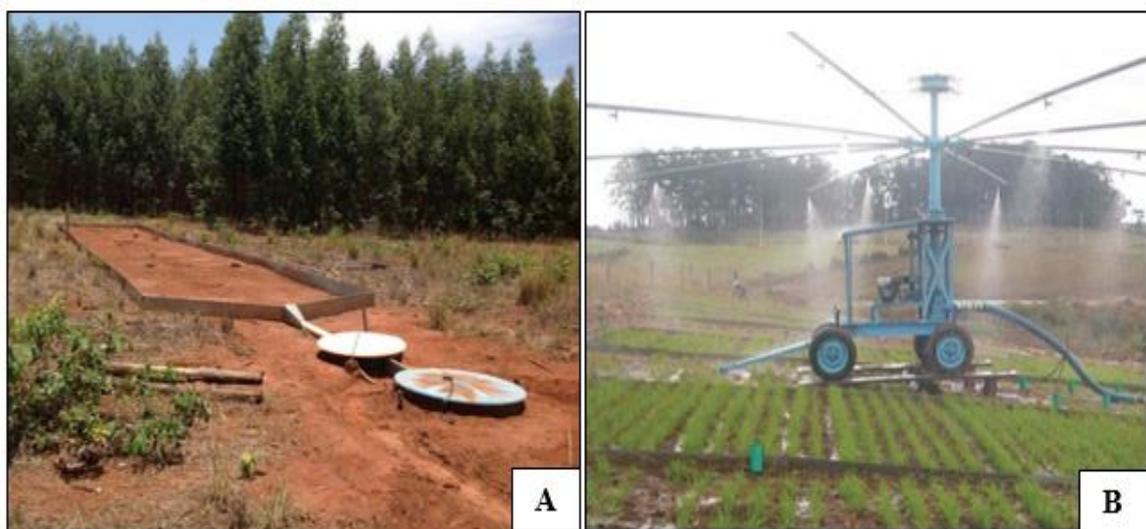


Figura 2.5 – Medição direta da erodibilidade e perdas de solo em campo: A) sob condições de chuva natural (Fonte: Cândido, 2014) e B) com uso de simuladores de chuva (Fonte: Barbosa, 2010)

Segundo Marques *et al.* (1997a), a erodibilidade (“fator K”) determinada em campo, por meio de chuvas naturais ou simuladas, é considerado o valor que verdadeiramente reflete a erodibilidade do solo tal como ela é compreendida na Equação Universal de Perda de Solos (USLE).

Apesar da determinação se dar em condições climáticas e topográficas no próprio campo, a metodologia direta apresenta como principais desvantagens o alto custo e a morosidade para levantamento dos dados. Laften (1982, *apud* Martins, 2011) sugere que o tempo para condução do experimento em campo seja de no mínimo 5 anos, de modo a evitar a variação da erodibilidade ocasionada pela oscilação dos níveis precipitação anual.

Uma maneira de diminuir a morosidade da determinação da erodibilidade sob chuvas naturais é utilizando simuladores (Figura 2.5 B), que permitem obter em curto intervalo de tempo um grande volume de dados (Bertoni e Lombardi Neto, 2005). Entretanto, simuladores apresentam-se complexos quanto ao seu desenvolvimento, pois devem reproduzir chuvas próximas às condições naturais. Segundo Agassi e Brandford (1999, *apud* Eltz *et. al.*, 2001) é impossível reproduzir, de maneira recíproca, chuvas naturais em termos de intensidade, duração, energia e impacto das gotas, possuindo também como limitação, as dificuldades de comparação dos resultados obtidos em virtude dos diversos tipos de simuladores existentes.

Uma outra forma de abordagem da erodibilidade vem crescendo expressivamente, onde a determinação direta é feita por meio da reconstrução de condições de campo em parcelas experimentais em laboratório, submetidas a ação de simuladores de chuva. Nestes estudos é possível variar as condições ambientais, como intensidade e duração da precipitação, cobertura vegetal, declividade e comprimento de rampa e assim determinar as perdas de solo, além de verificar o processo de evolução das feições erosivas sob condições específicas. Neste contexto, destacam-se os experimentos realizados por Shen *et al.* (2015), Vinci *et al.* (2015), Chen *et al.* (2016) Di Stefano *et al.* (2017), Zhang *et al.* (2017), Hao *et al.* (2019), que utilizam parcelas reconstituídas em laboratório, em conjunto com equipamentos de alta precisão, tais como laser e scanners, na quantificação e acompanhamento da evolução das feições erosivas.

Shen *et al.* (2015) desenvolveram um experimento visando demonstrar a influência da intensidade da precipitação no desenvolvimento da erosão em sulcos. Os autores utilizaram parcelas reconstruídas em laboratório (10 m de comprimento, 3 m de largura, 0,5 m de profundidade e 20° de inclinação), submetidas a 3 chuvas consecutivas de mesma intensidade (Figura 2.6). Antes de cada experimento, a parcela era submetida a precipitação inicial de baixa intensidade, no intuito de manter a umidade do solo consistente e consolidar as partículas soltas.



Figura 2.6 – Parcela experimental desenvolvida em laboratório para avaliação do efeito da intensidade da precipitação no desenvolvimento da erosão em sulcos (Fonte: adaptado de Shen *et al.*, 2015).

Os métodos de reconstrução de condições de campo em laboratório permitem o levantamento de grande volume de dados em curtos intervalos de tempo, bem como de melhor delineamento acerca das interferências de variáveis isoladas no processo erosivo. Como principal limitação, destacam-se os custos elevados e a complexidade no desenvolvimento de equipamentos e metodologias que sejam fieis a representação das condições observadas em campo.

Devido às limitações apresentadas pelos métodos de determinação direta da erodibilidade, seja ele por chuva natural ou simulada, vários autores têm proposto a quantificação deste parâmetro de maneira indireta. A metodologia indireta resulta, muitas vezes, em formulação de índices de erodibilidade, cuja função seria estimar de maneira rápida e simples a suscetibilidade de solos a erosão.

Segundo Bryan (1968), para se configurar como um índice de erodibilidade a metodologia deve apresentar as seguintes características: simples medição, seguro e ser aplicável de forma universal. Porém, o grande problema reside no fato dos índices de erodibilidade se restringirem as condições de sua formulação. Por exemplo, índices desenvolvidos para solos oriundos de clima temperado apresentam baixa correlação com solos de clima tropical, uma vez que os processos intempéricos e pedogenéticos são diferentes.

Durante muito tempo, os pesquisadores vêm tentando relacionar a quantidade de solo perdida em campo com várias características físicas do que podem ser determinadas no laboratório; e, realmente, muito trabalhos foram desenvolvidos levando em consideração uma única propriedade do solo ou uma combinação de várias propriedades físicas onde fosse possível uma determinação quantitativa (Bertoni e Lombardi Neto, 2005).

Historicamente, uma das primeiras metodologias indiretas foi a desenvolvida por Bennet (1926), que, estudando solos de Cuba, propôs uma correlação entre a resistência à erosão e a relação sílica-sesquióxido. A partir de então, uma série de índices de erodibilidade foi proposta, considerando as mais diversas propriedades do solo (físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas), bem como suas combinações. Um resumo das principais metodologias encontradas na literatura estrangeira e brasileira encontra-se na Tabela 2.2.

Um dos métodos indiretos mais difundidos para estimativa da erodibilidade é o proposto por Wischmeier *et al.* (1971), baseado em solos de textura média do meio Oeste dos Estados Unidos. O estudo se concentrou na redução do número de variáveis intervenientes nos processos erosivos e na maior simplicidade na estimativa do fator de Erodibilidade K.

Tabela 2.2 – Principais pesquisas realizadas no Brasil e no mundo para a determinação indireta da erodibilidade dos solos.

REFERÊNCIA	RESUMO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA A ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE
Bennet (1926)	Relação Sílica-sesquióxido.
Middleton (1930)	Trabalha com a Relação de Erosão (RE), considerando a importância da dispersão e da infiltração de água na erodibilidade. O índice RE é calculado por meio Razão de Dispersão (RD) e da Razão de Percolação (RC).
Bouyoucos (1935)	Considera a textura e grau de cimentação entre as partículas, propondo um índice chamado de Razão de Argila (RA), quantificado pelos percentuais de silte, areia e argila.
Yoder (1936)	Relação da estabilidade de agregados com uso de processo de peneiramento úmido, utilizando agregados previamente umedecidos.
Peele (1937)*	Considera a granulometria, volume de sedimentação, umidade equivalente, capacidade de saturação, expansão e permeabilidade como propriedades relacionadas a erodibilidade.
Voznesensky e Artsruuiu (1940)	Defini o índice de erodibilidade considerando características de dispersão das partículas em cloreto de sódio, medidas de capacidade de retenção de água e agregação do solo.
Chorley (1959)*	Índice baseado em teor de umidade, densidade, tamanho do grão, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Emprega a resistência a penetração medida por um penetrômetro na formulação empírica de um índice de resistência.
Meirelles (1967)	Utiliza os valores dos limites de liquidez, índice de plasticidade e porcentagem passante na peneira n° 200.
Wischmeier e Mannering (1971)	Critério formulados por meio de um nomograma que considera inter-relações entre granulometria, estrutura do solo e permeabilidade para estimativa do fator K da USLE.
Nascimento e Castro (1976)	Consideram uma abordagem geotécnica da erosão em taludes, onde a resistência à erosão é identificada como sendo a resistência ao cisalhamento dada pela lei de Coulomb, generalizada ao escoamento superficial em taludes.
El-Swaify e Dangler (1976)	Índice formulado para solos do Hawaí, diferenciando condições secas e úmidas. O método considera índice de estabilidade, granulometria, critérios de dispersão das partículas em NaOH e água, pH em água e em KCl.
Nogami e Villibor (1979)	Com fundamentos na metodologia MCT, o método que utiliza o coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão modificada (P_{iM}), de modo que a relação $P_{iM}/s > 52$ se relaciona a solos potencialmente erodíveis.

Tabela 2.2 – Principais pesquisas realizadas no Brasil e no mundo para a determinação indireta da erodibilidade dos solos (continuação).

REFERÊNCIA	RESUMO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA A ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE
Denardin (1990)	Critério para solos brasileiros e dos EUA utilizando como indicadores: granulometria (silte, areia fina e areia grossa), matéria orgânica, diâmetro médio ponderado das partículas inferiores a 2,0 mm (DMP) e permeabilidade.
Vertammati e Araújo (1990)	Definição de graus de erodibilidade baseados nos ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão da metodologia MCT modificada (MCT-M).
Pejon (1992)	Revisão do critério MCT, determinando a perda de massa modificada (P_{iM}) e a Sucção (s) utilizando ensaios de infiltrabilidade. No estudo foi proposto que solos com relação $P_{iM}/s > 40$ seriam potencialmente erodíveis.
Roloff e Denardin (1994)	Método para solos com horizonte B textural no estado do Paraná, levando em consideração os teores de ferro (Fe_2O_3) e teores de silte e areia fina.
Nogami e Villibor (1995)	Determina o potencial de erodibilidade de taludes de corte, com base na resistência dos agregados e na perda de massa por imersão, obtidos por índices de classificação MCT.
Alcântara (1997)	Considera a influência dos teores de partículas finas (passantes na peneira n° 200) e o índice de plasticidade (IP)
Bastos (1999)	Utiliza de abordagem baseada em diversos critérios como, índice de plasticidade, percentual passante na peneira n° 200, relação de dispersão, relação P_i/s da metodologia MCT, taxa de erodibilidade determinada pelo ensaio de rampa e parâmetro variação da coesão (Δc) com a inundação por meio de ensaios de cisalhamento direto.
Silva <i>et al.</i> (1999)	Proposição de cinco modelos avaliação da erodibilidade em latossolos, considerando 37 variáveis dentre as quais se inserem: granulometria, plasticidade, estrutura, óxidos de alumínio e ferro, porosidade, estabilidade de agregados, diâmetro médio ponderado, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica (CTC).
Couto (2015)	A suscetibilidade ao processo erosivo é verificada por dois conjuntos de propriedades. O primeiro é chamado de Razão de Erodibilidade (ϵ) e engloba as características do solo que induzem o processo erosivo. O segundo é chamado de índice de Resistência a Erosão ($IR\epsilon$), baseado em propriedades que conferem resistência das partículas e agregados a erosão hídrica.

**Apud* Bastos (1999)

O método de Wischmeier *et al.* (1971) leva em consideração parâmetros como granulometria, estrutura, classes de permeabilidade e percentual de matéria orgânica, combinando todos em um nomograma (Figura 2.7). Segundo o autor a erodibilidade dos solos estaria fortemente condicionada as frações silte e areia, fato que leva a sua limitação quando o solo apresenta baixos valores desta fração, o que é comum em latossolos brasileiros.

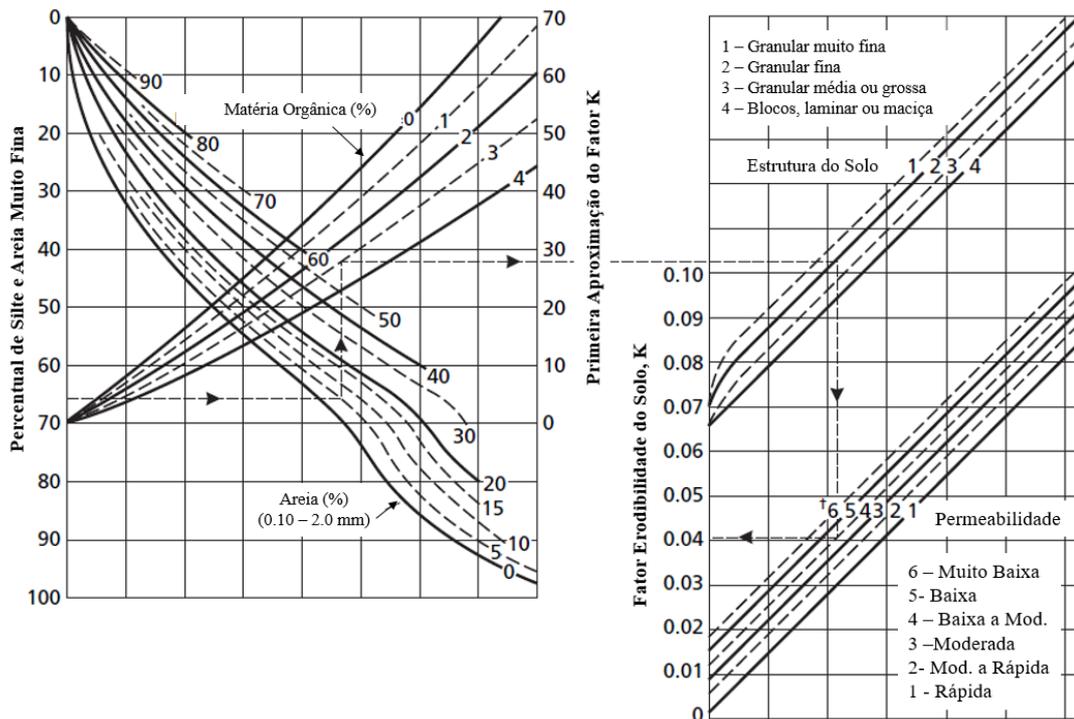


Figura 2.7 – Nomograma desenvolvido por Wischmeier *et al.* (1971) para determinação do fator de erodibilidade K (Fonte: Adaptado de Morgan, 2005).

Marques *et al.* (1997b) testaram o método do nomograma para 22 solos brasileiros com horizonte B textural evidente, concluindo que não existe correlação entre o método de Wischmeier *et al.* (1971) e as perdas de solo evidenciadas em parcelas no campo, principalmente pelo fato destes solos não apresentarem altos percentuais da fração silte.

2.6.3. A metodologia MCT e os critérios de erodibilidade

Devido as dificuldades de aplicação dos sistemas tradicionais de classificação geotécnica aos solos formados em regiões tropicais, Nogami e Villibor (1981) propuseram uma nova classificação, designada Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que foi desenvolvida especialmente para o estudo de solos

tropicais finos, lateríticos e saprolíticos, fundamentado em ensaios que permitem prever suas propriedades mecânicas e hídricas, por meio de corpos de prova de dimensões reduzidas compactados a partir de material integralmente passante na peneira de 2,0 mm (Villibor e Alves, 2017).

A metodologia MCT é composta basicamente por dois procedimentos: o ensaio de compactação mini-MCV (*Moisture Condition Value*) e o de perda de massa por imersão. O ensaio de mini-MCV consiste em uma adaptação do proposto originalmente por Parsons (1976), que utiliza cilindros de 100 mm de diâmetro e soquete de seção plena totalizando 7 kg. Para a classificação MCT foi proposta a redução do diâmetro dos corpos de prova para 50 mm, e também a redução do peso do soquete para 2,27 kg.

A compactação se inicia partir da preparação de cinco porções de solo em diferentes umidades, de modo a caracterizar os ramos seco e úmido da curva de compactação. Posteriormente é aplicado uma série crescente de golpes: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256 golpes, realizando leituras das alturas do corpo de prova ao fim de cada série. Os critérios de paralisação são os seguintes: diferença entre as leituras de duas seções de golpes seguidas ser inferior a 2,0 mm, número de golpes atingir 256; ou observar a expulsão de água do corpo de prova (Nogami e Villibor, 1995).

Após a compactação, são traçadas as famílias das curvas correspondentes as seguintes séries de golpes: 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48 golpes. A partir do ramo seco da curva de 12 golpes, nas proximidades da massa específica aparente seca máxima, calcula-se o parâmetro d' . Considerando as séries de golpes e as deformações crescentes, provenientes do ensaio de compactação, também é possível calcular o coeficiente c' , que está relacionado a textura dos solos, cujo os valores acima de 1,5 indicam solos argilosos enquanto que valores abaixo de 1,0 indicam areias e siltes não plásticos.

O segundo ensaio da metodologia MCT é o de determinação da perda de massa por imersão (P_i) que consiste em forçar o deslocamento, de aproximadamente 1,0 cm, da massa de solo compactada no molde, para posteriormente fazer a submersão do mesmo em água para a determinação da perda de massa. A partir dos valores da perda de massa (P_i) e do coeficiente d' , pode-se calcular o coeficiente e' , obtido por meio da seguinte expressão:

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}\right)} \quad (2.9)$$

Com a determinação dos coeficientes c' e e' pode-se classificar o solo como de comportamento laterítico ou comportamento não laterítico em um gráfico específico (Figura 2.8), sendo possíveis as seguintes classificações:

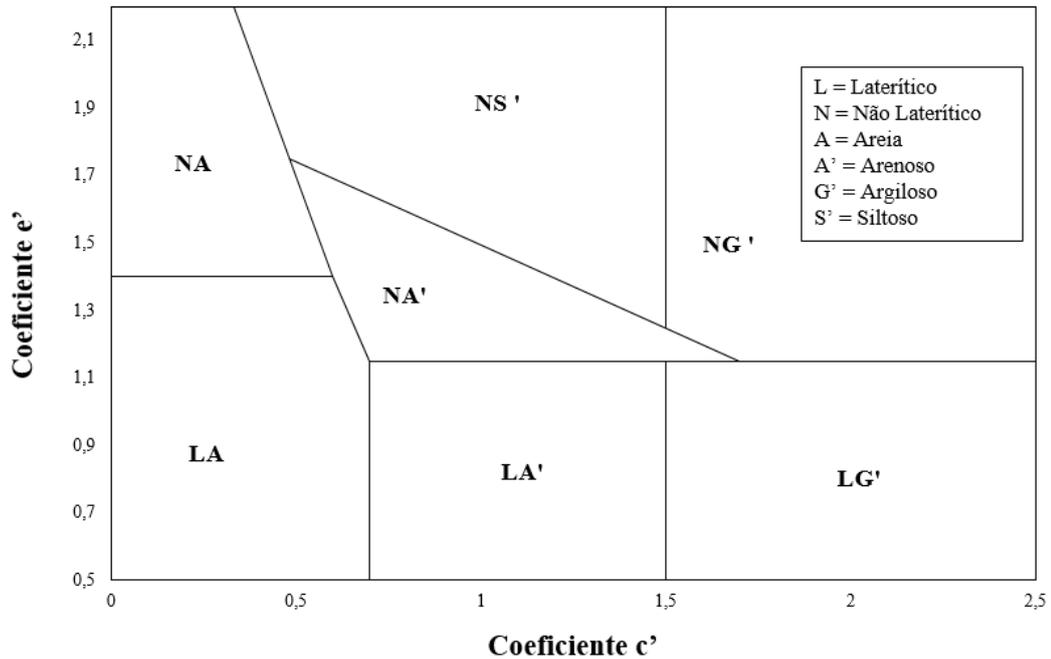


Figura 2.8 – Gráfico de Classificação MCT (Fonte: Adaptado de Nogami e Villibor, 1981).

- Areias não lateríticas (NA): compostos por areias, siltes e misturas, nos quais os grãos são constituídos essencialmente por quartzo e/ou mica. Praticamente não possuem material argiloso, sendo muito suscetíveis à erosão;
- Solos arenosos não lateríticos (NA'): misturas de areias quartzosas com finos de comportamento laterítico. Tipos mais representativos são solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo (granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos);
- Solos siltosos não lateríticos (NS'); solos saprolíticos silto-arenosos peculiares, resultantes do intemperismo tropical. Podem ser colapsáveis e ter baixa capacidade de suporte. Predominam variedades com erodibilidade oscilando de média a alta em taludes de corte;
- Solos argilosos não lateríticos (NG'); solos saprolíticos argilosos que derivam de rochas sedimentares argilosas. Podem se apresentar muitos plásticos e

expansivos quando compactados nas proximidades da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima;

- Areia lateríticas (LA); incluem areias com poucos finos de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regossolos;
- Solos arenosos lateríticos (LA’): solos tipicamente arenosos e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos;
- Solos argilosos lateríticos (LG’): compostos pelas argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B de latossolos, solos podzólicos e terras roxas.

➤ **Método Expedito das Pastilhas**

Apesar da metodologia MCT ter sido aplicada com sucesso e fornecer informações para projetos e obras, a mesma se apresenta de forma complexa, consistindo muitas vezes em dificuldade na determinação dos seus parâmetros, principalmente quanto as leituras de altura dos corpos de prova durante a compactação e os cálculos do ensaio. Neste cenário, alguns autores propuseram simplificações do critério MCT, sendo mais comum o denominado “Método Expedito das Pastilhas”, conforme observado nos trabalhos de Nogami e Cozzolino (1985), Fortes e Nogami (1991), Nogami e Villibor (1994), Godoy (1997), Godoy (2000) e Godoy e Bernucci (2002).

Segundo Nogami e Villibor (1994) o método das pastilhas foi desenvolvido no intuito de simplificar os procedimentos para determinação da classificação MCT, além de utilizar quantidade menor de amostra, aparelhagem mais simples, mão de obra com menor treinamento, de modo a ser utilizada para fins gerais e preliminares. O Método das Pastilhas é baseado na proposta de quantificação do fenômeno da irreversibilidade adquirida, total ou parcial, de propriedades de alguns solos tropicais, conhecidos por lateríticos, feitas de uma maneira rápida, simples e eficaz (Godoy e Bernucci ,2002).

O ensaio consiste na avaliação de propriedades geotécnicas como deformabilidade e resistência, a partir de pastilhas de solo de dimensões reduzidas, utilizando de critérios qualitativos e quantitativos. Os principais parâmetros observados são: contração após secagem em estufa (a 60°), inchamento após reabsorção de água, quantidade de água reabsorvida, resistência a penetração, resistência táctil e desagregação em água.

Godoy e Bernucci (2002), em uma outra abordagem, propuseram modificações no método das pastilhas apresentado por Nogami e Villibor (1994). Dentre as alterações destacam-se as mudanças nas dimensões das pastilhas utilizadas no ensaio, que, neste caso, apresentam 35 mm de diâmetro e 10 mm de altura (Santos, 2006). A partir destas pastilhas são determinados: a contração diametral (%), inchamento diametral (%), as penetrações sucessivas de dois cones (10 e 30 gramas) e o índice de reabsorção de água. Posteriormente as classes de solos tropicais são determinadas de acordo com o guia classificatório (Tabela 2.3)

Tabela 2.3 – Guia para classificação de solos tropicais (Godoy e Bernucci, 2000).

Classes de Solos	Características dos Solos	Contração (%)	Inchamento (%)	Penetração Cone 10g (mm)	Penetração Cone 30g (mm)	Índice de Reabsorção
Lateríficos	Típicos	> 2	< 1	0	0	Negativo
	Argilosos	≥ 6				
	Arenosos	2 a 6	≤ 10,5	≤ 4	≤ 6	≤ 0,6
	Areias	≤ 2				
Transicionais	Argilosos	≥ 6				
	Arenosos	2 a 6	5,5 a 13,0	3 a 5	6 a 8	0,3 a 0,9
	Areias	≤ 2				
Não-Lateríficos	Argilosos	≥ 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 4
	Siltosos	2 a 4	9 a 15	≥ 6	≥ 11	0,4 a 0,7
	Arenosos	2 a 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 0,4
	Areias	≤ 2	> 5	≥ 4	≥ 8	> 0,4

Concomitante com os ensaios de contração, inchamento e reabsorção de água feito nas pastilhas devem ser realizados os ensaios de desagregação em água. Essa determinação é feita a partir da moldagem de esferas, confeccionadas na mesma umidade das pastilhas, que são secas em estufa a 60° e, posteriormente, submersas em água, onde será verificada sua interação com meio, podendo se desagregar (em pasta, partículas ou blocos) ou mesmo não ser alterada.

O método expedito das pastilhas é uma alternativa para simplificar a classificação MCT, visando o uso de solos em obras de pavimentação, sendo assim, esta metodologia não é muito utilizada no diagnóstico de materiais potencialmente erodíveis. No entanto, este método se apresenta promissor para a investigação da erodibilidade, uma vez que além de utilizar parâmetros de resistência, também é possível determinar a contração e o inchamento das partículas na presença de água, retratando diretamente os efeitos de ressecamento e umedecimento que ocorrem sob condições naturais.

➤ **Critério de Erodibilidade MCT (Relação P_{iM}/s)**

Além da classificação dos solos tropicais, conforme exposto anteriormente, Nogami e Villibor (1979) também desenvolveram um método para estimar a erodibilidade de solos, com a utilização de dois procedimentos experimentais adicionais: a perda de massa por imersão modificada (P_{iM}) e o ensaio de infiltrabilidade (determinando o coeficiente de sorção - s).

A infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra nos solos através de sua superfície. É controlada sobretudo pelas tensões de sucção. Nos climas tropicais e subtropicais úmidos, apesar da elevada pluviosidade, devido à forte evapotranspiração e a boa drenagem da maioria dos solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa que a permeabilidade saturada como a propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial (Bastos, 1999).

A determinação da infiltrabilidade está associada ao fluxo de água que ascende pela amostra, sendo possível assim medir o deslocamento da água através de uma régua graduada junto ao tubo capilar. Com os dados referente ao deslocamento do menisco e o tempo em raiz quadrada ($\text{min}^{1/2}$) é possível elaborar a curva típica e calcular o coeficiente de sorção, pela inclinação do trecho retilíneo inicial (Fernandes, 2015).

A perda de massa por imersão modificada (P_{iM}) é determinada de modo similar ao da metodologia MCT. A principal diferença é que o ensaio modificado consiste na inundação das amostras de solo indeformadas contidas em anéis metálicos. A perda de massa por imersão modificada P_{iM} (%) é calculada pela relação entre a massa seca despreendida do anel e massa total seca antes do ensaio.

A partir da obtenção do coeficiente de sorção (s) e da perda de massa por imersão modificada (P_{iM}), Nogami e Villibor (1979) determinaram que o quociente da relação $P_{iM}/s = 52$ seria o limite entre solos resistentes e erodíveis. Desta maneira, solos com $P_{iM}/s > 52$ seriam considerados erodíveis e, nestes casos, deveriam ser adotadas medidas de proteção dos taludes contra a erosão. Em 1995, Nogami e Villibor expressaram o mesmo critério de forma gráfica (Figura 2.9). Pejón (1992), estudando a erodibilidade no mapeamento geotécnico da carta Piracicaba, utilizou o mesmo critério, sugerindo adotar a relação $P_{iM}/s = 40$ considerando um maior número de amostras.

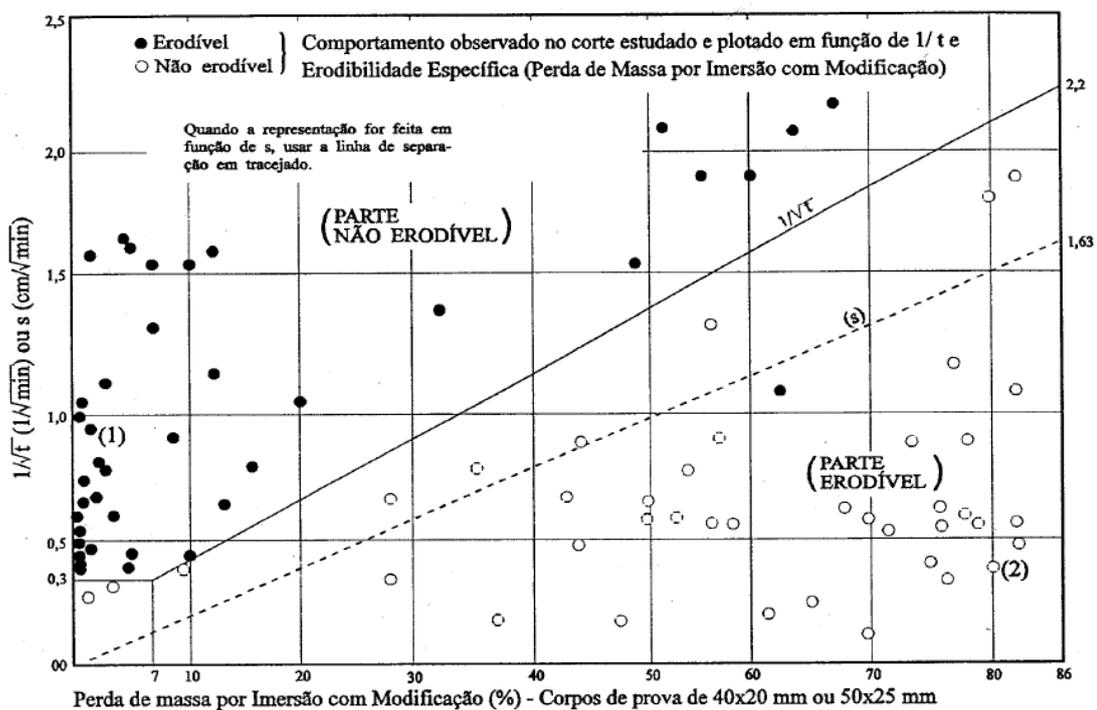


Figura 2.9 – Critério de Erodibilidade MCT (Fonte: Nogami e Villibor, 1995).

2.6.4. Equipamentos e ensaios para estimativa da erodibilidade

A utilização de ensaios específicos para a avaliação da erosão não é prática comum em laboratórios de análise de solos. Basicamente, estas metodologias, também conhecidas por “Ensaio de Erosão”, têm o intuito de verificar a capacidade de desagregação dos solos mediante a ação de um agente erosivo, sendo mais comum a água. Diversos ensaios e equipamentos já foram propostos, porém nesta seção, será dado maior enfoque ao ensaio de Inderbitzen, ao ensaio de dispersibilidade de solos pelo furo de agulha (“*pinhole test*”) e ao teste de resistência a erosão utilizado pelo Conselho de Pesquisa Científica e Industrial (CSIR) da África do Sul.

➤ Ensaio de Inderbitzen

O ensaio proposto originalmente por Inderbitzen (1961), que posteriormente ficou conhecido por seu nome, consiste em avaliar a perda de solo de um corpo de prova submetido ao escoamento superficial com vazão e declividade controladas. No ensaio são medidas a perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável em intervalos de tempo pré-determinados (Figura 2.10).

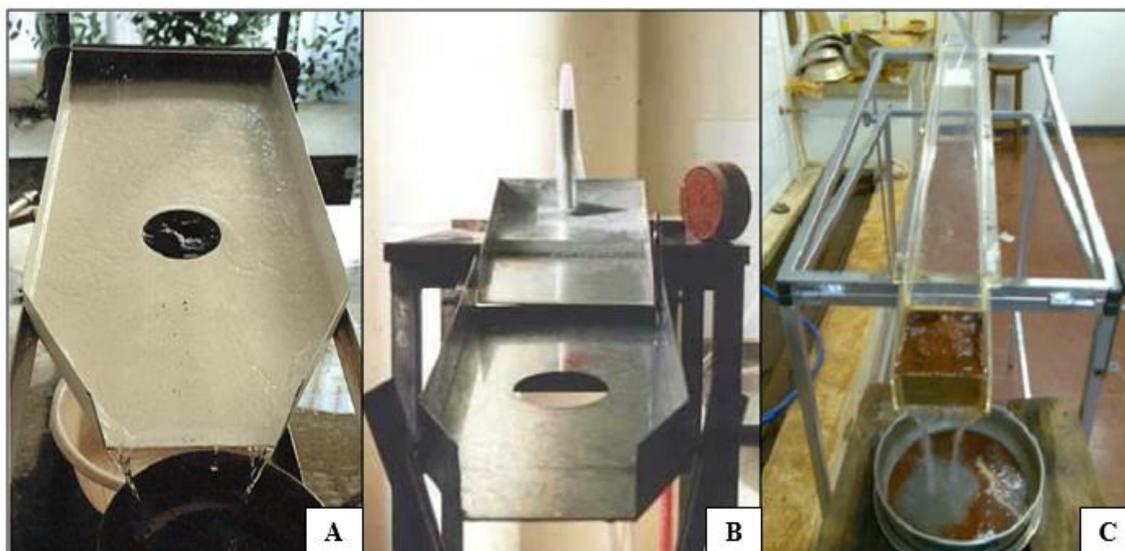


Figura 2.10 – Equipamentos de Inderbitzen existentes na literatura: A) Lemos (2002); B) Bastos (1999); C) Aguiar (2009).

Em sua concepção original o equipamento de Inderbitzen mensurava a perda de solo a partir de uma amostra de 152 mm de diâmetro exposta a uma determinada vazão e inclinação, que não foram fixadas na proposição do método. Segundo o autor, a falta de precisão do ensaio levaria a resultados de caráter qualitativo, sendo que o método apenas indicaria a velocidade com a qual o material seria erodido em diferentes condições de compactação, declividade, e intensidade de precipitação (representada pela vazão adotada).

Devido à falta de especificação das variáveis para a realização do ensaio, vários trabalhos se propuseram a melhorar os aspectos relacionados a quantificação das perdas de solos, desenvolvendo e construindo novos equipamentos e metodologias (Figura 2.10). Um resumo dos critérios utilizados por alguns autores é apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resumo da evolução das metodologias e do equipamento de Inderbitzen desenvolvidos no Brasil.

Referência	Dimensões da Amostra	Condições do Corpo de Prova	Vazões Adotadas (ml/s)	Declividades Adotadas	Duração Total do Ensaio	Peneiras para coleta do material erodido
DNER (1979) ¹	d = 152 mm altura = 46 mm	Natural, secas ao ar e pré-umedecidas	59 e 314	44° e 59°	-	-
Fácio (1991)	d = 100 mm altura = 100 mm	Umedecidas	50	10°	60 minutos	# 200
Santos (1997)	d = 100 mm altura = 100 mm	Umedecidas	17,5	10°	30 minutos	# 50, # 100 e # 200
Bastos (1999)	d = 97,6 mm altura = 50,0 mm	Natural, secas ao ar e pré-umedecidas	50 e 100	10°, 26°, 45° e 54°	20 minutos	# 4, #10, #40 e # 200
Fragassi (2001)	d = 152 mm altura = 40,0 mm	Umedecidas	25	10°	30 minutos	# 200
Mota (2001)	d = 100 mm altura = 100 mm	Umedecidas	25 a 75	5° a 40°	30 minutos	# 50, # 100 e # 200
Lemos (2002)	d = 100 mm altura = 100 mm	Natural e seca ao ar por 24 h	-	10°	20 minutos	# 270
Aguiar (2009) ²	l = 100 mm altura = 50 mm	Umedecidas	50	10°	20 minutos	# 200
Stephan (2010) ³	d = 140 mm l = 93 e 142 mm altura = 40 mm	Natural	16,7	10°	30 minutos	# 4, #10, #40, #100 e #200
Almeida (2014) ²	l = 100 mm altura = 50 mm	Umedecidas por 24 h	50	10°	60 minutos	# 200

¹Apud Bastos (1999); ² Uso de amostras cúbicas; ³ Uso de amostras cúbicas e cilíndricas de diferentes dimensões.

Um dos focos de discussão entre as metodologias se relaciona a condição da amostra para a realização do ensaio: natural, seca ao ar ou saturada (umedecida). Por estar relacionada as forças de sucção, a quantidade de água presente na amostra pode influenciar de maneira significativa nas perdas de solo. Neste cenário, Fácio (1991) propôs que as amostras deveriam ser umedecidas por 15 minutos antes do ensaio, no intuito de eliminar eventuais forças de sucção existentes, uma vez que em alguns solos, as forças de sucção em condições de baixa saturação podem ocasionar a ruptura dos agregados.

Outra variável importante está relacionada com o tempo de duração do ensaio, pois em tempos muito curtos pode ocorrer a superestimação das perdas, principalmente pelo impacto da primeira onda de fluxo (Bastos, 1999). Entretanto, é importante ressaltar que a maior perda, para a maioria dos solos, se encontra no intervalo de 5 a 10 minutos a partir do início do ensaio, porém esta característica é variável de um material para outro e não deve ser interpretada como tempo suficiente para o execução do ensaio.

Segundo Stepan (2010), o aparelho de Inderbitzen é simples de ser construído e de baixo custo (Figura 2.10), além do ensaio ser fácil e rápido de ser executado, se apresentando muito promissor na avaliação da erodibilidade. Entretanto, como desvantagens, o aparelho não leva em consideração o “efeito *splash*” (desagregação das partículas pelas gotas de chuva), o resultado disso é uma perda de solos inferior a real, tornando-se mais significativa em solos desprovidos de cobertura vegetal.

➤ **Ensaio do furo de agulha (“Pinhole Test”)**

O ensaio do furo de agulha, conhecido também por *pinhole test*, foi idealizado por Sherard *et al.* (1976) para identificar e melhorar a compreensão da erodibilidade de solos finos ricos em sódio, principalmente para estudos envolvendo barragens de terra (Nadal-Romero *et al.*, 2011).

Regulamentado pela norma brasileira ABNT NBR 14.114 (1998), o ensaio consiste em avaliar de forma qualitativa e quantitativa o potencial de dispersibilidade de solos, por meio da percolação de água destilada através de um furo de 1 mm e diâmetro feito em um corpo de prova padrão. (Figura 2.11). Após o ensaio, os solos são classificados de

acordo com a coloração do efluente que passa pelo furo de 1,0 mm e pelo diâmetro final deste, onde é verificado se ocorreu a ampliação do furo original.

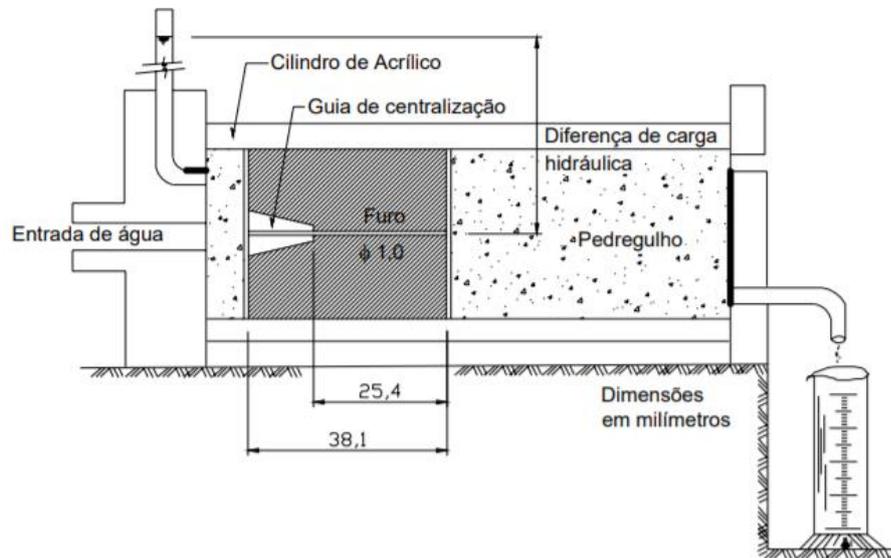


Figura 2.11 – Esquema do ensaio do furo de agulha (Fonte: Modificado da ABNT, 1988 *apud* Matheus, 2006).

Quando o efluente se torna turvo, o furo no corpo de prova tende a se alargar rapidamente, resultando em um aumento de vazão, identificando, desta forma um comportamento dispersivo do solo. Por outro lado, caso não ocorram alterações do diâmetro do furo e da vazão, com efluente levemente turvo, pode-se classificar o material como de baixa dispersibilidade (Cruz, 2008). Este ensaio é muito utilizado em engenharia geotécnica para estudos de erosão interna em barragens de núcleo argiloso.

➤ **Teste de Resistência à Erosão (Método CSIR)**

Os problemas das perdas de solos não se restringem às questões agronômicas ou em taludes de corte, de fato, as estradas, principalmente as rurais sem pavimentação, apresentam consideráveis perdas de material, especialmente pela ação das enxurradas concentradas durante o período chuvoso, gerando prejuízos estruturais e econômicos que dificultam a circulação de pessoas, bens e serviços.

Considerando as estradas rurais não pavimentadas é comum o uso de aditivos para redução de poeiras e dos custos de manutenção, além da melhoria do tráfego em qualquer condição climática. Neste contexto, o “*Council for Scientific and Industrial*

Research” (CSIR) da África do Sul, com suporte de outros órgãos nacionais, propôs uma certificação dos aditivos utilizados em estradas não pavimentadas, baseada em um conjunto de ensaios cujo objetivo é proporcionar medidas de referência para aplicação nas estradas do país (Jones *et al.*, 2005).

Dentre os diversos testes utilizados no procedimento de certificação, destaca-se o teste de resistência a erosão, desenvolvido exclusivamente para este fim, pois segundo Jones (2007) nenhum dos testes de mensuração de perdas de solos existentes na literatura até aquele momento se adequava ao campo da pavimentação. O teste em questão, consiste no uso de corpos de prova compactados inseridos em um equipamento que simula a ação de um fluxo de água constante sobre amostra (Figura 2.12, demonstrando 1- entrada de água; 2 – aspersor de água; 3 - amostra)

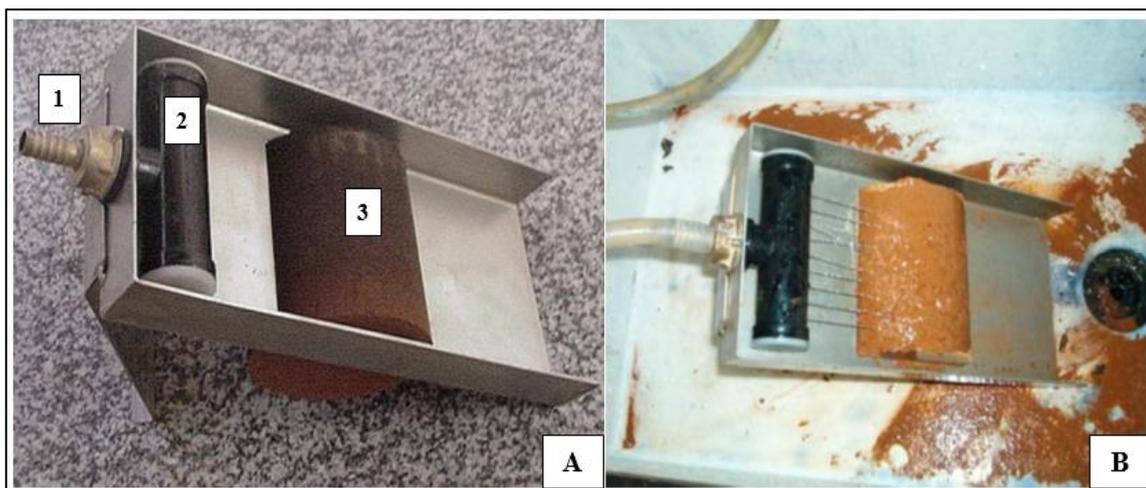


Figura 2.12 – Equipamento desenvolvido pelo CSIR para execução do teste de resistência a erosão: A) detalhes do equipamento B) Ensaio em execução.
(Fonte: Jones e Ventura, 2003 *apud* Range e Horak 2005).

Segundo Range e Horak (2005) o teste se torna importante por simular as perdas de material provocadas pela erosão laminar na superfície de uma estrada de terra compactada. Após diversos experimentos, foram determinadas especificações do equipamento e da amostra, no intuito de tornar o ensaio simples e rápido de ser executado (Tabela 2.5). As amostras utilizadas são previamente umedecidas e compactadas de acordo com as especificações de campo. São preparados corpos de prova do solo em natura e tratado (com uso de aditivos).

Tabela 2.5 – Especificações do teste de resistência a erosão (CSIR).

Parâmetro	Valor Determinado
Diâmetro da amostra	100,0 mm
Comprimento da amostra	115,0 mm
Inclinação da rampa	35°
Distância entre o aspersor de água e a amostra	100,0 mm
Espaçamento entre os furos do aspersor	10,0 mm
Carga hidráulica constante aplicada	1,0 m
Duração total do ensaio	5 minutos

Após a moldagem, as amostras tratadas e não tratadas são pesadas, posicionadas no aparelho, e submetidas a cinco minutos de fluxo de água a uma carga constante de 1,0 m de coluna d'água. O excesso de água deve ser drenado por mais cinco minutos. Em seguida, a amostra é removida do aparelho e seca a 105 °C por 24 horas. Após este período, as amostras são pesadas e a perda percentual de massa é registrada. A perda média para cada conjunto de três amostras é relatada. Se a perda de uma difere das outras duas em mais de cinco por cento, o teste deve ser refeito (Jones *et al*, 2005).

Range e Horak (2005) utilizaram o teste de resistência a erosão para avaliar o uso de saprolitos como aditivos na pavimentação de estradas. No trabalho foram testadas amostras de diferentes índices de plasticidade (IP): alta plasticidade (IP = 25), média plasticidade (IP = 8) e baixa plasticidade (IP = 4). Além disso, foi realizada a compactação dos materiais em diferentes graus de compactação (90 %, 95% e 100 %), executados na energia Proctor Modificado.

Os resultados demonstraram que material de maior índice de plasticidade apresenta menor perda de solo após o ensaio (Figura 2.13). De modo complementar, foi verificado que o grau de compactação também é importante na resistência à erosão, onde valores elevados exibem menor perda de material (Figura 2.13). Segundo Range e Horak (2005), os resultados obtidos pelo método CSIR podem ser utilizados para discernir sobre materiais de maior ou menor erodibilidade. Os autores ainda consideram que resultados melhores podem ser obtidos com a introdução de simuladores de chuva, inserindo no método a avaliação das perdas pelo impacto das gotas.

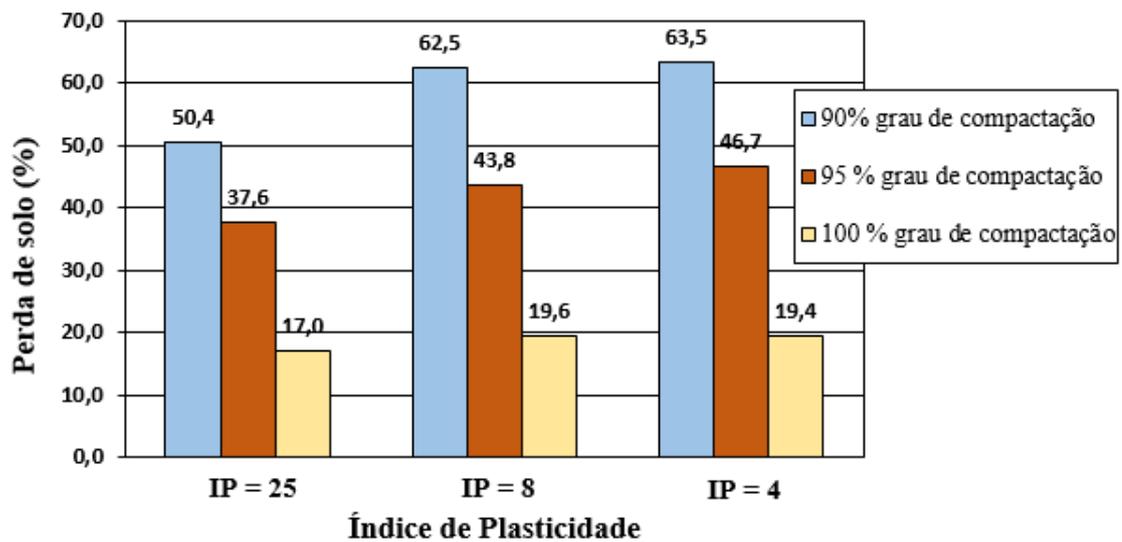


Figura 2.13 – Resultado do teste de resistência a erosão para saprolitos.
(Fonte: Modificado de Range e Horak 2005).

2.6.5. Influência da sucção e da distribuição de poros na erodibilidade

Como já colocado anteriormente, o processo erosivo é o resultado da interação de diversos fatores, com destaque para as condições climáticas locais, topografia e as características específicas do próprio solo. Apesar dos regimes pluviométricos se constituírem em aspecto de grande relevância, é necessário o estudo da interação solo, água e atmosfera no desencadeamento e evolução dos processos erosivos. Basicamente, em solos de clima tropical, os regimes pluviométricos elevados favorecem condições de intensa lixiviação e dissolução de minerais, resultando em solos muito permeáveis, dotados de estrutura porosa. Além disso, esta condição também favorece a formação de agregados estáveis e resistentes a ação das chuvas. Portanto, a interação solo, água e atmosfera, sob o contexto da suscetibilidade a erosão, é consequência de duas propriedades dos solos: a coesão (agregação) e a sucção.

A coesão e a sucção se encontram diretamente relacionadas. Basicamente, a infiltração de água durante a precipitação aumenta os esforços externos, diminuindo a sucção e, conseqüentemente, reduzindo a coesão aparente, situação que pode levar ao início do processo erosivo. Considerando os estudos da influência da sucção na erodibilidade é verificado que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam as maiores perdas de coesão com aumento do teor de umidade (Fácio, 1991; Lima *et al.* 2016).

Além da perda de coesão com a saturação, deve ser considerada a pressão na fase gasosa com a variação do teor de umidade. Segundo Camapum de Carvalho (2009) o aumento da sucção no solo tem ao menos duas consequências, afeta a capacidade de infiltração e favorece a sua deterioração, visto que a fase gasosa é submetida a pressão elevadas que rompem a estrutura do solo por serem superiores à sua coesão (Figura 2.14 a).

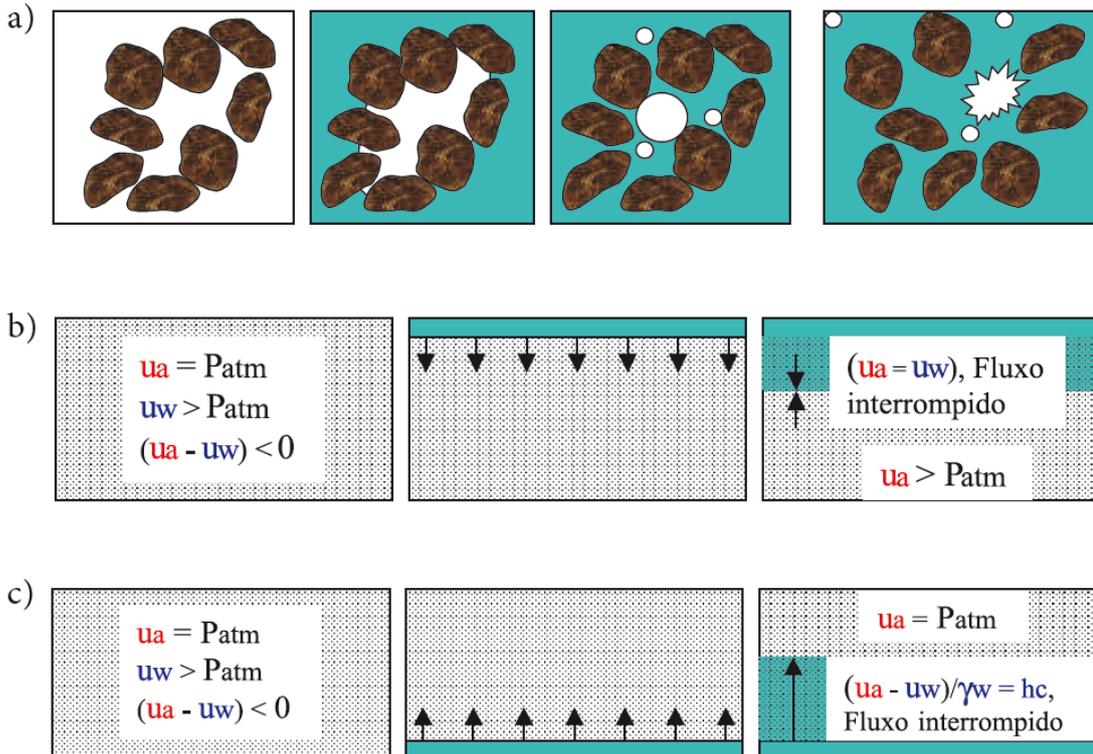


Figura 2.14 – Fluxo de água no solo e geração de pressão na fase ar.
(Fonte: Campaum de Carvalho *et al.*, 2006).

A pressão na fase gasosa também é influenciada pela direção e sentido do fluxo de saturação do solo. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), quando o solo é recoberto pela lâmina d'água do fluxo superficial, tende a sofrer uma rápida infiltração, sendo o fluxo interrompido pela frente de ar subjacente, sendo esta camada de ar submetida a pressão positiva, superior a pressão atmosférica ($u_a > P_{atm}$), conforme Figura 2.14 b. Esta pressão positiva pode ser superior a coesão do solo, situação que leva a ruptura localizada das partículas e agregados, intensificando o processo erosivo. Por outro lado, quando a saturação é auxiliada pela capilaridade a fase ar é simplesmente substituída pela água, portanto a pressão na fase ar se torna igual a pressão atmosférica ($u_a = P_{atm}$), conforme Figura 2.14 c.

Considerando taludes de corte as duas situações podem ocorrer, quando o fluxo de água ocorre na superfície do talude pela ação da chuva têm-se a geração da pressão pela descontinuidade da fase gasosa, ao passo que o fluxo de água do interior do maciço para a face exposta do talude acarreta na simples substituição da fase ar pela fase água.

Segundo Menezes (2010) conhecer a suscetibilidade a erosão por meio das variações da sucção e do teor de umidade é de grande importância, mesmo essa abordagem sendo considerada complexa, em detrimento dos problemas da não linearidade do fluxo, da influência da temperatura e da permeabilidade em condições não saturadas, esta última diretamente relacionada a frequência e distribuição de poros no interior do maciço.

Tanto a sucção quanto a distribuição de poros podem ser avaliadas mediante a determinação da curva característica, também chamada de curva de retenção. Esta curva descreve a relação entre a sucção matricial no solo e o teor de umidade volumétrico θ (em m^3/m^3), representando a capacidade do solo em reter água (Figura 2. 15).

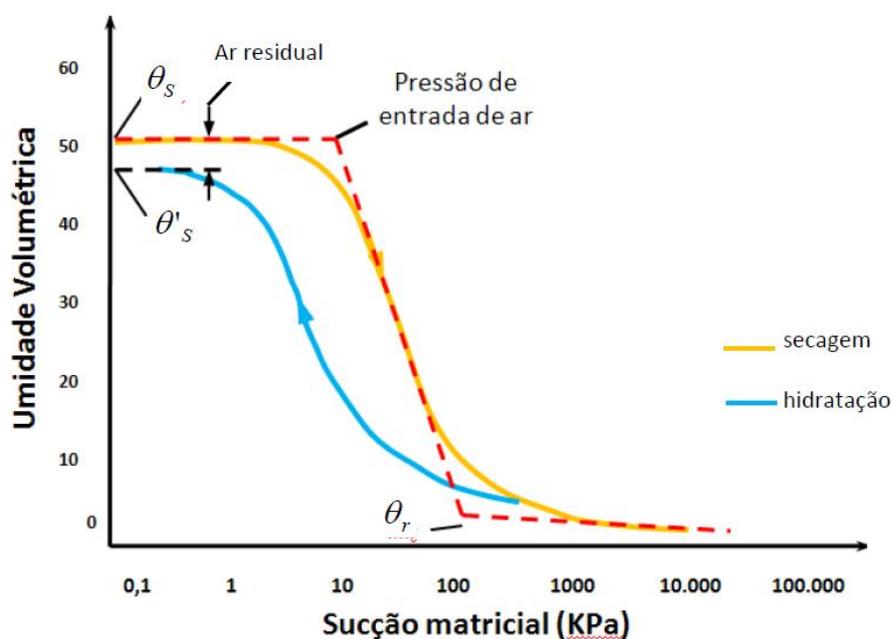


Figura 2.15 – Exemplo de curva de retenção de água, onde θ_s = umidade volumétrica de saturação e θ_R = umidade volumétrica residual (Fonte: Menezes, 2010).

Para altos teores de umidade, onde a capilaridade exibe maior importância na sucção, a curva de retenção é influenciada pelo arranjo e dimensão dos poros, ao passo que em menores conteúdos de água estes fatores tem pouca interferência (Reichardt e Timm,

2012). Conforme observado na Figura 2.15 a trajetória da curva de retenção é dependente do método utilizado: secagem ou umedecimento, configurando o fenômeno da histerese. Esta condição ocorre devido a formação de bolhas de ar e aos fenômenos de contração e expansão das argilas nas etapas de secagem e umedecimento (Reichardt e Timm, 2012).

Outra informação importante obtida pela curva de retenção é a pressão de entrada de ar, considerada a pressão de sucção na qual os poros saturados do solo começam a se esvaziar, diretamente influenciada pela textura (Figura 2.16). Solos de textura arenosa apresentam menores capacidade de armazenamento de água e, portanto, menores pressões de entrada de ar, devido aos grandes poros interconectados em sua estrutura (Bonder, 2008). Nos solos argilosos a perda de água é mais lenta (Figura 2.16), principalmente pela presença de poros de diferentes tamanhos que além da capilaridade são influenciados por fenômenos de adsorção na superfície das partículas e agregados (Reichardt e Timm, 2012).

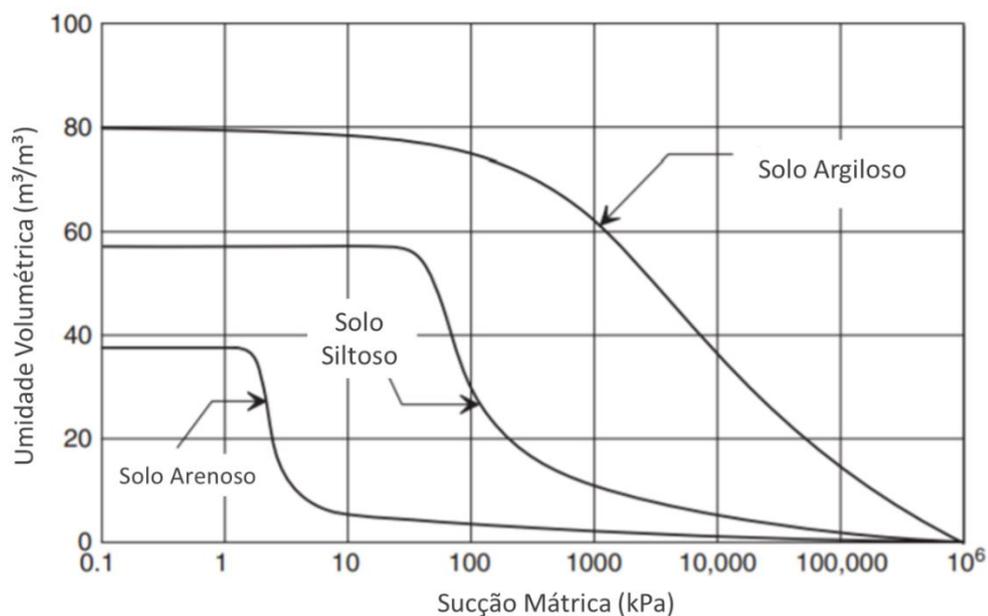


Figura 2.16 – Influência da textura do solo na curva de retenção de água (Fonte: Modificado de Fredlund *et al.*, 2012).

Conforme explicitado no parágrafo anterior, a distribuição dos poros exerce influência significativa na curva de retenção de água. Entretanto não há consenso acerca de um valor limítrofe para classificação dos poros do solo quanto ao tamanho, segundo mais comum a divisão em três categorias: macro, meso e microporosidade.

Segundo Jong van Lier (2010), os latossolos brasileiros se comportam de forma diferenciada. Apesar da textura muito argilosa, estes solos são muito permeáveis, reflexo da elevada macroporosidade que geralmente se encontra equilibrada com a microporosidade. Os mesmos quando submetidos a chuvas intensas drenam rapidamente, não oferecendo qualquer restrição ao sistema radicular das culturas. De acordo com Silva *et al.* (2009), tal situação é resultado dos maiores teores de óxidos de ferro e carbono orgânico, aumentando a flocculação e o tamanho dos agregados, conferindo aumento da macroporosidade.

No caso de perfis de taludes de corte expostos, torna-se interessante a avaliação da distribuição dos poros com a profundidade, visto que as camadas superiores, mais intemperizadas, podem apresentar maior macroporosidade. Em contrapartida, as camadas inferiores, mais próximas a rocha de origem e em menor grau de intemperismo, apresentam maior microporosidade. Estas diferenças acerca da porosidade tendem a explicar as diferenças de comportamento que levam a ocorrência de processos erosivos na interface dos horizontes.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) constitui uma das principais províncias minerais do Brasil, ocupando uma área de cerca 7.000 km² na porção central do Estado de Minas Gerais, aproximadamente na latitude 20°15' S e longitude 43°30' W. Segundo Hasui *et al.* (2012), trata-se de uma região montanhosa, de grande beleza natural e rica em depósitos minerais. O nome Quadrilátero Ferrífero resulta da abundância de formações ferríferas e jazidas de minério de ferro, contidas em uma área aproximadamente retangular em mapa, definida pela orientação de um conjunto de serras, as quais representam grandes estruturas dobradas, do tipo sinclinal e homoclinal.

O Quadrilátero Ferrífero apresenta arcabouço geológico complexo, constituído por quatro grandes unidades litoestratigráficas principais, formada por rochas pré-cambrianas, representadas pelos complexos metamórficos, que formam o embasamento cristalino, sotoposto a sequência arqueana de rochas metavulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas (Figura 3.1), e sobre eles dois espessos pacotes de rochas metassedimentares proterozóicas: o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (Dorr, 1969).

Os Complexos Metamórficos são constituídos por rochas gnáissico-migmáticas polideformadas, de composição tonalítica a granítica; subordinadamente granitos, granodioritos, anfibolitos, intrusões máficas e ultramáficas (Costa, 2009). O comportamento metamórfico desta unidade é, em geral, polifásico, sendo afetada por um metamorfismo regional em condições de fácies anfibolito médio a superior. Posteriormente, esta unidade foi sujeita a transformações metamórficas retrógradas em condições fácies xisto verde (Rossi, 2014). Tais complexos afloram em duas regiões diferentes: no centro do Quadrilátero, nas cabeceiras do Rio das Velhas, denominado de Complexo Bação (Figura 3.1), e também circundando a região, como ao norte da Serra do Curral e a oeste da Serra da Moeda (Hasui *et al.*, 2012).

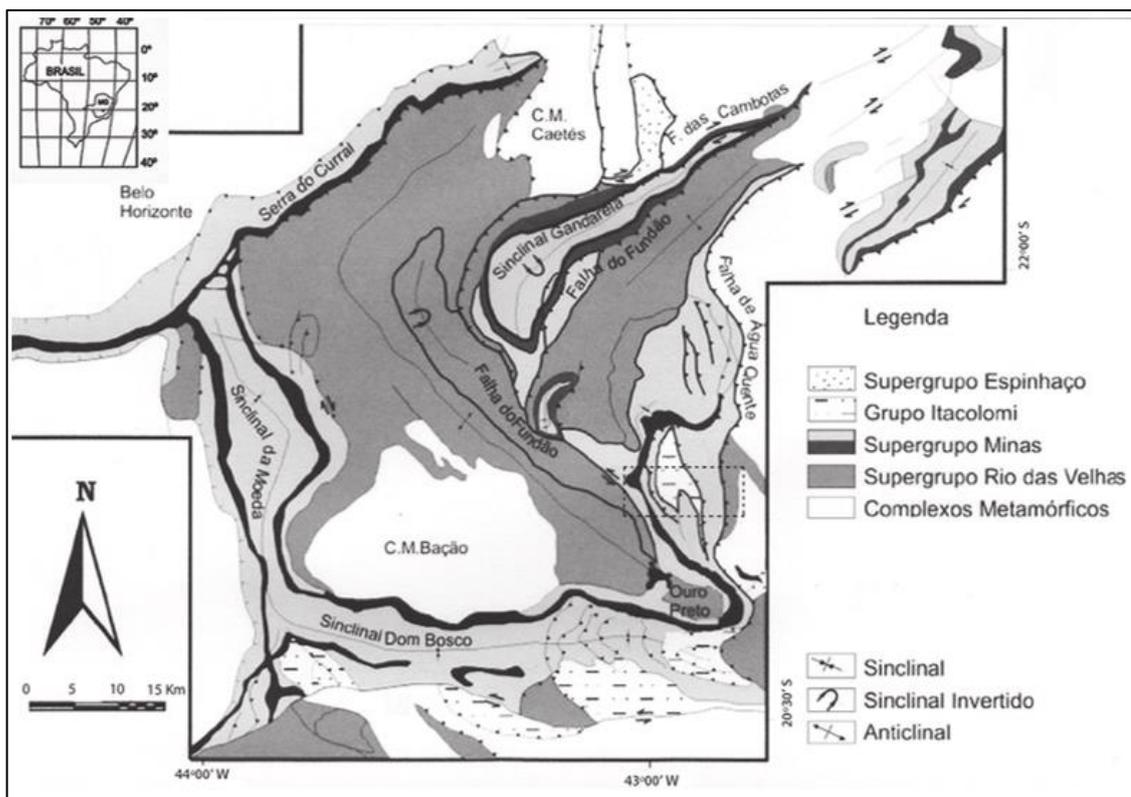


Figura 3.1 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, segundo Dorr (1969).
(Fonte: modificado por Alkmin e Marshak, 1998 *apud* Messias *et al.* 2012)

O Supergrupo Rio das Velhas, também de idade arqueana, é constituído por rochas vulcânicas e sedimentares, dos Grupo Maquiné e Nova Lima. Segundo Carvalho Filho (2008), o Grupo Nova Lima é subdividido em uma unidade basal constituída por rochas ultramáficas, uma intermediária de natureza metassedimentar química, representada por xistos carbonáticos, metacherts, formações ferríferas bandadas e filitos, e a unidade clássica superior, com quartzo-xistos, quartzitos impuros, quartzo-filitos e metaconglomerados. Como unidade de topo do Supergrupo Rio das Velhas tem-se o Grupo Maquiné, constituído por quartzitos, metaconglomerados e filitos (Hasui *et al.*, 2012).

O Supergrupo Minas é uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica com pequena contribuição vulcânica. Sua estratigrafia é constituída essencialmente por xistos, quartzitos, filitos, formação ferrífera e rochas carbonáticas, assentados discordantemente sobre gnaisses e mica-xistos. As rochas desta unidade recobrem as unidades do Supergrupo Rio das Velhas e o complexo metamórfico granito gnáissico, em uma nítida discordância erosiva e angular (Paganin Neto, 2016).

O Supergrupo Minas pode ser dividido em outras seis grandes unidades. Da base para o topo encontram-se os grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba, Sabará e Itacolomi (Figura 3.2).

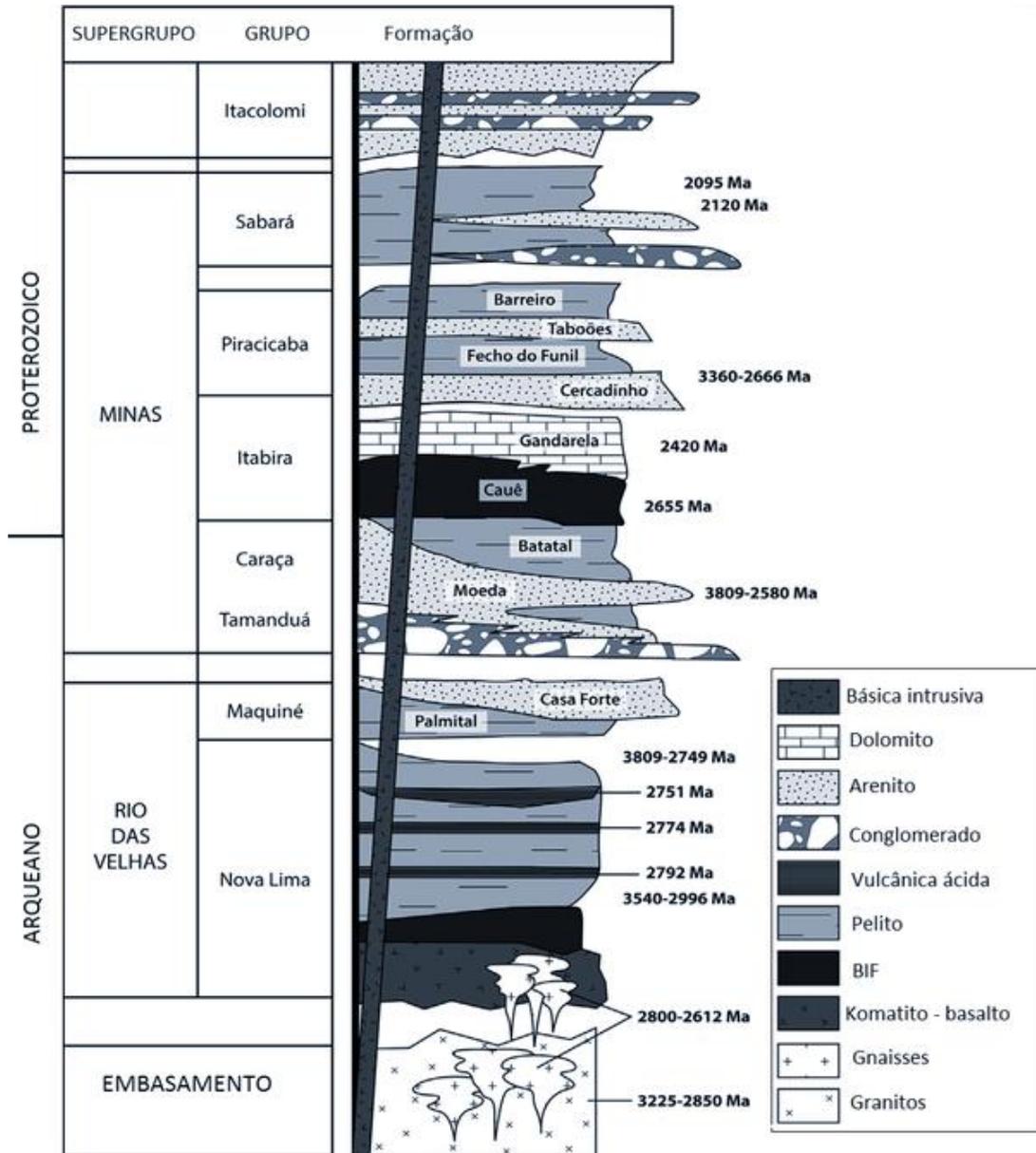


Figura 3.2 – Coluna estratigráfica do quadrilátero ferrífero (Fonte: Farina *et al.*, 2016 *apud* Pedrosa-Soares *et al.* 2018).

O Grupo Tamanduá é basicamente dividido nas formações Cambotas e Morro Grande. A primeira é formada por quartzitos com camadas de conglomerados, quartzitos e quartzitos conglomeráticos. Já a formação Morro Grande é formada por xistos diversos, filitos e formações ferríferas subordinadas.

Grupo Caraça é basicamente constituído pelas formações Moeda e Batatal. A Formação Moeda se caracteriza por apresentar duas fácies intergradacionais de composição predominantemente quartzosa, onde a inferior é constituída por espesso pacote de quartzito grosso, com estruturas sedimentares preservadas. Já a superior é silicosa de granulometria fina e em algumas regiões chega a ser confundida com filitos da Formação Batatal (Dorr, 1969 *apud* Paganin Neto, 2016). Na Formação Batatal predominam filitos sericíticos, metacherts, formações ferríferas e carbonosas

O Grupo Itabira, localizado acima do Grupo Caraça, é formado por rochas sedimentares de natureza química, referentes as extensas formações ferríferas bandadas de grande importância econômica, às quais estão ligadas a própria denominação da região (Carvalho Filho, 2008).

O Grupo Piracicaba é constituído por quatro formações (Cercadinho, Fêcho do Funil, Taboões e Barreiro). Consiste em metassedimentos clásticos, incluindo conglomerado fino, quartzito e filito carbonoso, contendo esporadicamente precipitados químicos e bioquímicos. Na maioria das vezes, a individualização das formações que compõem este grupo torna-se muito difícil devido à natureza dos contatos entre as mesmas (Paganin Neto, 2016).

O Grupo Sabará é constituído de clorita-xistos e filitos, metagrauvas, metatufos, metaconglomerados e quartzitos, principalmente na região de Ouro Preto e na vertente da Serra do Curral, onde atinge até 3.000m de espessura (Tapahuasco, 2017). O contato com o Grupo Piracicaba é discordante e erosivo e o contato superior com o Grupo Itacolomi se dá por discordância erosiva e angular (Dorr, 1969 *apud* Nunes, 2016).

Grupo Itacolomi é constituído por duas fácies: uma quartzítica, composta por quartzitos comuns, quartzitos ferruginosos de aspecto semelhante ao itabirito e ao filito e quartzitos conglomeráticos com seixos de quartzo, hematita itabirito, quartzito, filito e granito; hematita e martita geralmente são constituintes intersticiais da matriz. A outra fase é filítica, composta por filitos, filitos quartzíticos, metaconglomerados, quartzitos e quartzitos ferruginosos similares aos itabiritos (Dorr, 1969 *apud* Nunes, 2016). O Grupo Itacolomi é restrito a uma área ao Sul de Ouro Preto, onde forma a serra de quartzitos do mesmo nome (Hasui *et al.*, 2012)

3.2 GEOMORFOLOGIA E PROCESSOS EROSIVOS

A região do Quadrilátero Ferrífero (QFe) foi palco de eventos extensionais e compressionais superpostos, responsáveis pela formação de megaestruturas, como sinclinais, anticlinais e megafalamentos, que têm papel destacado na evolução geomorfológica e na conformação do relevo atual. Essas amplas estruturas articuladas em sinclinais e anticlinais foram desmontadas pela erosão, desde o Cretáceo, que promoveu a inversão do relevo, com anticlinais correspondendo atualmente aos vales dissecados e as sinclinais situadas em posição elevada, cujas abas, sustentadas por litologias especiais do Supergrupo Minas, constituem muitos dos alinhamentos serranos que caracterizam a região (Carvalho Filho *et al.*, 2010).

Segundo Varajão (1991), no decorrer da evolução do relevo do Quadrilátero Ferrífero, ocorreu a formação de pequenas superfícies de erosão, que distribuídas em diferentes altitudes e exibindo um nítido controle litoestrutural, constituem uma paisagem ímpar, quando comparada aos padrões da região Sudeste do Brasil. Neste contexto, a erosão se dá de forma diferencial, onde os quartzitos e itabiritos constituem o substrato das terras altas, os xistos-filitos compreendem o substrato das terras de altitude mediana e as terras baixas estão moldadas sobre granitos-gnaisses (Hader e Chamberlim, 1915 *apud* Varajão *et al.*, 2009)

A região ainda apresenta vertentes côncavo-convexas, algumas alongadas e outras com o comprimento de rampa reduzido, caracterizada por elevada declividade e topos não coincidentes, com vários níveis altímetros. Essas características confirmam a ocorrência de erosão diferencial e/ou atuação de processos tectônicos na elaboração da geomorfologia da área (Paganin Neto, 2016).

Em face das características climáticas locais, marcadas por temperaturas amenas e índices pluviométricos moderados a elevados, a região é condicionada por processos intensos e constantes de intemperismo, que induzem uma contínua reconfiguração do relevo regional (Couto, 2015). Basicamente, a ação conjunta entre os fatores climáticos e a litologia resulta nas formações ferríferas de elevada concentração, responsáveis pelo nome da região.

Na literatura são apresentadas algumas teorias para o surgimento dos corpos lavráveis de minérios, dentre elas estão os processos hidrotermais, supergênicos e hipogênicos. Nos processos hidrotermais, os minérios de ferro são formados pela lixiviação da sílica e oxidação de minerais de ferro a partir da ascensão de águas quentes derivadas de magmas básicos. O enriquecimento supergênico ocorre pelo intemperismo químico que ocasiona a lixiviação de minerais ganga, como quartzo e carbonatos e reprecipitação de minerais de Ferro, como hematita e goethita. Já o enriquecimento hipogênico está relacionado ao processo de percolação de fluidos hidrotermais em zonas de fratura ou falha, causando a lixiviação de minerais e a reprecipitação de outros. (Dorr e Barbosa, 1963; Ribeiro, 2003; Souza, 2016).

Carvalho Filho *et al.* (2010) em uma avaliação global afirmam que na região do Quadrilátero Ferrífero predominam solos pouco evoluídos, com forte influência do material de origem em suas características. Os autores ainda concluem que ocorre uma preponderância geral dos processos erosivos sobre a pedogênese, condicionada tanto pelo relevo, em geral acidentado, como pela forte resistência ao intemperismo da maior parte das rochas regionais, ou pelo baixo recobrimento vegetal nas áreas sob campo e cerrado.

Portanto, os processos erosivos e de reformulação da paisagem do Quadrilátero Ferrífero são produto de uma série de variáveis, destacando-se o clima e a litologia como principais condicionantes deste fenômeno. Portanto, a abordagem da erodibilidade em taludes de corte da região do Quadrilátero Ferrífero deve ser pautada em suas características locais, principalmente pelo fato da erosão superar os processos pedogenéticos.

Neste contexto, torna-se necessário o estudo da erosão em solos adotando-se condições geomorfológicas e climáticas semelhantes, tornando-se viável estabelecer correlações sobre a erodibilidade a partir de uma mesma referência ambiental e espacial. Assim, o presente trabalho estuda a erodibilidade de solos em taludes de corte do Quadrilátero Ferrífero, considerando taludes conformados por dois horizontes de comportamento distintos em relação ao processo erosivo.

3.3 TALUDES DE REFERÊNCIA

Os taludes de corte foram escolhidos com base na exposição direta de dois horizontes distintos aos processos erosivos, de maneira que os comportamentos sejam diferenciados: um dos horizontes apresenta resistência e outro suscetibilidade a erosão. A partir de uma mesma referência espacial e ambiental, pode-se estudar as variáveis geotécnicas que tendem a condicionar o comportamento distinto entre os dois horizontes, associando a natureza específica do próprio solo.

Neste contexto, foram escolhidos 10 taludes de corte na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3.3), designados pelas iniciais da região na qual se localizam, como por exemplo: talude de Itabira (identificado por ITA).

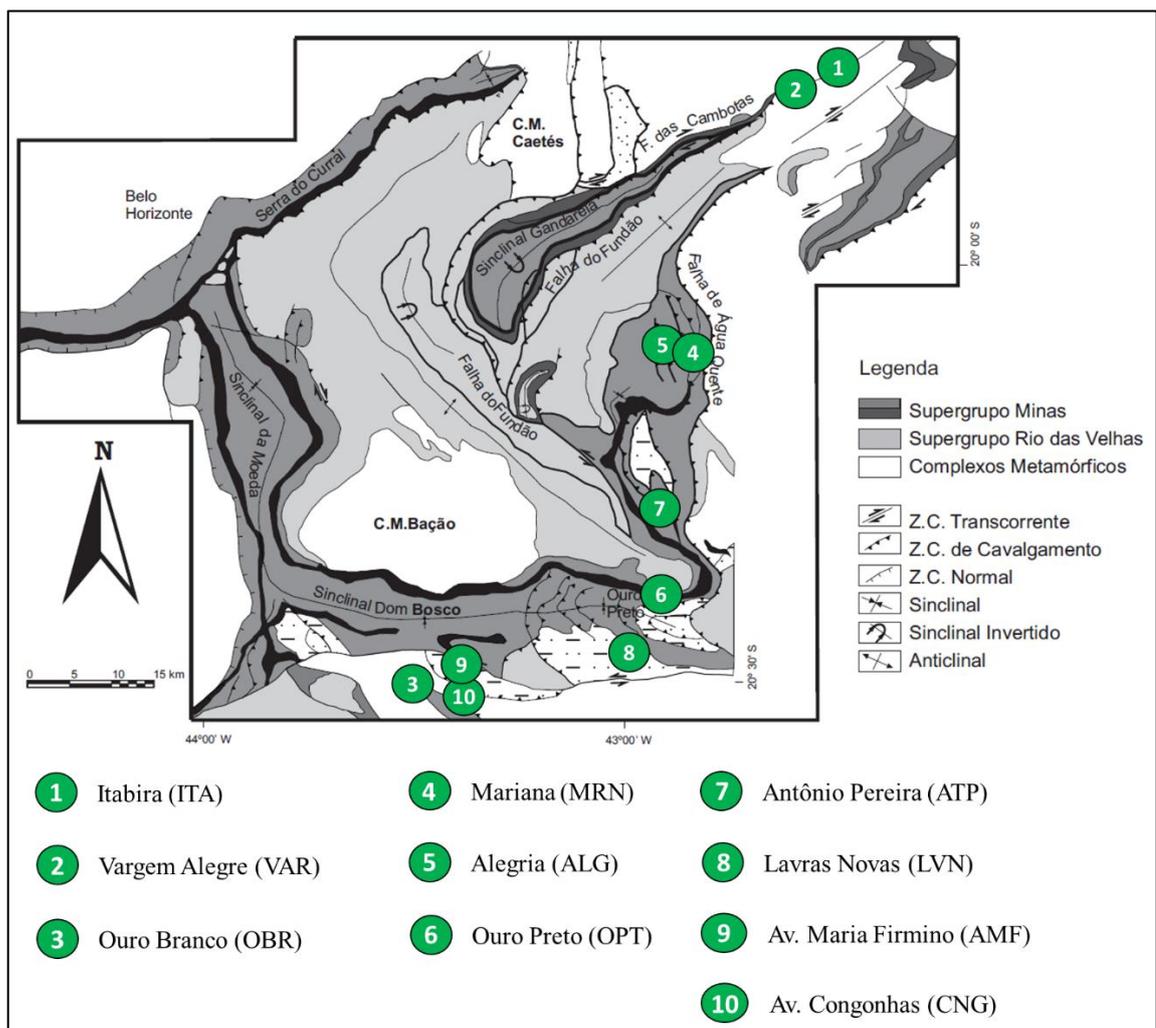


Figura 3.3 – Localização dos taludes amostrados no Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Adaptado de Costa, 2007).

Os pontos Itabira (ITA), Vargem Alegre (VAR), Ouro Branco (OBR) e Mariana (MRN) foram escolhidos utilizando como referência o trabalho desenvolvido por Couto (2015), que adotou critério semelhante na seleção de taludes. No entanto, o autor não abordou a amostragem em horizontes específicos, considerando o enfoque pedológico na investigação da erodibilidade dos solos, condição considerada neste estudo.

Nos subitens de 3.3.1 a 3.3.10 serão apresentadas as informações acerca dos taludes estudados. Anterior a coleta das amostras, foram realizados estudos de caracterização geológica, seguidos da descrição morfológica, segundo Santos *et. al* (2005), e a classificação dos solos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018).

De modo a deixar mais simples a referência a cada uma das amostras, foi adotado um critério para a simplificação da sua nomenclatura, onde os Horizontes Resistentes à erosão foram chamados de “Horizontes Superiores (HS)” e os horizontes erodíveis de “Horizontes Inferiores (HI)”, referindo-se ao seu posicionamento no talude estudado. Um Quadro resumo com as principais características de cada horizonte amostrado é apresentado no Apêndice A.

3.3.1 Talude Itabira (ITA)

O ponto localizado as margens da rodovia MG-129, próximo a localidade da Chapada dos Taneiros no município de Itabira – MG (Figura 3.4). Trata-se de talude de corte de aproximadamente 12 metros de altura, situado a meia vertente com inclinação próxima aos 80° (obs.: as inclinações indicadas serão em relação à horizontal).



Figura 3.4 – Talude localizado próximo ao município de Itabira-MG (ITA).

A parte superior se encontra preservada, enquanto que em sua parcela inferior são observados sulcos subparalelos com aprofundamento em direção a base. O talude é constituído por um solo residual de gnaiss dos complexos metamórficos de idade arqueana do Quadrilátero Ferrífero, que podem apresentar também inclusões anfíbolíticas, migmatitos e granitos de composições variadas, associadas a um amplo espectro de metamorfismo regional (Couto, 2015).

O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, apresentando horizonte transicional AB plano e horizonte B latossólico (Bw) espesso, com seccionamento vertical divididos em Bw1 e Bw2. O horizonte C e o saprolito também são profundos, constituindo a maior parte da superfície exposta (Figura 3.5).

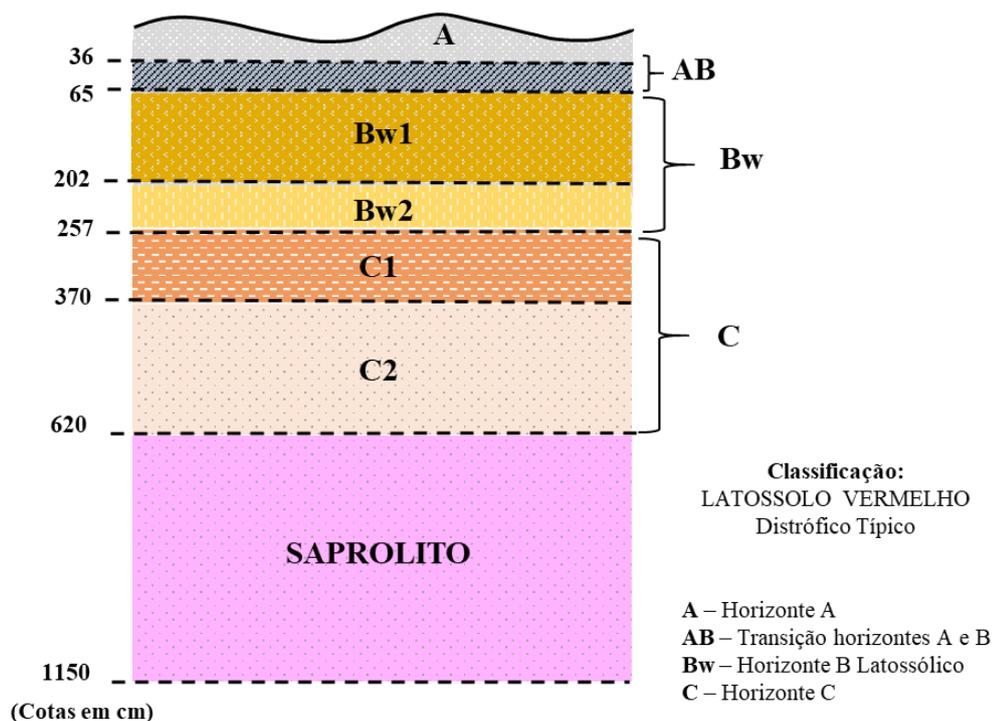


Figura 3.5 – Esquema do perfil pedológico do talude Itabira (ITA).

A amostra do material resistente foi retirada do Horizonte Bw1 e denominada ITAHS. A cor deste horizonte (seco) pelo sistema Munsell é 2,5YR 6/6, apresentando textura argilo-siltosa e estrutura em blocos pequenos e subangulares, de tamanho pequeno e grau moderado. Exibe consistência ligeiramente dura devido aos processos intempéricos que levam a concentração de óxidos de ferro e alumínio, além de possuir poros de diâmetro pequeno em média concentração e presença comum de raízes.

Do horizonte C2 foi retirada a amostra do solo erodível (denominado ITAHI), principalmente por ser nesta profundidade que se iniciam os processos erosivos, que se intensificam quando atingem a camada de saprolito inferior. A cor do horizonte (seco) pelo sistema Munsell é 2,5YR 5/8, apresentando textura franco argilosa, além de agregados com estrutura em blocos subangulares de tamanho médio e grau fraco. Sua consistência é muito macia quando seco e friável quando umedecido.

3.3.2 Vargem Alegre (VAR)

Trata-se de talude de, aproximadamente, 4 metros de altura e 70° de inclinação, localizado em estrada vicinal próximo ao trevo do município de Vargem Alegre- MG, nas proximidades das localidades de Una e Bamba (Figura 3.6). Apresenta processo erosivo evidente em sua porção inferior, com a formação de sulcos rasos, contínuos e generalizados (Couto, 2015).

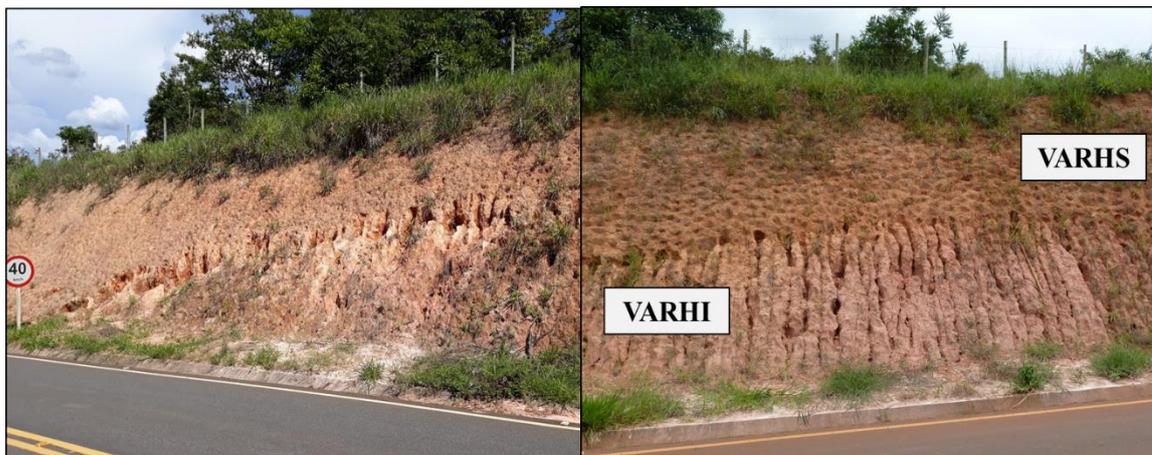


Figura 3.6 – Talude localizado próximo a comunidade de Vargem Alegre – MG.

O ponto em questão é formado por um solo residual de gnaiss granítico dos complexos metamórficos de idade arqueana do Quadrilátero Ferrífero com a presença de grânulos de caulim, quartzo e magnetita em frações milimétricas, disseminadas de forma esparsa em meio ao solo (Couto, 2015). O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, apresenta horizonte transicional AB de grande profundidade com horizonte B latossólico (Bw) espesso, desprovido de seccionamento vertical (Bw1, Bw2, etc.). O horizonte C é raso, porém com seccionamento vertical (Figura 3.7).

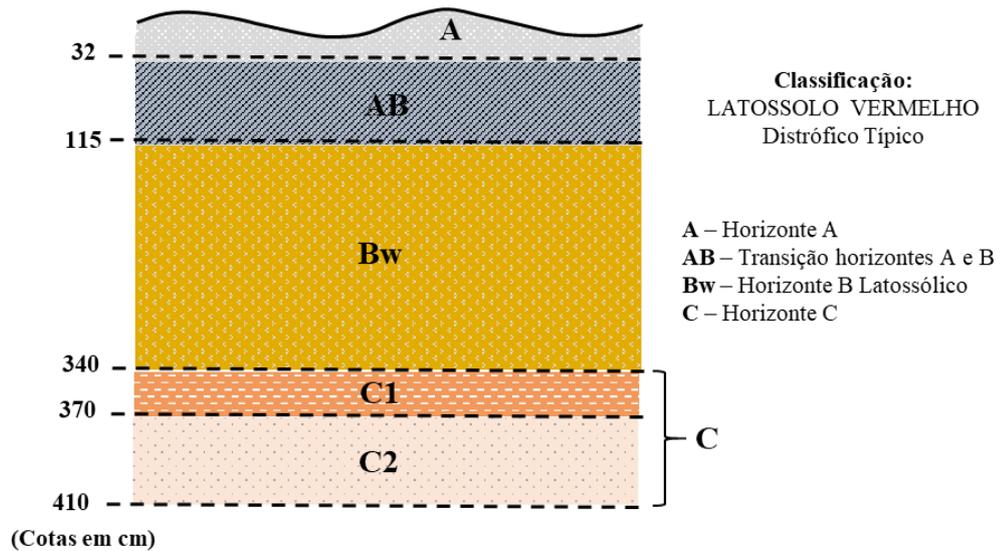


Figura 3.7 – Esquema do perfil pedológico do talude Vargem Alegre (VAR).

O horizonte B latossólico (Bw) foi escolhido para a retirada da amostra VARHS, pois se mostra conservado frente a ação erosiva. A cor deste horizonte (seco) pelo sistema Munsell é 2,5YR 5/8 (seco). Possui textura franco argilosa com estrutura em blocos subangulares, de tamanho pequeno e grau fraco. Exibe consistência macia quando seco e firme quando umedecido. Apresenta poros de diâmetro reduzido e em baixa quantidade, além de poucas raízes em seu meio.

A amostra erodível foi retirada do horizonte C2, pois neste ponto se encontram as feições erosivas mais evidentes, compondo a amostra VARHI. Pela classificação Munsell a cor é 2,5YR 7/8 (seco). Apresenta aumento nos teores de silte, sendo a textura classificada como argila siltosa. Possui estrutura em blocos angulares, de tamanho médio e grau fraco, exibindo consistência ligeiramente dura quando seco e firme quando umedecido. Apresenta também poros de diâmetro reduzido e em baixa quantidade.

3.3.3 Talude Ouro Branco (OBR)

Ponto de amostragem localizado na rodovia MG-443, próximo ao município de Ouro Branco no sentido da Rodovia BR-040. A porção superior apresenta-se conservada, devido ao elevado grau de intemperismo, enquanto sua porção inferior de coloração distinta se mostra degradada pela ação erosiva (Figura 3.8). O talude em questão apresenta cerca de 12 metros de altura, com forte inclinação, próximo aos 80°.



Figura 3.8 – Talude localizado próximo ao município de Ouro Branco (OBR).

O talude é conformado por solos residuais de xisto verde metassedimentar e metavulcânico, filito e formações ferríferas do Grupo Nova Lima. O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO acriférico típico, com horizonte A raso desprovido de horizonte transicional AB. Apresenta horizonte B latossólico (Bw) de grande espessura (cerca de 4m) com seccionamento vertical em Bw1 e Bw2. O horizonte C também é profundo e representa a maior parte do perfil exposto (Figura 3.9).

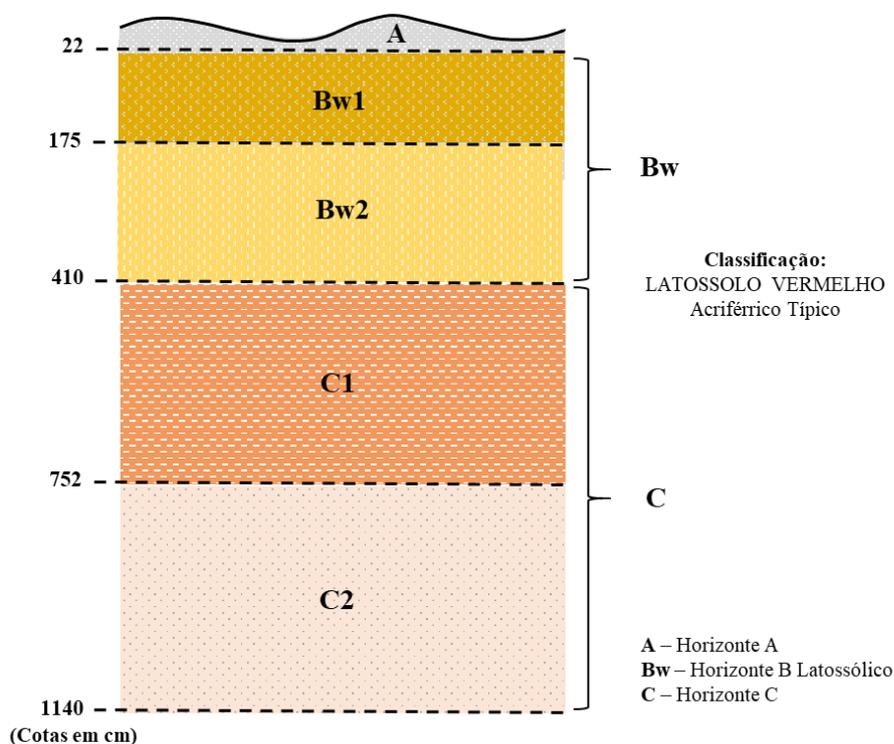


Figura 3.9 – Esquema do perfil pedológico do talude Ouro Branco (OBR).

A amostra resistente a erosão foi retirada do horizonte Bw2 e denominada OBRHS. Segundo o sistema Munsell sua cor é 2,5YR 4/8 (seco), apresentando textura franco arenosa e estrutura em blocos subangulares, de tamanho muito grande e grau moderado. Exibe consistência dura quando seco e firme quando umedecido. Dotado de poros de pequenos diâmetros e baixa concentração, possuindo também baixa densidade de raízes finas.

Do horizonte C1 foi retirada a amostra do material erodível, pois em sua interface com o horizonte Bw se inicia o processo de degradação. A cor deste horizonte é 2,5YR 4/8 (seco), apresentando textura argilo-arenosa, desprovido de agregados (sem estrutura). Exibe poros de tamanho muito pequeno e em baixa concentração.

3.3.4 Talude Mariana (MRN)

Talude localizado na Rodovia MG-129, no sentido de Mariana a Catas Altas (Figura 3.10). Apresenta processos erosivos avançados em sua porção inferior, principalmente pela grande faixa exposta desprovida de cobertura vegetal (Couto, 2015). As amostras foram coletadas na bancada superior, de aproximadamente 3,5 metros de altura e 60° de inclinação em relação à horizontal.



Figura 3.10 – Talude localizado em Mariana - MG (MRN).

O talude encontra-se subdividido em duas bancadas, sendo analisados os solos componentes da bancada superior, que possui horizonte superficial preservado do restante do maciço, em forte processo erosivo. A bancada inferior é conformada pelo

mesmo solo que constitui o horizonte inferior da camada superior. O maciço em questão está inserido na faixa transicional entre as unidades litoestratigráficas do Grupo Piracicaba e do Grupo Sabará, formadas por cloritas-xistos e filitos, no conjunto de falhas chamado Sistema da Água Quente (Couto, 2015).

O perfil é classificado pedologicamente como NEOSSOLO REGOLÍTICO distrófico típico. Apesar da bancada estudada possuir cerca de 4 metros de altura, o solo é extremamente raso, não chegando a 1 metro de espessura. Apresenta apenas horizonte A raso e horizonte C1, e abaixo encontra-se o substrato rochoso alterado (Figura 3.11)

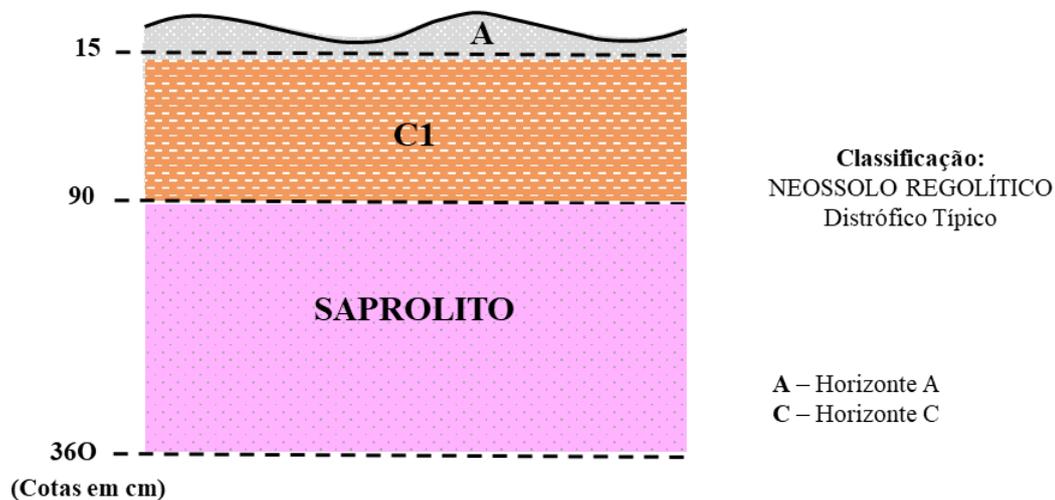


Figura 3.11 – Esquema do perfil pedológico do talude mariana (MRN).

A amostra resistente foi retirada do horizonte A e denominada MRNHS. Pelo sistema Munsell sua cor é 7,5YR 5/8 (seco), com textura de argila siltosa e estrutura em blocos angulares, de tamanho pequeno e grau fraco. Apresenta consistência macia quando seca e friável quando úmida. Possui poros de pequenas dimensões e em baixa concentração além de possuir baixa densidade de raízes.

A amostra erodível foi retirada do horizonte C1 em transição com o sapolito (MRNHI), por ser justamente neste contato onde se iniciam os processos erosivos. Sua cor pelo sistema Munsell é 10YR 8/4 (seco), com textura também de argila siltosa. Não apresenta estrutura de agregados evidente, com poros de pequenas dimensões e baixa concentração.

3.3.5 Talude Alegria (ALG)

Talude de 6 metros de altura, localizado as margens da rodovia MG-129, próximo à Mina de Alegria, no sentido Mariana a Catas Altas, dotado de forte inclinação (em torno de 75°). Apresenta uma camada superior de cor vermelho amarronzado, embora de pequena espessura, resistente aos processos erosivos. Sua porção inferior se encontra em processo erosivo por ravinamento, mais precisamente no contato entre o solo e o saprolito (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Talude próximo à mina de Alegria (ALG).

O ponto em questão se insere na faixa de transição entre as unidades litoestratigráficas do Grupo Piracicaba e do Grupo Sabará, pertencentes ao Supergrupo Minas, consistindo em um solo residual com origem nas rochas da Formação Fecho do Funil, formado por dolomitos, quartzitos e formações ferríferas.

O perfil é classificado pedologicamente como NEOSSOLO REGOLÍTICO distrófico típico. Exibe horizonte A de pequena espessura com presença de vegetação rasteira. O horizonte C é mais espesso quando comparado ao talude Mariana (MRN), apresentando seccionamento vertical em C1 e C2 (Figura 3.13).

A amostra resistente foi retirada do horizonte A e denominada ALGHS. Sua cor pelo sistema Munsell é 7,5YR 5/8 (seco), com textura de franco arenosa e muito pedregosa, além de estrutura em blocos subangulares, de tamanho médio e grau moderado. Apresenta consistência macia quando seca e friável quando úmida. Possui poros de pequenas dimensões e em baixa concentração além da presença comum de raízes devido a vegetação rasteira existente.

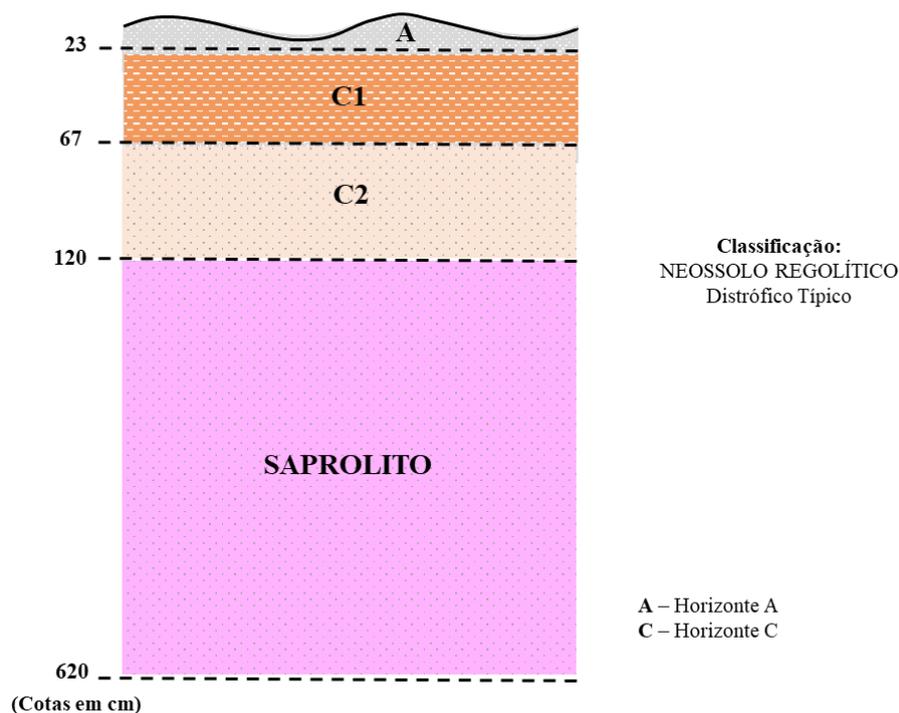


Figura 3.13 – Esquema do perfil pedológico do talude Alegria (ALG).

A amostra erodível foi retirado do horizonte C2 em transição com o saprolito e denominada ALGHI, pois é neste ponto que se inicia o processo de degradação. Sua cor pelo sistema Munsell é 2,5YR 6/8 (seco), com textura argila siltosa e estrutura em blocos angulares de tamanho pequeno e grau fraco. Apresenta consistência dura quando seco e firme quando friável. Apresenta poros de diâmetro médio em concentração também média.

3.3.6 Talude Ouro Preto (PTO)

O ponto em questão de localiza em um loteamento na Rodovia MG-129, no município de Ouro Preto – MG. Apresenta altura em torno de 6 metros e forte inclinação (próximo aos 80°). É composto por um material resistente em sua porção superior de cor amarelo ocre, enquanto sua porção inferior apresenta coloração diferenciada e degradação pelos processos erosivos (Figura 3.14).

O talude é composto por solo residual de filitos dolomitos, quartzitos e formações ferríferas da Formação Fecho do Funil (Grupo Piracicaba) pertencente ao Supergrupo Minas. O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO

distrófico típico (Figura 3.15). Exibe horizonte A de pequena espessura, com horizonte B latossólico (Bw) de grande profundidade. O horizonte C, apresenta seccionamento vertical até o terceiro nível (C1, C2 e C3).

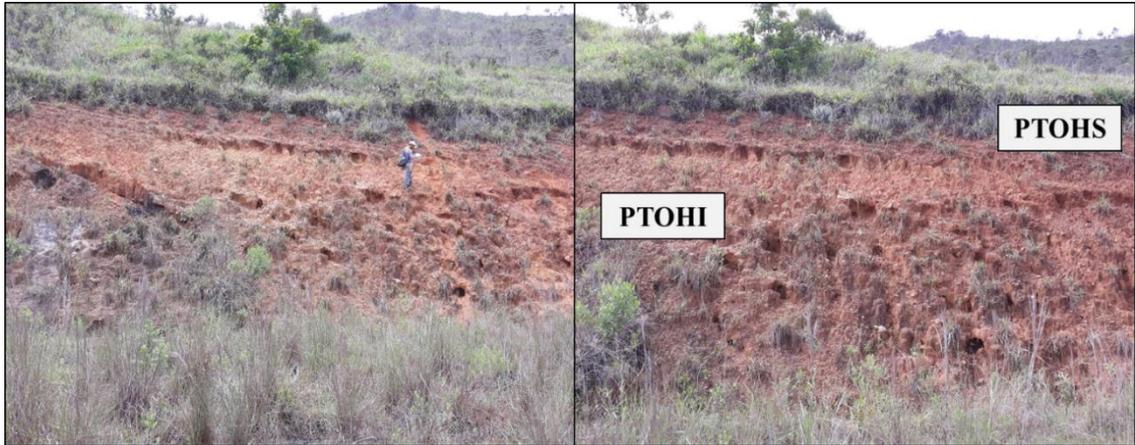


Figura 3.14 – Talude localizado no município de Ouro Preto (PTO).

A amostra resistente a erosão foi coletada no horizonte B latossólico (Bw2) e denominada PTOHS. Sua cor pelo sistema Munsell é 2,5YR 4/8 (seco), apresentando textura argilo-arenosa e estrutura em bloco subangulares de tamanho médio e grau forte. Possui consistência macia quando seco e friável quando umedecido. Sua porosidade é pequena, apresentando baixa concentração de poros ao longo do horizonte, onde a concentração de raízes é média.

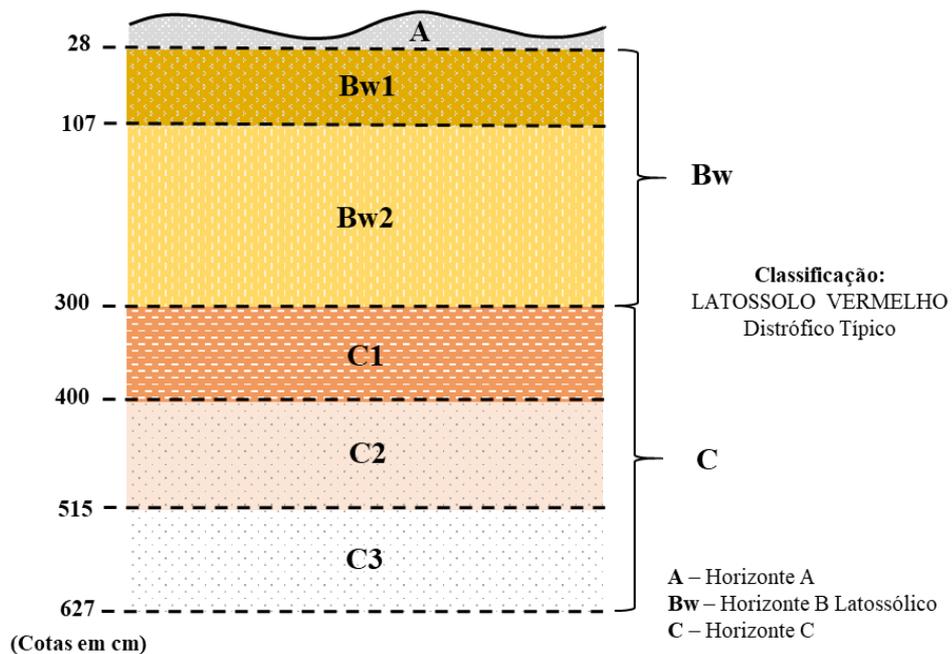


Figura 3.15 – Esquema do perfil pedológico do talude Ouro Preto (PTO).

Do horizonte C1 foi retirada a amostra erodível (PTOHI), por ser neste local onde ocorre forte degradação. Sua classificação pelo sistema Munsell é 2,5YR 5/6 (seco), com textura de argila desprovida de estrutura de agregação. Apresenta consistência macia quando seca e friável quando umedecido. A porosidade é muito pequena, com baixa concentração de poros.

3.3.7 Talude Antônio Pereira (ATP)

Talude de 8,5 metros de altura, localizado em terreno baldio as margens da rodovia MG-129, no distrito de Antônio Pereira no município de Ouro Preto –MG. A inclinação é variável ao longo do perfil, sendo de 60° em sua porção superior e aumentando até 80° em sua base. Apresenta parcela superior laterizada e com grande resistência ao processo erosivo, protegendo a camada subjacente, que, quando exposta, sofre ação da erosão (Figura 3.16).

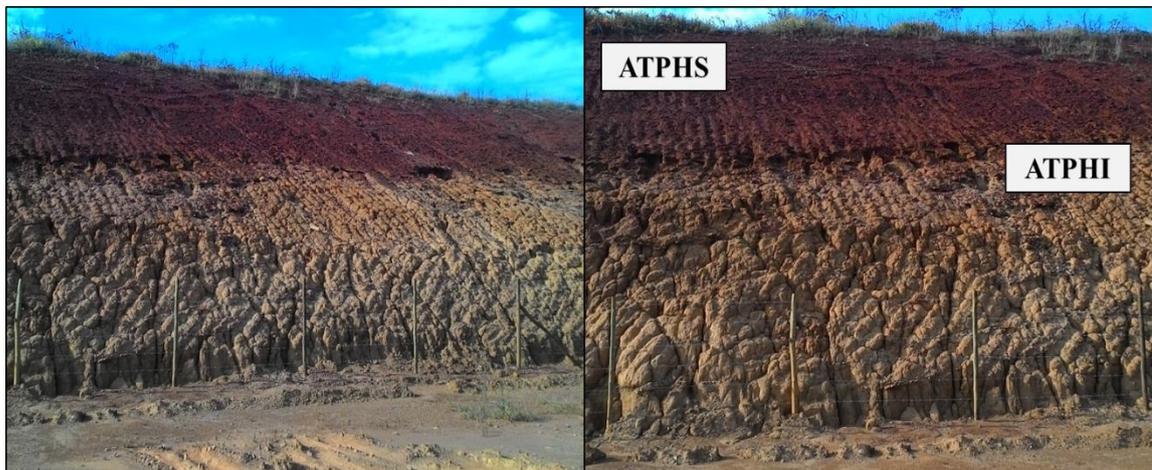


Figura 3.16 – Talude localizado no distrito de Antônio Pereira (ATP).

Trata-se de talude localizado em região de lateritas, bauxitas e detritos ferruginosos não cimentados do Neogeno – Pleistoceno – Holoceno, com coloração variando de vermelho muito escuro a marrom arroxeado. O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO Acriférrico típico. Exibe horizonte A de pequena espessura desprovido de camada transicional. Seu horizonte B latossólico (BW) é de grande profundidade, apresentando secionamento vertical em 7 níveis (Bw1 a Bw7). O horizonte C apresenta pequena profundidade (Figura 3.17).

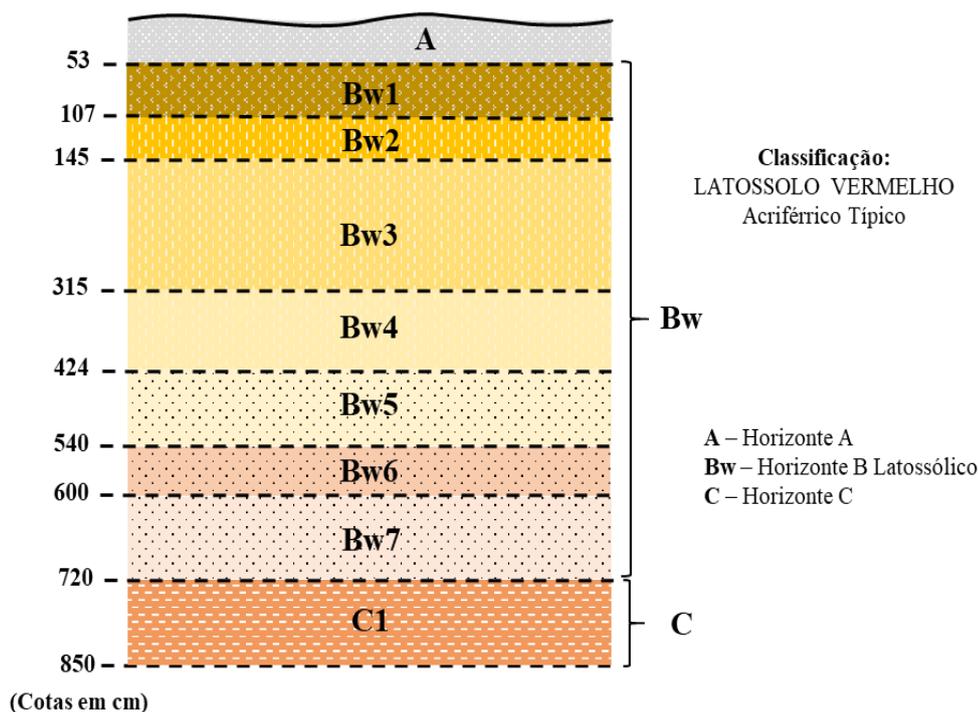


Figura 3.17 – Perfil Pedológico do talude Antônio Pereira (ATP).

Para análise do solo resistente, foi coletada amostra do horizonte B latossólico (Bw), mais precisamente na seção Bw3, por se mostrar mais resistente, denominada ATPHS. Sua cor segundo o sistema Munsell é 10R 3/6 (seco), apresentando textura franco arenosa e estrutura em blocos angulares, de tamanho médio e grau forte. Possui consistência dura quando seco e firme quando umedecido. Apresenta poros de pequeno diâmetro em baixa concentração.

A amostra erodível foi retirada do Horizonte C1 e denominada ATPHI, a escolha se justifica por ser neste ponto em que se inicia o processo erosivo. A cor deste horizonte é 5YR 4/6 (seco) pelo sistema Munsell. Sua textura é argila arenosa com estrutura em blocos angulares de tamanho médio e grau moderado. Possui consistência ligeiramente dura quando seco e firme quando umedecido. Apresenta poros de diâmetro muito pequeno e em baixa concentração.

3.3.8 Talude Lavras Novas (LVN)

O ponto em questão se localiza na estrada de acesso ao distrito de Lavras Novas, município de Ouro Preto – MG, distante cerca de 2 km da MG-129. Apresenta 2,5 metros de altura e inclinação próxima aos 70°. Sua parcela superior, resistente a erosão,

é composta por quartzo, mica branca e argilominerais, produtos da alteração da rocha mãe. Já sua parte inferior, em forte processo de solapamento, é composto por um material branco, arenoso e muito mal selecionado, que ainda preserva características da rocha parental, consistindo em um material homogêneo, friável e de baixa coesão (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Talude localizado no distrito de Lavras Novas (LVN).

O talude é constituído por solo residual de quartzitos e filitos do Grupo Itacolomi, Supergrupo Minas, de idade riaciana. O perfil é classificado pedologicamente como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, devido à presença do horizonte B incipiente (Bi), exibindo argilas de atividade baixa e saturação por bases inferior a 50%. Seu horizonte A é extremamente raso, com apenas 7 cm de espessura. O horizonte C é mais espesso, apresentando fragmentos de rocha preservadas com estrutura de mergulho (Figura 3.19).

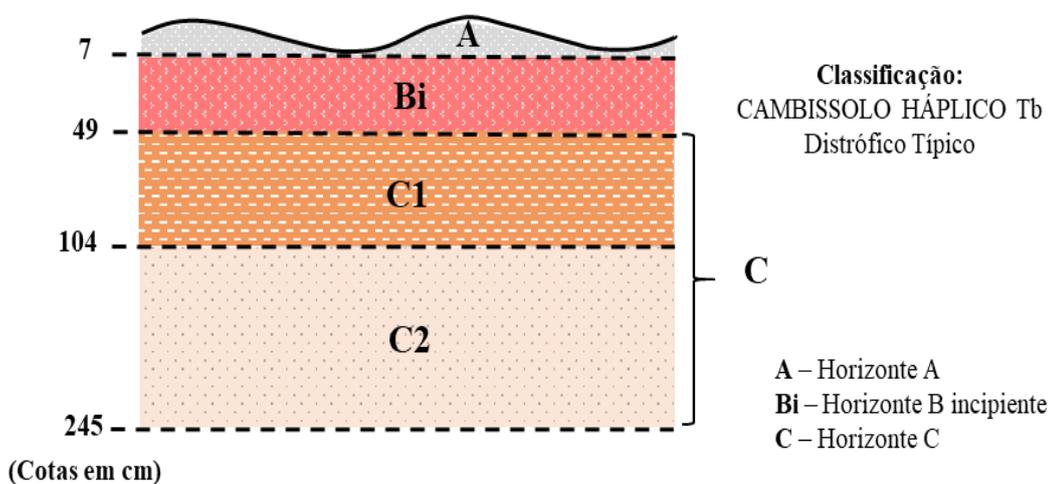


Figura 3.19 – Esquema do perfil pedológico do talude Lavras Novas (LVN).

A amostra do solo resistente a erosão foi retirada do horizonte B incipiente (Bi) e denominada LVNHS. Pelo sistema Munsell, sua cor é 7,5 YR 8/4 (seco), com textura franco arenosa e estrutura e blocos subangulares de tamanho médio e grau fraco. Apresenta consistência macia quando seco e muito friável quando úmido. Apresenta porosidade pequena em baixa concentração, com presença comum de raízes finas.

A amostra erodível foi retirada do horizonte C2 e denominada LVNHI, principalmente por ser a porção mais deteriorada, que apresenta sulcos de grandes dimensões. A cor deste horizonte pelo sistema Munsell é 7,5YR 8/1 (seco), com textura também franco-arenosa e estrutura maciça, de tamanho médio e grau fraco. Apresenta consistência macia quando seco e muito friável quando umedecido. Exibe porosidade pequena e em baixa concentração.

3.3.9 Talude Avenida Maria Firmino (AMF)

Talude localizado as margens da Avenida Maria Firmino, no município de Ouro Branco - MG, sentido rodovia MG 443. Apresenta, aproximadamente, 11 metros de altura, com forte inclinação chegando próximo aos 80° em sua base. Exibe material altamente intemperizado em sua porção superior com presença de vegetação rasteira. O processo erosivo tem início em sua porção mediana evoluindo para acelerada em sua base. (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Talude localizado na Avenida Maria Firmino, Ouro Branco-MG (AMF).

Trata-se de talude constituído por solo residual de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima de idade neoarquena do Supergrupo Rio das Velhas. O perfil é

classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico, com presença de horizonte A e BA relativamente espessos. Apresenta horizonte B latossólico (Bw) com grande profundidade, chegando ao terceiro nível de seccionamento (Bw3). O horizonte C é pouco espesso e desprovido de seccionamento vertical, seguido logo abaixo pelo saprolito (Figura 3.21).

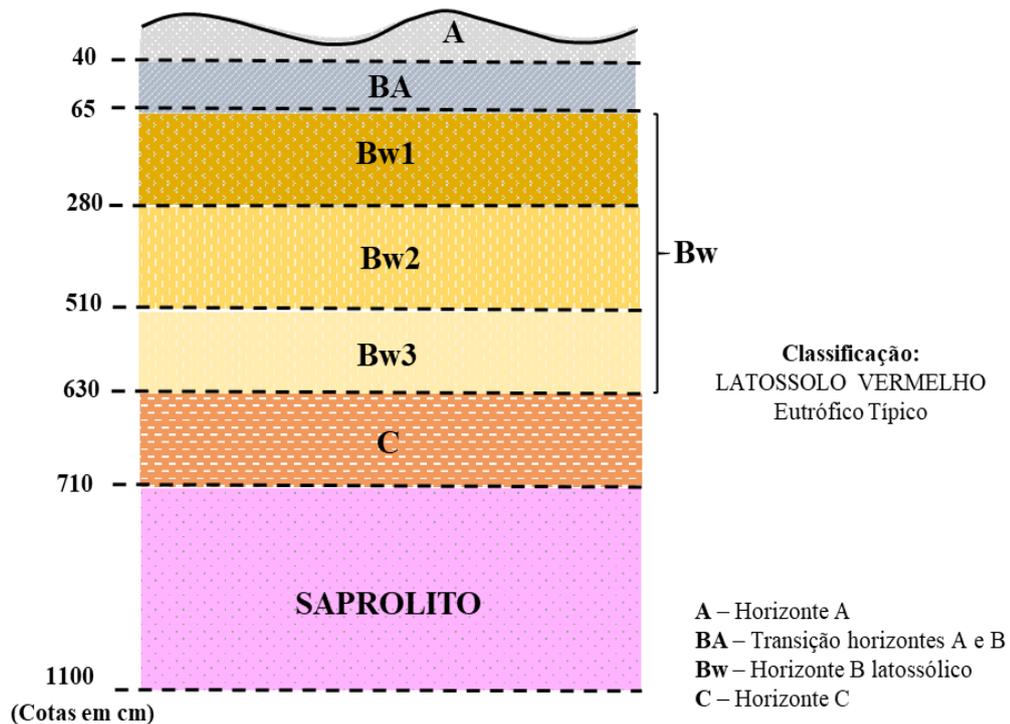


Figura 3.21 – Esquema perfil pedológico do talude da Avenida Maria Firmino (AMF).

A amostra resistente foi retirada do horizonte B latossólico (AMFHS), mais precisamente em Bw2, pois este horizonte se mantém conservado perante o processo erosivo. Pelo sistema Munsell sua cor é classificada como 2,5YR 4/8 (seco), apresentando textura de argila e estrutura em blocos subangulares, de tamanho grande e grau fraco. Possui consistência macia quando seco e friável quando umedecido. Apresenta poros de pequenos tamanhos em baixa concentração, com presença rara de raízes muito finas.

A amostra erodível foi retirada do horizonte C e chamada de AMFHI, pois em seu contato com o horizonte Bw3 é evidente o início da erosão que se estende até a base do talude. A cor deste horizonte pela classificação de Munsell é 2,5Y 5/8 (seco), com

textura argilo-arenosa e estrutura em blocos subangulares de tamanho pequeno e grau fraco. Apresenta textura macia quando seca e friável quando umedecido. Sua porosidade é pequena com concentração média dos poros ao longo do horizonte.

3.3.10 Talude Avenida Congonhas (CNG)

Trata-se de talude localizado em loteamento abandonado no município de Ouro Branco – MG, com acesso pelo Avenida Congonhas, próximo à rodovia MG-443. Sua porção superior exhibe maior grau de intemperismo, o que confere resistência a erosão. O mesmo não acontece em sua parcela inferior, com processo erosivo forte que avança para a parte a montante (Figura 3.22). O talude em questão apresenta 4 metros de altura e inclinação próxima aos 50°.

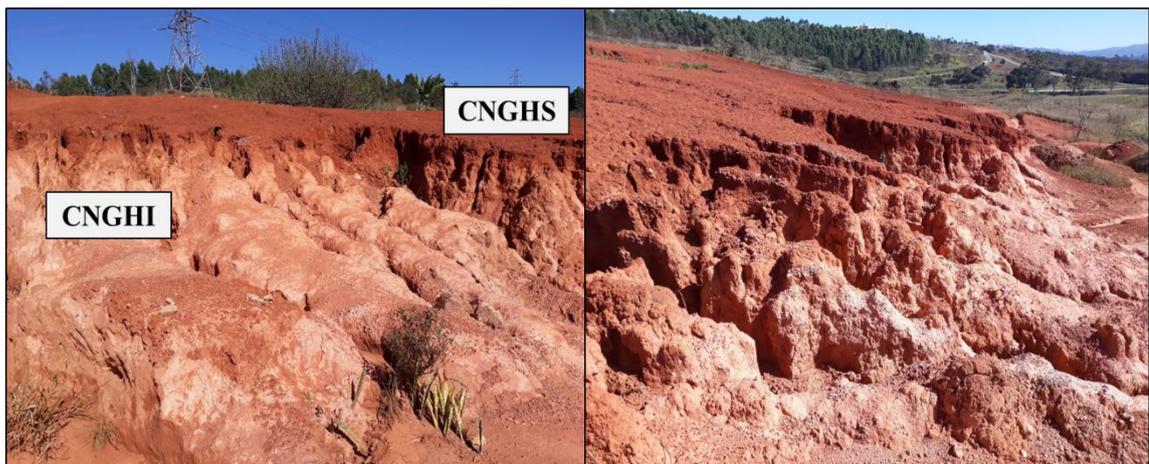


Figura 3.22 -Talude localizado na Avenida Congonhas, Ouro Branco-MG (CNG).

Talude constituído por solo residual de rochas anfibolíticas, incluindo talco, xisto e gnaisses bandados de idade paleoarqueana do complexo santo Antônio do Pirapetinga, Supergrupo Rio das velhas. O perfil é classificado pedologicamente como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico cambissólico, com presença de horizonte B latossólico (Bw) com grande profundidade, porém sem seccionamento evidente. O horizonte C é pouco espesso, seguido de saprolito (Figura 3.23).

A amostra resistente a erosão foi coletada no horizonte B latossólico (Bw), denominada CNGHS. Sua cor pela classificação Munsell é 2,5YR 3/6 (seco), com textura argilo-arenosa e estrutura em blocos subangulares de tamanho médio e grau fraco. Apresenta

consistência macia quando seco e friável quando umedecido. Sua porosidade é muito pequena exibindo baixa densidade de poros. Exibe raízes muito finas em baixa (pouca) concentração.

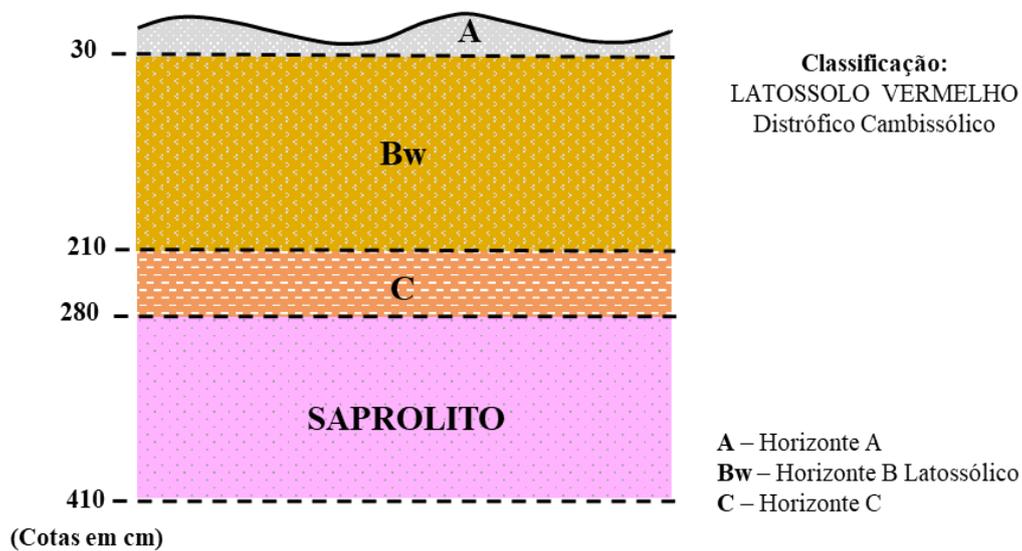


Figura 3.23 – Esquema do perfil pedológico do talude da Avenida Congonhas (CNG).

A amostra erodível foi retirada do horizonte C e denominada CNGHI, principalmente pelo fato do avanço do processo erosivo ocorrer na interface entre este horizonte e o saprolito. Pelo sistema Munsell apresenta cor 2,5YR 7/6 (seco) com textura argilo-arenosa desprovida de estrutura em seus agregados. Possui consistência macia quando seco e muito friável quando umedecido. Sua porosidade é muito pequena exibindo baixa densidade de poros.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO E CAMPO

Visando estudar as características de cada horizonte, responsáveis pelas respostas antagônicas em uma mesma referência espacial, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, além da realização de ensaios “*in situ*”, para estudo das propriedades que condicionariam estes materiais a resistência ou a suscetibilidade aos processos erosivos. Esta seção se dedica a apresentação dos procedimentos metodológicos utilizados em laboratório e campo.

4.1 ETAPA DE CAMPO

A etapa de campo contemplou a realização de inspeções para caracterização dos pontos amostrados acerca da geologia regional e material de origem, relevo, vegetação, conservação e/ou intensidade do processo erosivo instalado (Figura 4.1). Além disso, também foram realizados os estudos para a classificação dos horizontes de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018), conforme apresentado no Capítulo 3; posteriormente, foram definidos os horizontes para coleta de amostras, considerando a suscetibilidade ou resistência aos processos erosivos.



Figura 4.1 – Inspeções de campo.

4.2 AMOSTRAGEM

Para caracterização dos diferentes horizontes estudados, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de acordo com o estabelecido pela norma NBR 9604 (ABNT, 2016a). Posteriormente foram encaminhadas para o Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA-NUGEO) da Escola de Minas da UFOP, para a realização dos ensaios de caracterização geotécnica, física, química e da metodologia MCT.

As amostras deformadas foram coletadas em diversos pontos em um mesmo horizonte, de modo a se obter uma amostra representativa de todo o material exposto. As amostras foram retiradas em um mesmo dia e em sequência direta, tanto do horizonte resistente como do horizonte suscetível à erosão, evitando-se assim variações ocasionadas pelas condições climáticas. Após este procedimento as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e devidamente identificadas.

As amostras indeformadas foram coletadas por meio da moldagem de um corpo cúbico, com aproximadamente 0,30 m de aresta, após a limpeza superficial do terreno e remoção da vegetação (Figura 4.2). Para preservação das condições naturais, foi aplicada uma camada de parafina líquida e, em seguida, envolveram-se as faces expostas com tecido (talagarça).



Figura 4.2 – Coleta de amostras indeformadas.

É importante ressaltar a dificuldade na retirada das amostras, principalmente indeformadas, devido à proximidade de rodovias de tráfego intenso (Figura 4.1), além da forte inclinação em alguns taludes, acarretando em morosidade para a moldagem dos blocos e sua retirada.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física contempla os ensaios de análise granulométrica, limites de consistência (liquidez e plasticidade), massa específica real dos grãos do solo, massa específica aparente e a determinação da estabilidade de agregados. Para a realização dos ensaios citados, foram realizados os procedimentos de preparação de amostras conforme o estabelecido pela NBR 6457 (ABNT, 2016b).

A análise granulométrica foi realizada pelos métodos conjunto de peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016d). O ensaio de sedimentação foi realizado em duas condições: a primeira utilizando solução defloculante de hexametáfosfato de sódio ($\text{NaPO}_3)_6$ e a segunda apenas com água (Figura 4.3). A classificação das frações foi realizada conforme a escala definida na NBR 6502 (ABNT, 1995).

Ainda considerando a análise granulométrica com e sem o uso de defloculante foi determinada a relação de dispersão segundo o *Soil Conservation Service – SCS*, também chamada de Dispersão SCS. O intuito deste ensaio é determinar a dispersão das partículas com diâmetro inferior a 0,05 mm, sendo o procedimento normatizado no Brasil pela NBR 13602 (ABNT, 1996).

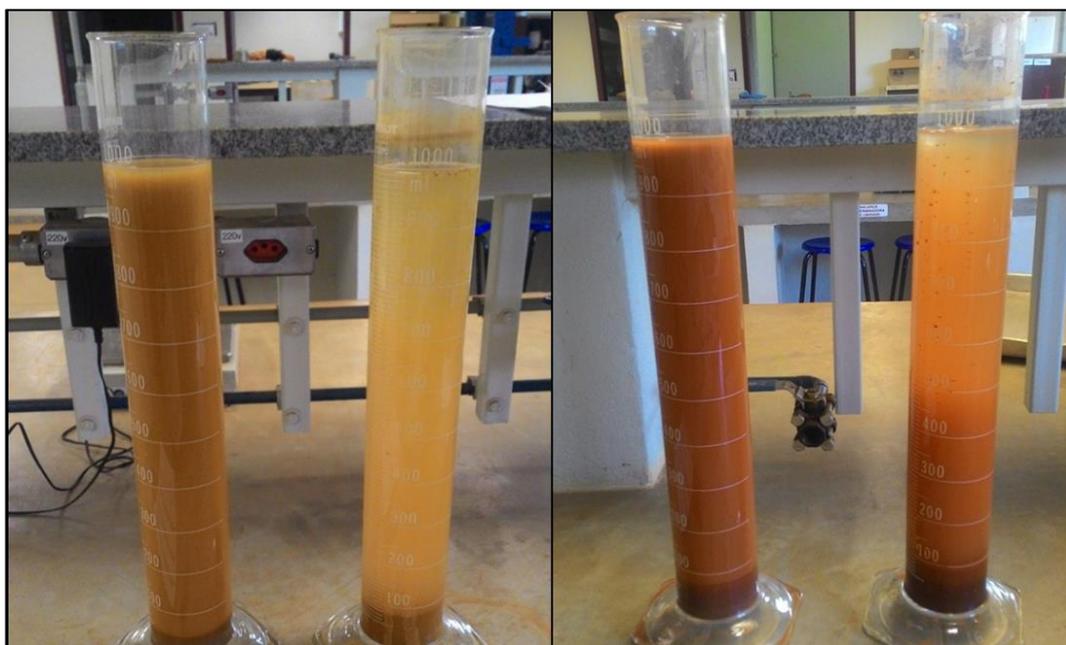


Figura 4.3 – Análise granulométrica realizada com e sem o uso de defloculante químico.

Para a determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, foi utilizado procedimento interno do laboratório de mecânica dos solos do CTGA-UFOP, com uso de balança hidrostática. Neste método, talha-se um corpo de prova de diâmetro médio de 5 cm, a partir de uma amostra indeformada, em seguida procede-se a imersão desta amostra em uma bacia com parafina em banho maria, de maneira a parafinar toda a superfície da amostra. Posteriormente, a amostra parafinada é fixada na parte inferior de uma balança e imersa totalmente em água, obtendo sua massa submersa. A massa específica aparente é determinada considerando-se as massas do corpo de prova, do corpo de prova parafinado, e do corpo de prova parafinado imerso em água.

O ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos do solo foi realizado pelo método do picnômetro, respeitando os procedimentos da NBR 6458 (ABNT, 2016c). Os limites de consistência (liquidez e plasticidade) foram obtidos em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela NBR 6459 (ABNT, 2016e) e pela NBR 7180 (ABNT, 2016f).

A agregação do solo foi investigada pelo ensaio de estabilidade de agregados, utilizando o método padrão de Yoder (1936) e as alterações propostas por Grohmann (1960), conforme descritos no Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017). A metodologia avalia a estabilidade de agregados compreendidos entre 2 e 4 mm, considerados essenciais na estruturação e resistência do solo (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Preparação dos agregados com umedecimento prévio e execução do ensaio com peneiramento via úmida.

O ensaio se baseia na quantificação do volume de solo em classes de tamanho de agregados de amostras naturais, por peneiramento via seca, e após a exposição de amostra pré-umedecida a um fluxo turbulento de água, em peneiramento via úmida (Figura 4.4). Posteriormente são determinados os diâmetros médios ponderados (DMP) e geométricos (DMG), por via seca e úmida, para o cálculo do índice de estabilidade dos agregados (IEA). A preparação e o ensaio de estabilidade de agregados foram realizados no Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO.

4.4 MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

As curvas de retenção de água foram determinadas pelo método do papel filtro, seguindo os procedimentos e recomendações da norma internacional D5298 – 16 (ASTM, 2016), utilizando para tal o papel-filtro tipo Whatman nº 42. Dentre as principais vantagens da utilização do método destaca-se o baixo custo e a capacidade de cobrir uma ampla faixa de sucção.

O método consiste em colocar o papel filtro em contato com a amostra em determinado teor de umidade, assim como o solo, o papel filtro se constitui em um meio poroso, de maneira que a água irá fluir para o papel até o momento em que o sistema entre em equilíbrio. O estado de equilíbrio de pressão entre o papel e a amostra permite determinar a sucção do solo (Bastos, 1999; Bonder, 2008; Menezes, 2010).

As amostras foram coletadas em anéis biselados ($\phi = 50$ mm e $h = 30$ mm) e previamente saturadas por capilaridade em período de 48 horas, posteriormente foram submetidas ao efeito de secagem ao ar, até atingir saturação próximo a valores pré-estabelecidos (variando de 100 a 5%), de maneira a considerar ampla faixa de umidade (Figura 4.5). Após a obtenção das saturações requeridas, o conjunto papel-filtro amostra foi embalado em filme plástico e vedado com fita adesiva e em seguida acondicionado em ambiente isolante, por um período mínimo de 15 dias, se tornando possível a determinação da sucção matricial (ψ_m). Foram realizadas oito determinações para cada solo, sendo utilizados dois corpos de prova em cada determinação. Entre as duas amostras foram utilizadas três folhas de papel filtro, dois em contato direto com o solo e o terceiro entre estes dois últimos, evitando a contaminação do papel-filtro.



Figura 4.5 – Preparação das amostras para determinação da curva de retenção.

A sucção matricial (ψ_m) é determinada pelo teor de umidade do papel-filtro (w_f), de acordo com a norma D5298 – 16 (ASTM, 2016):

$$w_f \leq 45,3 \rightarrow \psi_m = 5,327 - 0,0779 \cdot w_f \quad (3.1)$$

$$w_f > 45,3 \rightarrow \psi_m = 2,412 - 0,0135 \cdot w_f \quad (3.2)$$

Onde: ψ_m é a sucção mátrica ($\text{Log}_{10}\text{kPa}$); w_f teor de umidade do papel filtro após o período de equilíbrio (%). A pesagem do papel-filtro foi realizada em balança analítica com resolução de 0,0001 g.

A partir do teor de umidade e da sucção matricial, foram determinadas as curvas de retenção por meio do programa SWRC (*Soil Water Retention Curve*), considerando os modelos desenvolvidos por Brooks e Corey (1964); van Genuchten (1980); Fredlund e Xing (1994) e Durner (1994). Para determinação da curva de retenção, foi escolhido o modelo com melhor coeficiente de ajuste segundo o software SWRC (Seki, 2007).

Devido à morosidade nas execuções dos ensaios, foram escolhidos três taludes, de maneira que cada um representa uma das classes de solos abordadas neste estudo. Portanto, foram escolhidos: o talude Itabira (ITA) como latossolo, Mariana (MRN) como neossolo e Lavras Novas (LVN) como cambissolo. Desta forma, é possível obter, de modo estimado, os valores de sucção e umidade correspondentes para os horizontes resistentes e suscetíveis a erosão em cada tipo de solo.

4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na literatura tem-se dado maior ênfase aos estudos de correlação entre a erodibilidade dos solos e suas propriedades físicas, principalmente granulometria, massa específica e estabilidade de agregados, porém atributos químicos, como a matéria orgânica e o pH, desempenham papel fundamental na resistência dos solos à erosão. Vale ressaltar, que parâmetros químicos também podem ser utilizados na investigação do grau de intemperismo, podendo-se estender essa abordagem a lixiviação e a degradação química de solos.

A caracterização química dos solos foi feita de forma complementar pela análise química da fração terra fina seca ao ar (TFSA) e da fluorescência de raios x. A fluorescência de raios x visa a quantificação de óxidos majoritários que compõe a estrutura do material, sendo assim, é uma mensuração dos óxidos que compõe as partículas do solo em questão. Já a análise da TFSA, utilizada em frações do solo de diâmetro inferior a 2 mm, quantifica elementos disponíveis em menor concentração, acidez, dentre outros parâmetros.

Para análise da TFSA as amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de abertura igual a 2,0 mm, sendo posteriormente encaminhadas e analisadas no Laboratório de Análise de Solo, Tecido vegetal e Fertilizantes do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Foram realizadas as seguintes determinações: pH em H₂O; pH em KCl; teores de sódio trocável (Na), potássio trocável (K), cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e alumínio (Al⁺³); acidez potencial (H + Al); soma de bases trocáveis (SB); Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (CTC_e); Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 (CTC_t); índice de saturação por bases (V%); matéria orgânica (MO). As determinações acima foram realizadas de acordo com os métodos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017).

A fluorescência de raios x foi realizada no Laboratório de Análises Químicas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET –MG), visando a determinação dos óxidos majoritários: SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, K₂O e MnO de material passante na peneira de n° 200 (abertura igual 0,075 mm). Para composição da amostra,

foram retiradas porções significativas de cerca de 200g, previamente homogeneizadas, sendo utilizado processo de cominuição (moinho de sílica), para redução do diâmetro das partículas, até que todo o material passasse pela peneira de abertura de 0,075 mm. Para a análise foi empregado um espectrofotômetro de fluorescência de raios x da Marca *RayNy Shimadzu* Modelo EDX-720, utilizado com ar atmosférico e colimador de 10 mm.

Para a visualização do arranjo estrutural das amostras foi executado ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Materiais de Construção do CEFET/MG. O ensaio foi executado em amostras de solo “in natura” sem processo de destorroamento e em baixo vácuo, previamente secas ao ar e posteriormente observadas em aumentos de 500 e 1.000 x. A microscopia foi realizada em microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi e modelo TM 300, com zoom digital 2x e 4x e detector BSE (*backscattered electron* – elétrons retro espalhados)

4.6 ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT

4.6.1 Classificação MCT convencional

Para a determinação dos grupos da classificação MCT, as amostras foram submetidas aos ensaios de compactação mini-MCV e de perda de massa por imersão, conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas DNER-ME 258 – Solo: compactação em equipamento miniatura (Brasil, 1994b) e DNER-ME 256 – Solos: compactação em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão (Brasil, 1994a).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentos do CTGA/NUGEO da Universidade Federal de Ouro Preto. Primeiramente procedeu-se a secagem das amostras ao ar e posterior destorroamento, sendo separadas em cinco porções de 500 g cada e homogeneizadas em diferentes teores de umidades, para realização dos ensaios de compactação Mini – MCV, obtendo-se o coeficiente c' (Figura 4.6 A). Após a aplicação das séries de golpes, os corpos de provas são deslocados para fora do cilindro, de maneira a deixar 10 mm da amostra exposta, e, em seguida foram imersões em água por 24 horas, para a determinação da perda de massa (Figura 4.6 B). Após a realização do ensaio de perda de massa por imersão, os solos eventualmente despendidos são secos em estufa e pesados, obtendo-se assim os coeficientes d' e e' .

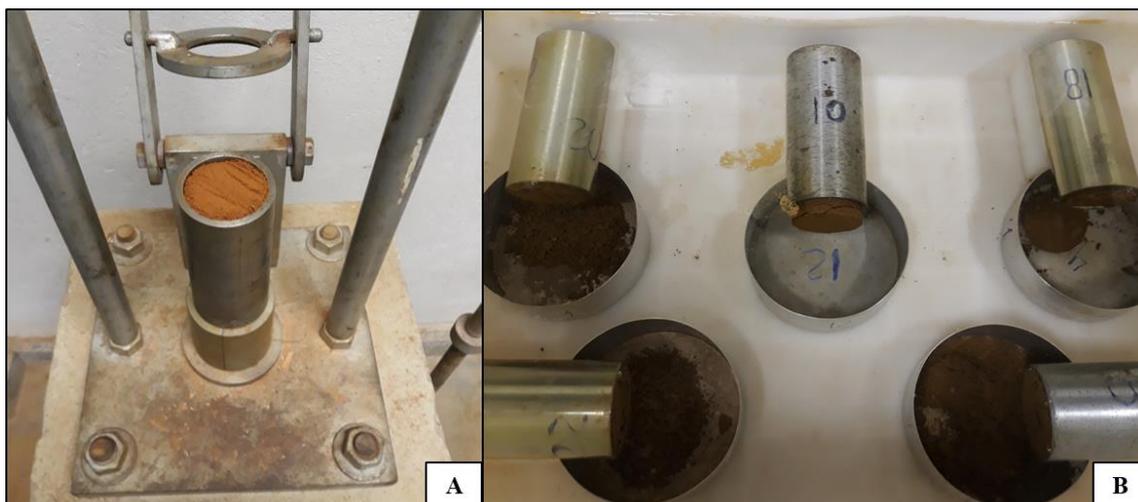


Figura 4.6 – Ensaios da metodologia MCT: A) ensaio de compactação mini-MCV; B) ensaio de perda de massa por imersão.

4.6.2 Método expedito das pastilhas

Em complemento aos ensaios da Metodologia MCT convencional foram executados ensaios da classificação expedita pelo método das pastilhas. Neste contexto foram utilizados os equipamentos e os procedimentos desenvolvidos e adaptados por Godoy e Bernucci (2002).

As principais mudanças em relação ao originalmente proposto e de suas versões anteriores se referem a modificação no tamanho da pastilha (35 mm de diâmetro e 10 mm de altura), avaliação do comportamento da pastilha sem o anel de confinamento e avaliação da resistência a penetração por diferentes cones, dentre eles o uso de cone de 60° ao invés de agulha de base cilíndrica na moldagem da amostra.

Primeiramente é separada uma porção de cerca de 100 gramas de solo, procedendo sua secagem em estufa com capacidade de 60° C e com sistema de exaustão por 4 horas a fim de reduzir a umidade natural do solo. Em seguida, o material é destorroado e passado na peneira de nº 40 (abertura igual a 0,425 mm), consistindo na porção a ser utilizada no ensaio. A porção separada é pré-umedecida com água destilada e permanece em repouso por cerca de 12 horas.

Após o período de repouso, o material é colocado sobre uma placa de vidro fosco e espatulado de forma intensa e continuamente por cerca de 8 minutos, no intuito de

desfazer os agregados existentes e homogeneizar o material. Findado este processo, o solo espaturado é colocado no anel de moldagem (35mm x 10mm) e submetido a penetração de um cone de 60° de abertura e 60 gramas de peso. A umidade de moldagem corresponde a condição na qual ocorrer penetração de 5 mm.

Com a determinação da umidade de moldagem, são montadas duas pastilhas nos anéis citados anteriormente, com auxílio de espátula ou dos dedos (Figura 4.7 A). O solo excedente superior é rasado com o auxílio de um fio de nylon muito fino. As pastilhas na umidade de moldagem são pesadas e colocadas em estufa a uma temperatura de 60°, por um período de 6 horas. Com o material restante são confeccionadas duas esferas de, aproximadamente, 17 mm de diâmetro e acondicionadas em capsulas de alumínio, que também são encaminhadas a estufa de 60° por 6 horas (Figura 4.7 B)

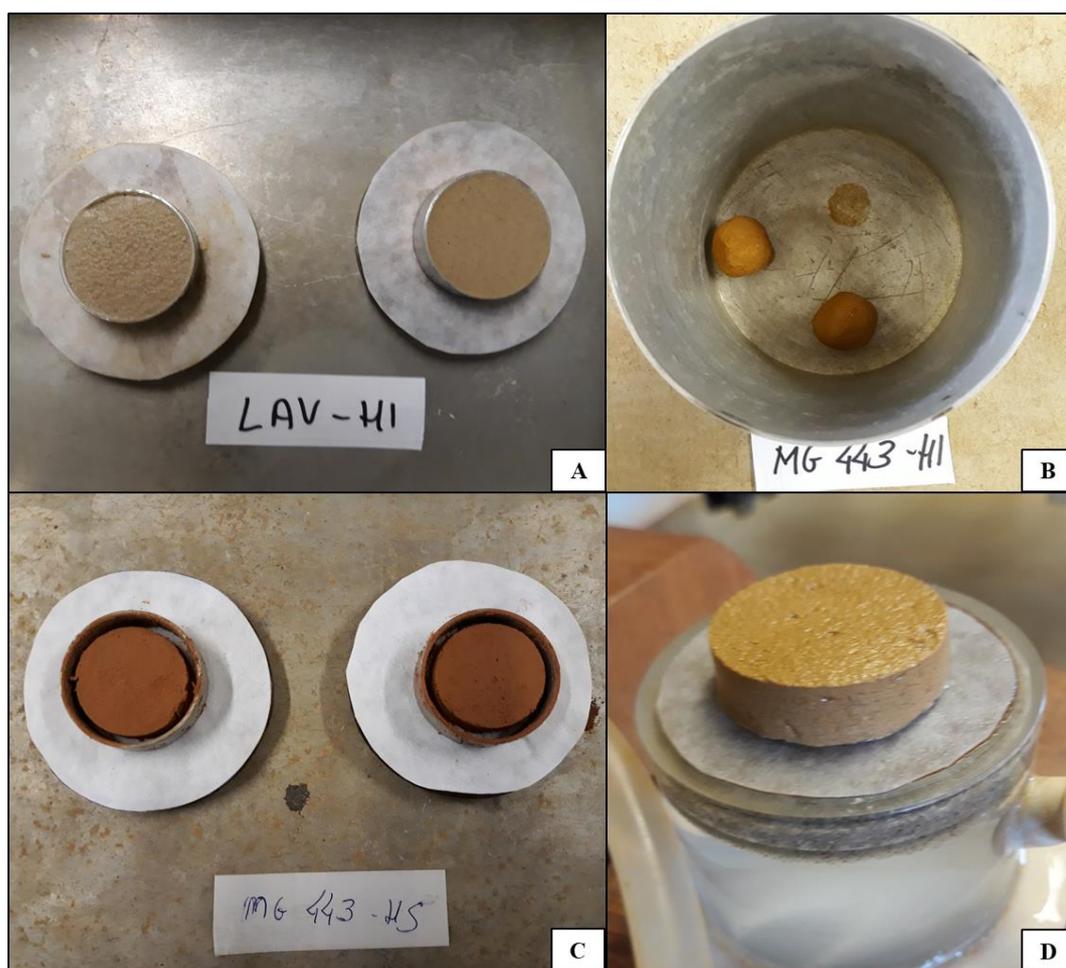


Figura 4.7 – Procedimento do método das pastilhas: A) Moldagem das pastilhas nos anéis; B) confecção das esferas; C) Contração diametral após período em estufa; D) Pastilha (sem o anel) colocada em pedra porosa para reabsorção de água. (obs.: A amostra MG 443 corresponde a amostra PTO).

Após a secagem, as pastilhas são pesadas e, em seguida determina-se a contração diametral da pastilha com o auxílio de um paquímetro (Figura 4.7 C), realizando 3 leituras igualmente espaçadas ao redor da pastilha, sendo considerado aceitável um desvio de até 0,2 mm entre as leituras. A pastilha seca (sem o anel) é colocada sobre uma placa porosa saturada de água e recoberta por um papel filtro, permanecendo neste ambiente por 3 horas (Figura 4.7 D).

Durante a reabsorção de água é avaliado o tempo de ascensão, ou seja, tempo para umedecimento da amostra. Decorrido o período de 3 horas, é determinado, com auxílio de paquímetro, o inchamento diametral e são feitas observações acerca do aparecimento de trincas e do inchamento (Figura 4.8 A).

Com as pastilhas umedecidas após a reabsorção de água são realizadas as avaliações com cones de 60° de abertura e com pesos de 10 e 30 gramas. Primeiramente, utiliza-se o cone 10 de gramas e anota-se a profundidade de penetração e, em sequência, utiliza-se o mesmo procedimento para o cone de 30 gramas (Figura 4.8 B). Em conjunto, também é calculada a quantidade de água reabsorvida pela pastilha quando colocada na pedra porosa, por meio da determinação da umidade da pastilha após a reabsorção.

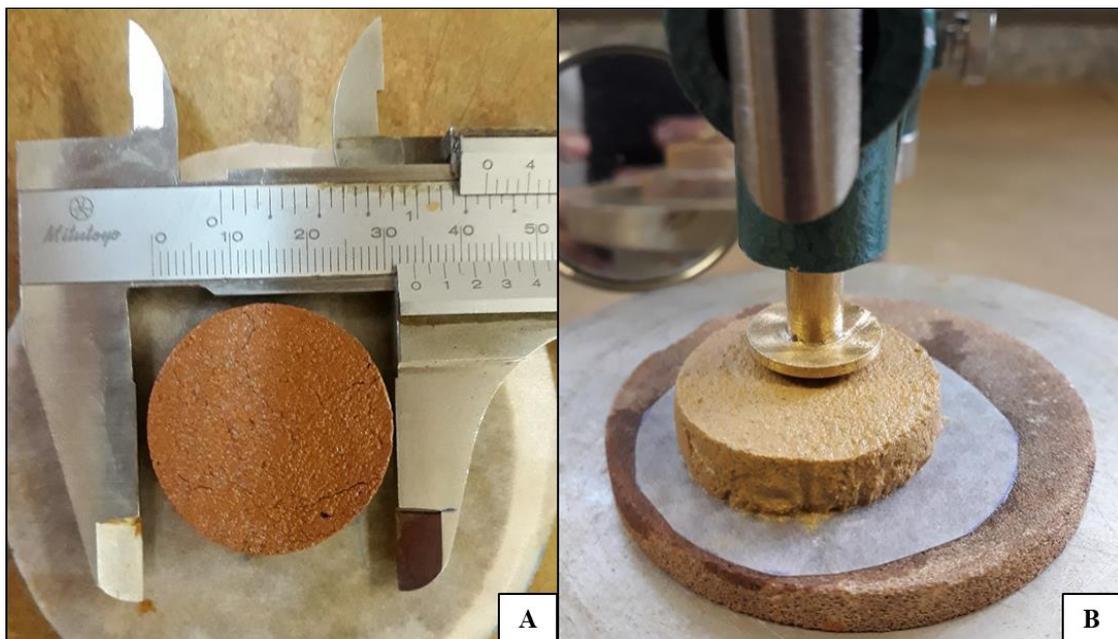


Figura 4.8 – Procedimentos do método das pastilhas: A) Determinação do inchamento diametral, com detalhe das trincas existentes; B) Penetração utilizando cone de abertura 60° e 10 gramas.

As esferas moldadas são submetidas a dois testes: resistência ao esmagamento e imersão em água. A resistência ao esmagamento é feita de maneira qualitativa, por meio de um dos três esforços seguintes: ruptura entre os dedos polegar e indicador, ruptura entre o polegar e uma superfície rígida, ou não há ruptura. O segundo ensaio consiste na imersão da outra esfera em um recipiente com cerca de 50 ml de água, onde é avaliado o tempo de interação e o produto final. O tempo máximo de interação é de no máximo 2 horas e 30 minutos, enquanto que no produto final são observados a formação de: a) pastas; b) partículas; c) blocos milimétricos ou d) não ocorre alteração. Após a sequência de todos os ensaios descritos é realizada a classificação expedita, de acordo com o guia classificatório (Tabela 2.2).

4.6.3 Critério de erodibilidade MCT (P_{iM}/s)

O critério desenvolvido por Nogami e Villibor (1979) é fundamentado em dois parâmetros: a) a perda de massa por imersão modificada (P_{iM}) da metodologia convencional e b) o coeficiente de sorção (s) determinação pelo ensaio de infiltrabilidade.

O ensaio de infiltrabilidade visa identificar a velocidade da ascensão capilar em amostras de solo (Bastos, 1999). Neste ensaio, são coletadas amostras indeformadas em anéis biselados de PVC (50 mm de diâmetro e 25 mm de altura), que posteriormente são colocados sobre uma pedra porosa, conectada a uma bureta graduada. A base da amostra coincide com o nível do tubo capilar, de maneira que a entrada de água do solo ocorre unicamente pelo processo de ascensão capilar (Figura 4.9 A). Por meio de régua graduada e cronômetro, são registradas as distâncias percorridas em intervalos de tempo em ordem quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 49, etc.), em minutos. A partir da distância percorrida no tubo capilar (em cm) e da raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$) é possível definir uma curva (distância percorrida x $\text{tempo}^{1/2}$) que tem comportamento tipicamente bilinear, com forte trecho retilíneo inicial, seguido por estabilização horizontal. O coeficiente de sorção (s) é calculado pela inclinação do trecho retilíneo inicial.

O ensaio de perda de massa por imersão modificado é determinado a partir de amostras indeformadas, coletadas em anéis biselados de PVC (50 mm de diâmetro e 50 mm de altura) que posteriormente são imersos em água para avaliação do potencial de desagregação (Figura 4.9 B).

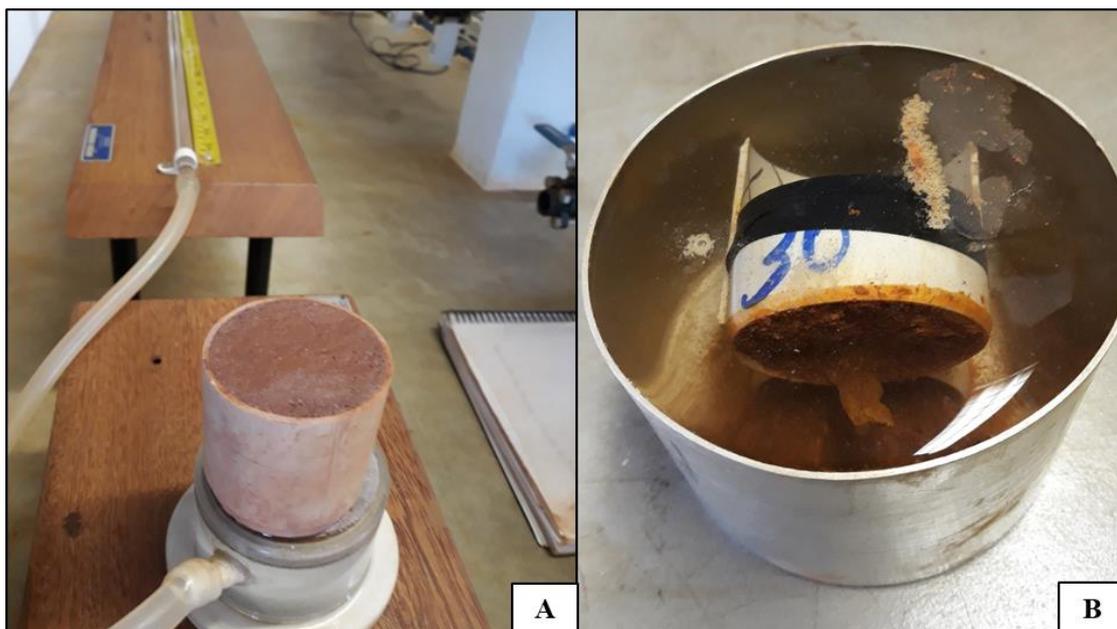


Figura 4.9 – Critério de erodibilidade MCT A) Ensaio de infiltrabilidade; B) Ensaio de perda de massa por imersão modificado.

No presente estudo, foram realizados os ensaios de perda de massa modificado e infiltrabilidade em duas condições distintas: em umidade natural e secar ao ar por 72 horas, dessa forma pode-se avaliar a resposta dos solos frente a erosão baseados em diferentes condições iniciais.

4.7 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA “*IN SITU*”

Em diversos trabalhos, consolida-se a ideia de uma relação específica entre a suscetibilidade aos processos erosivos e a resistência ao cisalhamento, principalmente por esta última estar relacionada as propriedades que conferem a agregação e estrutura ao solo. Segundo Bender (1985, *apud* Iori *et al.*, 2012) a erodibilidade é problema específico de resistência ao cisalhamento, função da coesão das partículas do solo na superfície, alterada pela infiltração de água durante um evento chuvoso.

Apesar de diversos estudos abordarem a relação entre erodibilidade e resistência ao cisalhamento, não existe consenso acerca do melhor método, sendo que esta determinação é feita a partir de diversas metodologias. Dentre os métodos existentes, são mais utilizados: ensaios de *Vane*, ensaios de cone de laboratório, compressão não confinada, cisalhamento direto e ensaios triaxiais. A maioria destas metodologias envolve a coleta de amostras indeformadas e a realização de testes em laboratório, tornando-se uma

limitação na investigação da erodibilidade, visto as perturbações existentes, principalmente pela presença de raízes e de frações de maior diâmetro que distorcem os valores e dificultam a repetibilidade dos ensaios.

Segundo Bryan (2000), o ensaio de Vane, utilizado no solo “*in situ*”, é considerado o mais adequado para o estudo de solos potencialmente erodíveis, principalmente pela repetibilidade e minimização das perturbações existentes quando se utilizam amostras indeformadas. No entanto, sua limitação se deve ao fato de que o ensaio deve ser realizado justamente na camada de solo correspondente a superfície crítica de erosão. Além desta limitação, a inserção da palheta anula a superfície de selagem de alguns solos, que confere resistência ao processo erosivo.

Neste cenário, o presente estudo utiliza o ensaio de *vane* “*in situ*” para mensurar a resistência ao cisalhamento dos horizontes amostrados. De maneira a considerar o efeito da selagem das camadas superficiais, foi utilizado um penetrômetro de bolso para avaliação da resistência desta fina camada e de sua importância na conservação ou suscetibilidade aos processos erosivos.

A resistência ao cisalhamento foi determinada com uso de mini *vane test* (mini ensaio de palheta), o qual consiste na inserção de uma palheta cruciforme e posteriormente na determinação do torque necessário para cisalhar o material pela rotação de sua haste. Foi utilizado um mini *vane test* Humboldt H-4227, com capacidade de determinação de resistência ao cisalhamento ao torque de 0 a 260 kPa, suficientes para avaliação das camadas superficiais nos horizontes estudados, com uma profundidade de 5 cm (Figura 4.10). Desta forma, torna-se possível buscar uma relação entre a resistência e a suscetibilidade aos processos erosivos, onde baixos valores poderiam indicar uma maior tendência à erosão.

O penetrômetro de bolso utilizado foi o modelo Humboldt H-4200, com capacidade de medir a resistência a penetração entre 0 e 450 kPa, mediante uma cravação de 6,35 mm, conforme (Figura 4.11). O intuito da utilização deste equipamento é mensurar a resistência superficial do solo frente ao impacto das gotas de chuva, fenômeno considerado como início do processo erosivo e que não pode ser avaliado pela inserção da palheta do ensaio de *vane*.



Figura 4.10 – Ensaio de mini Vane. A) Detalhes do equipamento utilizado; B) aplicação da metodologia no campo.



Figura 4.11 – Penetrômetro de bolso utilizado. A) Detalhes do equipamento; B) aplicação da metodologia no campo.

Considerando esta abordagem foram executados ensaios com o penetrômetro de duas maneiras distintas: a) em superfície natural; e b) após a remoção de cerca de 2 cm do material superficial. Com esta abordagem é possível verificar o decréscimo de resistência do horizonte estudado após a remoção da camada de selagem superficial.

Em conjunto, também foi determinada a umidade média do solo a cada ponto ensaiado, por meio de coleta de material com uso de estufa em laboratório. De modo a se obter resultados expressivos para os ensaios do penetrômetro de bolso e mini *vane test*, foram realizadas 10 repetições, igualmente espaçadas, ao longo de cada um dos horizontes.

O *Vane test* é comumente utilizado em campo para a determinação da resistência não drenada em solos saturados (S_U), devido principalmente a rapidez na execução do ensaio que impede a expulsão de água, gerando pressões positivas. Entretanto, neste estudo, as resistências foram determinadas considerando a umidade natural, ou seja, em condições não saturadas. Neste contexto, embora o ensaio seja rápido, a condição continua sendo drenada, principalmente pela fase ar ser contínua no interior do maciço, dificilmente gerando pressões positivas. Desta forma, o vane test foi utilizado para verificação da resistência in situ (denominada aqui por " S_I "), com respectivas determinações do teor de umidade para avaliação da interferência da sucção atuante nos valores obtidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, química, metodologia MCT e os métodos de estimativa da resistência ao cisalhamento “*in situ*”. Para tal, foram estudados os comportamentos de 20 amostras coletadas em diferentes horizontes, conforme descrição apresentada no Capítulo 3.

5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A primeira propriedade avaliada consiste na análise granulométrica dos horizontes, considerada primordial na determinação de características e comportamentos específicos dos solos. A Tabela 5.1 apresenta os percentuais encontrados para as frações pedregulho (P), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF), silte (S) e argila (A).

Uma primeira constatação se refere ao percentual de argila, que se mostrou maior nos horizontes resistentes a erosão, apresentando-se, em alguns casos, muitas vezes superior ao horizonte erodível. Segundo vários autores, existem correlações negativas entre a erodibilidade e altos teores de argila ($< 0,002$ mm), uma vez que esta fração se relaciona a maior estabilidade dos agregados do solo, a distribuição de poros e a sucção atuante, aumentando a resistência aos impactos ocasionados pelas gotas de chuva (Wischmeier e Mannering, 1969; Silva *et al.*, 1999; Lima e Andrade, 2001; Cassol *et al.*, 2018)

Os horizontes erodíveis apresentam tendência de maior percentual da fração silte, a exceção dos pontos MRN e AMF. Vários estudos realizados na determinação de erodibilidade em solos de clima temperado associam os elevados percentuais de silte a suscetibilidade aos processos erosivos, destacando a metodologia clássica do nomograma desenvolvido por Wischmeier e Smith (1971). Esta afirmação se baseia na baixa propriedade ligante da fração silte na formação e estabilidade dos agregados do solo, em conjunto com a concentração de poros de menores dimensões, conferindo baixa resistência a erosão.

Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica e relações de dispersão dos solos estudados.

Horizonte	Granulometria CD (NBR 6502/1995)						Dispersão SCS (NBR 13602/1996)			Razão de Dispersão		
	P (%)	AG (%)	AM (%)	AF (%)	S (%)	A (%)	Argila (< 0,005 mm) SD (%)	Argila (< 0,005 mm) CD (%)	% Dispersão	Argila + Silte (< 0,05 mm) SD (%)	Argila + Silte (< 0,05 mm) CD (%)	Relação de Dispersão (%)
ITAHS	0,2	1,4	4,0	18,5	12,4	63,5	0,0	71,2	0	16,1	75,9	21
ITAH I	8,1	4,4	8,6	23,9	47,6	7,4	0,0	12,4	0	43,4	51,6	84
VARHS	1,1	0,7	4,7	11,5	26,2	55,8	0,0	65,5	0	37,0	80,5	46
VARHI	0,4	1,1	5,0	25,8	60,7	7,0	0,0	14,0	0	57,5	65,7	88
OBRHS	0,4	4,3	3,3	7,0	17,7	67,3	2,0	77,5	3	11,0	80,8	14
OBRHI	0,6	1,2	3,4	3,4	83,8	7,6	0,0	11,0	0	50,4	90,2	56
MRNHS	1,2	2,8	2,5	14,7	56,3	22,5	10,1	29,5	34	63,8	76,4	84
MRNHI	0,1	3,4	17,5	27,4	44,8	6,8	0,0	7,8	0	43,2	49,3	88
ALGHS	14,4	6,8	7,2	8,5	36,3	26,8	3,5	33,7	10	44,1	61,9	71
ALGHI	0,1	4,3	18,6	28,9	42,5	5,6	0,0	10,5	0	34,3	46,1	74
PTOHS	4,2	4,9	6,9	18,6	20,2	45,2	0,0	52,4	0	27,5	63,0	44
PTOHI	7,6	6,1	9,4	31,3	32,2	13,4	0,0	26,6	0	33,2	45,8	72
ATPHS	1,2	5,2	11,8	8,0	10,0	63,8	4,4	70,8	34	17,1	73,5	23
ATPH I	7,1	2,8	7,4	39,7	33,0	10,0	6,0	16,3	37	27,7	41,5	67
LVNHS	1,5	8,6	18,9	30,3	16,7	24,0	0,0	25,8	0	21,5	42,8	50
LVNHI	1,0	10,7	21,8	31,7	26,3	8,5	0,0	8,4	0	23,1	32,1	72
AMFHS	2,9	1,9	7,0	6,8	10,8	70,6	0,0	77,3	0	27,5	80,2	34
AMFHI	2,6	12,7	25,6	10,2	13,3	35,6	0,0	40,7	0	20,4	44,3	46
CNGHS	0,7	3,4	8,8	7,0	7,6	72,5	0,0	78,6	0	14,5	79,5	18
CNGHI	3,5	4,7	10,8	27,7	37,8	15,5	0,0	27,8	0	38,5	52,3	74

Onde: P = Pedregulho; AG = Areia grossa; AM = A. média; AF = A. fina; S = Silte; A = Argila (< 0,002mm); CD = Com defloculante; SD = Sem defloculante.

Entretanto, apesar do aumento do percentual de silte estar relacionado a erosão em solos de clima temperado, o mesmo não pode ser afirmado para solos oriundos de clima tropical, principalmente, considerando latossolos. Neste contexto, vários autores têm relatado dificuldades da aplicação destes métodos em condições tropicais, particularmente devido a heterogeneidade e as variações texturais existentes nesta classe de solos (El-Swaify e Dangler, 1977; Lima *et al.*, 1990; Silva *et al.*, 1999). Neste contexto, têm-se o horizonte superior do solo MRN, que apresenta percentual elevado da fração silte e mesmo assim se mostra resistente ao processo erosivo. Desta forma, pode-se fazer a seguinte constatação: a granulometria analisada como fator isolado não é responsável pelo início ou resistência à erosão.

A Tabela 5. 1 ainda mostra os resultados da sedimentação comparativa *do Soil Conservation Service* (SCS), com e sem o uso de defloculante, realizados para a fração argila (inferior a 0,005 mm). Observa-se, mais uma vez, o maior percentual da fração argila nos horizontes superiores, e o grau elevado de agregação das partículas finas, devido à ausência da fração argila nos ensaios sem aditivo defloculante. Considerando o percentual de dispersão, razão entre a argila dispersa em água e com aditivo defloculante, observa-se baixa aplicação para a maioria das amostras estudadas. A exceção ocorre nas amostras do solo ATP, porém o grau de dispersão é baixo, uma vez que SCS considera erodíveis os solos com percentual de dispersão superior a 40 %.

Ainda considerando a Tabela 5.1, foi calculada a razão de dispersão (RD), conforme o estabelecido por Middleton (1930), determinada pela razão entre a soma das frações silte e argila sob condições de dispersão com e sem o uso de defloculante. Segundo o proposto pelo autor, solos com $RD > 15\%$ seriam considerados erodíveis, limite este que não permite uma distinção clara entre os horizontes resistentes e erodíveis abordados neste estudo. Entretanto, é possível verificar a discrepância dos valores de RD entre os horizontes resistentes e erodíveis, principalmente quando analisados os Latossolos. Nos taludes de natureza não laterítica (MRN e ALG), esta razão apresenta limitação, visto que tanto os horizontes resistentes e erodíveis apresentaram valores similares, corroborando, mais uma vez, para o fato de que a granulometria tratada isoladamente não é parâmetro condicionante da suscetibilidade à erosão

A Tabela 5.2 exibe os valores de alguns dos índices físicos do solo, destacando-se o peso específico aparente do solo (γ), peso específico das partículas do solo (γ_s), teor de umidade natural (w), grau de saturação (S) índice de vazios (e) e porosidade natural.

Tabela 5.2 – Índice físicos dos horizontes estudados.

Horizonte	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	S (%)	e	n (%)
ITAHS	13,44	27,06	5,11	12,75	1,105	52,49
ITAHI	13,28	26,26	1,11	2,97	0,999	49,97
VARHS	14,29	26,41	5,47	15,53	0,948	48,67
VARHI	14,51	25,07	1,49	5,07	0,751	42,89
OBRHS	15,28	27,82	5,31	16,42	0,917	47,84
OBRHI	13,95	27,07	3,40	9,32	1,006	50,15
MRNHS	10,94	28,72	3,51	7,26	1,415	58,59
MRNHI	17,11	27,22	1,43	6,46	0,614	38,04
ALGHS	16,81	27,24	10,02	44,17	0,630	38,65
ALGHI	17,30	26,40	4,40	19,93	0,594	37,26
PTOHS	18,12	28,21	20,43	67,15	0,875	46,67
PTOHI	15,97	27,34	8,58	27,84	0,859	46,21
ATPHS	16,87	29,97	19,09	52,30	1,115	52,72
ATPHI	21,58	31,31	14,48	69,92	0,661	39,80
LVNHS	17,13	26,76	5,34	19,53	0,746	42,73
LVNHI	18,96	26,36	0,15	1,03	0,392	28,16
AMFHS	15,42	26,60	16,50	44,30	1,010	50,25
AMFHI	17,23	27,04	17,88	65,70	0,750	42,86
CNGHS	14,91	27,82	15,32	37,71	1,152	53,53
CNGHI	15,60	26,02	13,17	39,33	0,888	47,03

O índice de vazios (e) exerce influência expressiva no comportamento dos solos frente a erosão, principalmente por se relacionar diretamente a estrutura e compactação, interferindo na porosidade, permitindo a infiltração de água e reduzindo significativamente o escoamento superficial, responsável pela erosão em sulcos. Desta forma, os maiores índices de vazios se encontram nos horizontes superiores, ao passo que em alguns horizontes erodíveis (como LVNHI) os valores foram baixos, indicando maior microporosidade e sua associação ao processo erosivo.

A amostra OBRHS se apresenta como exceção, exibindo menor índice de vazios quando comparada ao horizonte erodível (OBRHI). Isto se deve a estrutura, que apresenta tamanho grande (“torrões” de maiores dimensões), conformada principalmente pela

interação da matriz argilosa com partículas de areia fina que quando agregadas desta forma exibem estrutura compacta e, conseqüentemente, densidade elevada. Da mesma forma, o valor do índice de vazios para PTOHS se deve a uma sobreposição de efeitos, visto que este horizonte apresenta baixa porosidade e índice de vazios, associados ao elevado peso específico das partículas do solo (γ_s) e a alta umidade natural (20 %).

Ainda considerando o índice de vazios (e) é importante destacar os baixos valores encontrados para os horizontes inferiores dos solos MRN, ALG e LVN, fato que ocorre por se tratarem de solos em transição com o saprolito subjacente, que preservam feições da rocha de origem, conferindo maior compacidade ao material.

A Tabela 5.3 apresenta os valores determinados para os limites de consistência: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP). A atividade das argilas (A_s) foi calculada segundo Skempton (1953), por meio da razão entre o IP e o percentual de argila. Também foi calculada a atividade segundo o critério da Embrapa (T), considerando o conteúdo de argilas e a capacidade troca catiônica total (CTC_t), conforme equação 5.1 (Santos *et al.*, 2018):

$$T = \frac{(CTC_t \cdot 1000)}{\text{Conteúdo de Argila}} \quad (5.1)$$

Onde: T é atividade das argilas em cmol_c/kg , CTC_t é determinada em cmol_c/kg e o conteúdo de argila se encontra em g/kg . Os valores de CTC de cada solo serão apresentados com maiores detalhes na seção 5.2.1.

De maneira adicional foi calculado o percentual de finos (silte + argila), considerando as faixas granulométricas estabelecidas pela ABNT 6502 e sua relação com o índice de plasticidade (IP/ % Finos).

A primeira constatação é de uma forte associação entre a plasticidade dos solos e a erodibilidade. Os horizontes superiores exibem índices de plasticidade superiores ($12 < IP < 38$) ao passo que nos horizontes erodíveis os valores são menores ($6 < IP < 16$). Entretanto, vale ressaltar que o índice de plasticidade resulta de uma interação de diversas outras propriedades, como: teor de argila, natureza do argilomineral presente, bem como do teor de matéria orgânica.

Tabela 5.3 – Características de plasticidade para os horizontes estudados.

Horizonte	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% Argila	Atividade (A _s)	T cmol _c /kg	% Finos	IP/ % Finos
ITAHS	68	30	38	63,5	0,60	6,5	75,90	0,50
ITAH	39	33	6	7,4	0,81	18,0	55,00	0,11
VARHS	61	31	30	55,8	0,54	6,4	82,00	0,37
VARH	40	31	9	7,0	1,29	22,3	67,70	0,13
OBRHS	50	34	16	67,3	0,24	9,1	85,00	0,19
OBRH	57	50	7	7,6	0,92	32,1	91,40	0,08
MRNHS	51	34	17	22,5	0,76	14,0	78,80	0,22
MRNH	28	NP	-	6,8	-	7,4	51,60	-
ALGHS	37	22	15	26,8	0,56	3,5	63,10	0,24
ALGH	28	22	6	5,6	1,07	24,8	48,10	0,12
PTOHS	51	31	20	45,2	0,44	5,0	65,40	0,31
PTOH	34	22	12	13,4	0,90	5,6	45,60	0,26
ATPHS	30	21	9	63,8	0,19	1,1	73,80	0,16
ATPH	28	17	11	10,0	1,10	1,6	43,00	0,26
LVNHS	53	19	34	24,0	1,42	10,4	40,70	0,84
LVNH	NP	NP	-	8,5	-	1,6	34,80	-
AMFHS	59	34	25	70,6	0,35	2,5	81,40	0,31
AMFH	55	39	16	35,6	0,45	5,2	48,90	0,33
CNGHS	57	33	24	72,5	0,33	1,3	80,10	0,30
CNGH	49	36	13	15,5	0,84	4,8	53,30	0,24

¹Não Plástico – ausência de plasticidade

A plasticidade também se correlaciona de forma positiva com a resistência ao cisalhamento do solo. Segundo Karim (2016), o índice de plasticidade é definido como a medida da capacidade do solo em se deformar enquanto mantém a sua forma, assim o IP tem relação direta com a força coesiva e, portanto, o aumento da tensão crítica de cisalhamento aumenta com o IP do solo. Em trabalhos recentes, Shan *et al.* (2015) encontraram correlação positiva para a resistência ao cisalhamento, associando índice de plasticidade e o índice de vazios (*e*) por meio de 17 amostras de solos, constituídas por diferentes percentuais de argila, silte e areia fina.

Considerando a atividade de argilas segundo Skempton (A_s), nota-se que os horizontes resistentes exibem menores valores que os erodíveis, porém torna-se difícil estabelecer um valor limite entre as duas classes. Além disso, solos desprovidos de plasticidade não são computados por este parâmetro, como ALGH e LVNH.

Considerando o critério de Santos *et al.* (2018), é possível calcular a atividade para todos os solos, sendo considerados solos de alta atividade (Ta) aqueles com valores iguais ou superiores a 27 cmol_c/kg e de baixa atividade (Tb) aqueles com valores inferiores 27 cmol_c/kg. A partir deste critério não é possível diferenciar os solos resistente dos erodíveis, no entanto pode-se observar a propensão dos solos erodíveis a maiores atividades. Segundo Santos *et al.* (2018), nos solos de alta atividade (Ta) ocorrem movimentos de contração quando secos e de expansão quando umedecidos, os quais estão relacionados diretamente com o argilomineral predominante (vermiculita e montimorilonita por exemplo), este comportamento influencia diretamente na susceptibilidade aos processos erosivos, uma vez que os ciclos de contração e expansão acabam promovendo o destacamento das partículas.

Visando correlacionar indiretamente, e de maneira simplificada, as diversas influencias sobre os valores do índice de plasticidade, Couto (2015) determinou a razão IP/ % finos (silte + argila), indicando que valores inferiores a 0,15 poderiam indica uma tendência do solo à erosão. Este limite não foi observado para as amostras analisadas, porém observa-se que os solos erodíveis apresentaram tendência para valores inferiores a 0,30.

5.1.1 Curvas de retenção de água

As curvas de retenção de água foram determinadas pela trajetória de secagem, por meio do método do papel filtro, principalmente pela ampla faixa de sucção contemplada. Devido a morosidade na obtenção dos dados, foram considerados apenas três taludes, no intuito de determinar a sucção mátrica e a distribuição de poros de acordo com o perfil de cada tipo de solo. Os taludes escolhidos foram: Itabira (ITA) como latossolo, Mariana (MRN) como neossolo e Lavras Novas (LVN) como cambissolo. O resultado para cada um destes perfis é apresentado a seguir.

➤ Talude Itabira (ITA) – Latossolo Vermelho Distrófico Típico.

A Figura 5.1 apresenta os pontos experimentais e as curvas de ajustes determinadas para os solos do horizonte superior e inferior do talude de Itabira. A primeira constatação é a diferença de comportamento entre as duas amostras, sendo que a amostra do horizonte superior (ITAHS), resistente ao processo erosivo, apresenta trajetória bimodal, indicando uma distribuição também bimodal de poros.

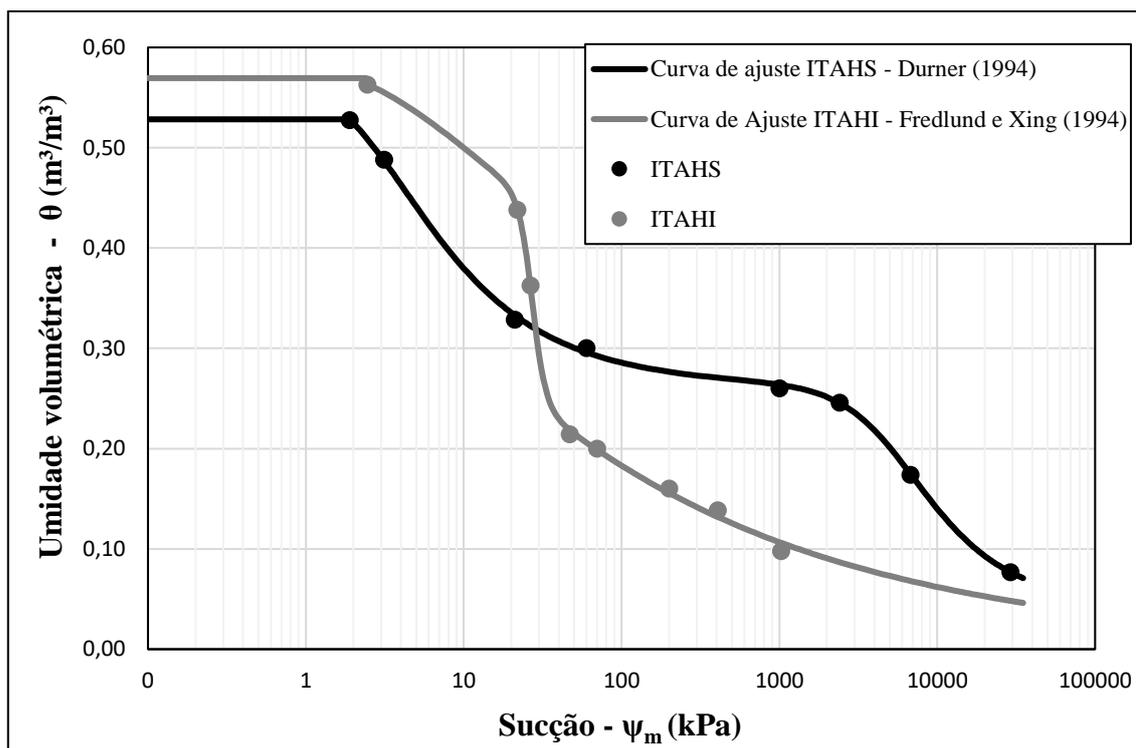


Figura 5.1 – Curva de retenção de água para o talude Itabira (ITA), com diferenciação entre os horizontes superior (ITAHS) e inferior (ITAHI).

Devido ao comportamento bimodal para a amostra ITAHS, a melhor curva de ajuste foi a obtida pelo modelo de Durner (1994), que basicamente trata de superposição das curvas obtidas por van Genuchten (1980). Ainda analisando a Figura 5.1 pode-se observar que a amostra do horizonte resistente apresenta maiores sucções para menores teores de umidade, resultado dos maiores percentuais de argila e das características dos argilominerais que o compõe.

A pressão de entrada de ar (ψ_b) no horizonte resistente (ITAHS) é baixa (inferior de 5 kPa), demonstrando a presença de macroporos e a facilidade de drenagem dos mesmos para baixas sucções (Menezes, 2010). Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), as baixas pressões de entrada de ar também se associam diretamente ao grau de intemperismo do material, devido a evolução das características dos solos principalmente em relação a distribuição de poros, influenciada pelos processos de eluviação e lixiviação. Esta amostra ainda exibe uma segunda entrada de ar (com θ aproximadamente igual a $0,25\text{m}^3/\text{m}^3$) correspondente a zona de microporosidade, a qual se situa no interior dos agregados, interferindo pouco no comportamento do solo, exceto dentro do próprio agregado (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Considerando a amostra erodível (ITAHI), observa-se uma curva unimodal, adequando melhor ao modelo proposto por Fredlund e Xing (1994). Esta amostra perde sucção rapidamente quando os teores de umidade do solo se elevam, resultado de uma distribuição de poros de maior uniformidade. Estes resultados corroboram para as análises de Bastos *et al.* (2001), Fernandes (2011) e Iori *et al.* (2012), as quais afirmam que solos erodíveis perdem sucção abruptamente quando umedecidos, podendo também gerar pressão positiva na fase ar, sendo uma das principais causas de deflagração dos processos erosivos, principalmente quando o horizonte C é exposto.

A partir da curva de retenção de água (Figura 5.1) foi construída a curva da frequência acumulada de poros, para verificar a distribuição do sistema poroso nas amostras resistente e erodível e sua associação ao processo erosivo (Figura 5.2). Conforme explicitado anteriormente não há consenso na literatura acerca da classificação do tamanho de poros. Portanto, neste estudo foi considerada a classificação proposta por Koorevar *et al.* (1983), onde macroporos são aqueles que apresentam raio dos poros superior a 50 μm , mesoporos entre 10 e 50 μm e microporos inferiores a 10 μm .

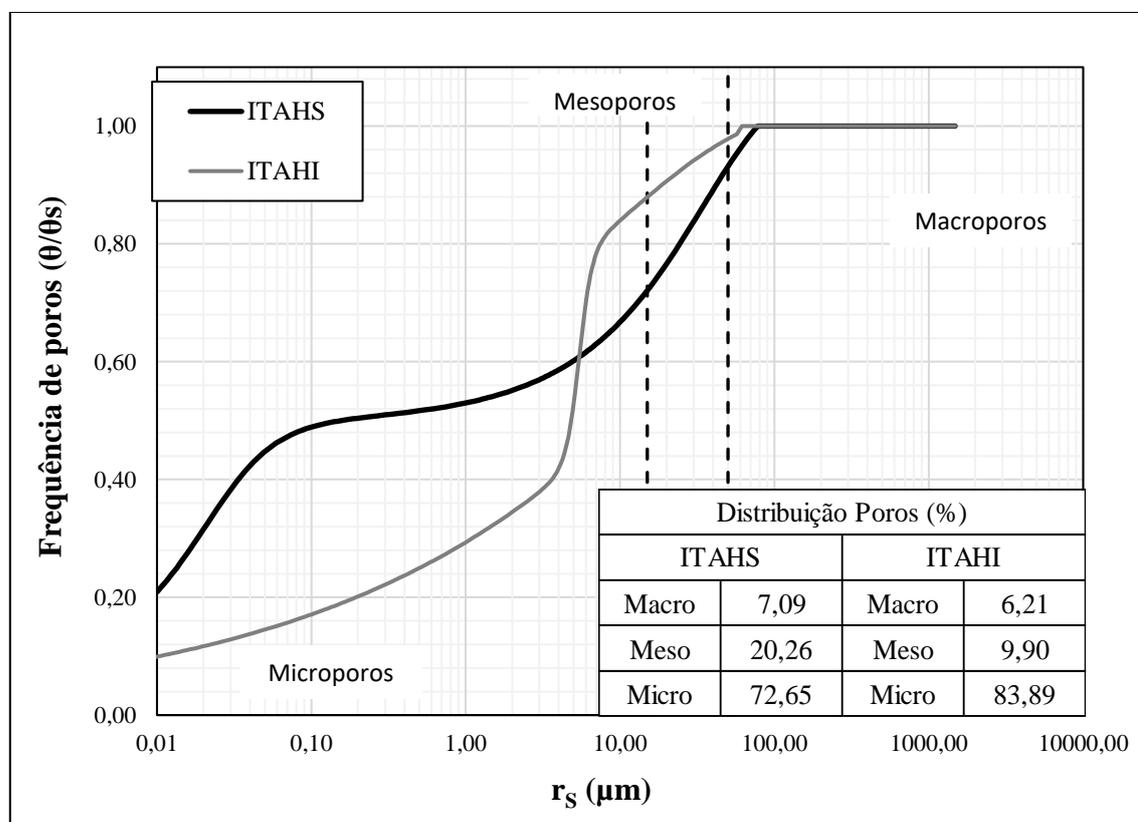


Figura 5.2 – Frequência de poros para o talude Itabira (ITA), com diferenciação entre os horizontes superior (ITAHS) e inferior (ITAH I).

A partir da Figura 5.2 é possível observar a diferente distribuição de poros entre os dois horizontes. No solo resistente ao processo erosivo (ITAHS) a distribuição de poros é heterogênea, contemplado poros de diferenciados tamanhos (macro, meso e microporos), ao passo que no horizonte erodível (ITAH) a distribuição de poros se concentra na zona de microporosidade. A diferente distribuição de poros, aliada a sucção mátrica atuante tende a explicar o diferente comportamento destes solos durante a ação da chuva, e, conseqüentemente sua reposta frente ao processo erosivo.

Para a amostra ITAHS a distribuição em macro, meso e microporos exerce importância fundamental na resistência ao processo erosivo. Durante a precipitação a água infiltra rapidamente no solo pela ação dos macroporos existente, sendo redistribuída pelos mesoporos e posteriormente ao microporos. Essa rápida infiltração nos macroporos tende a retardar a atuação do escoamento superficial minimizando o destacamento e transporte de partículas. Basicamente, esta estrutura porosa se deve ao maior grau de intemperismo deste horizonte, favorecendo a agregação das partículas por meio de agentes cimentantes, principalmente pelos maiores teores de argila, óxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica (Jong van Lier, 2010; Soto e Kiang, 2013, Camapum de Carvalho *et al.* 2015).

Considerando a amostra erodível ITAHI, a concentração de poros menores (microporos) dificulta a infiltração de água, favorecendo o surgimento do escoamento superficial e a suscetibilidade do mesmo a erosão em sulcos. Além disso, este solo apresenta perda de sucção mátrica expressiva com aumento da saturação, que aliada a pressão na fase ar tende a ser um elemento de extrema degradação. Esta situação pode acontecer nas primeiras chuvas após o período de estiagem, onde o solo se encontra próximo a umidade residual e as chuvas subseqüentes tendem a saturar rapidamente o solo gerando pressão na fase gasosa.

Desta forma, verifica-se que o horizonte inferior (ITAHI) exibe maior suscetibilidade à erosão, de maneira que sua exposição se associa a deflagração do processo, devido as condições estruturais, de porosidade e sucção mátrica existentes. É importante ressaltar que, nos pontos onde ocorre a concentração de fluxo, existem feições erosivas mais profundas, entretanto, nas demais porções ocorre a degradação física e química do maciço, levando ao processo de esqueletização, tornando-o mais poroso e mais suscetível à erosão.

➤ **Talude Mariana (MRN) – Neossolo Regolítico Distrófico Típico.**

A Figura 5.3 apresenta as curvas de retenção ajustadas e os pontos experimentais para os horizontes superior e inferior do talude de Mariana (MRN). A primeira observação é que os dois solos apresentam baixos valores de pressão de entrada de ar (inferiores a 5 kPa), porém no horizonte superior é possível observar maior umidade volumétrica de saturação, em torno de 0,60 m³/m³, evidenciando maior porosidade, resultado do maior percentual de finos deste solo, principalmente da fração silte (56,3 %).

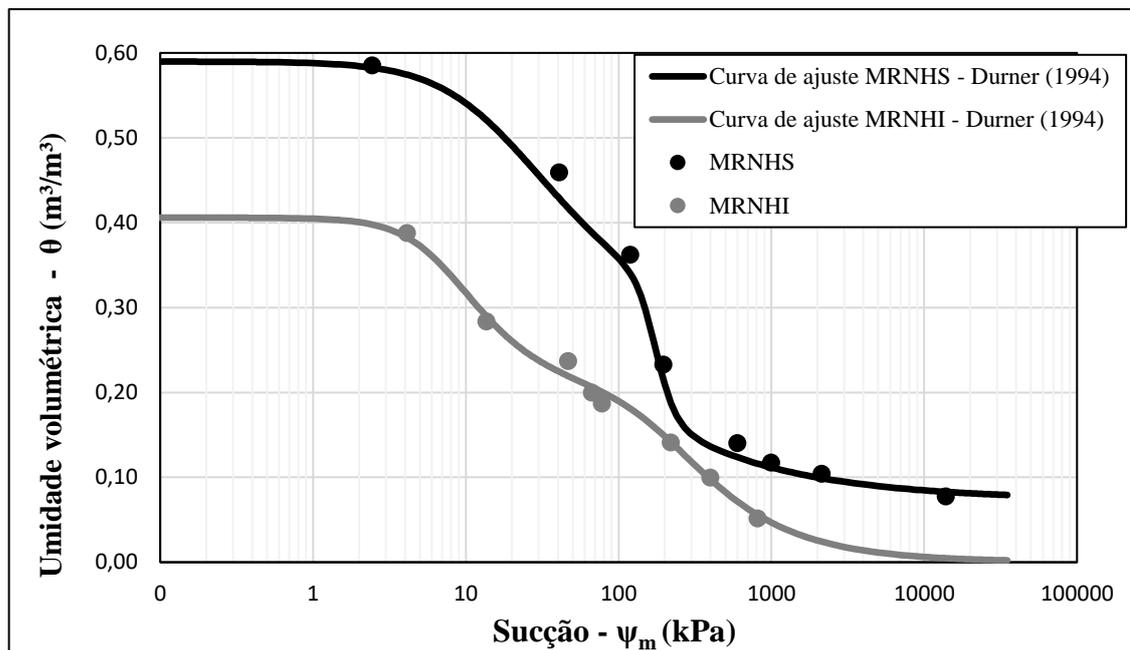


Figura 5.3 – Curva de retenção de água para o talude Mariana (MRN), com diferenciação entre os horizontes superior (MRNHS) e inferior (MRNHI).

Os dois horizontes apresentaram melhor ajuste pelo modelo de Durner (1994), sendo observado maior capacidade de retenção de água para a amostra do horizonte resistente (MRNHS), ou seja, para teores de umidade semelhantes, o solo resistente a erosão apresenta maiores valores de sucção mátrica (ψ_m). Do mesmo modo que na análise anterior, foram construídas as curvas de frequência acumulada de poros (Figura 5.4).

A distribuição de poros para os dois horizontes tende a ser semelhante, com concentração expressiva de microporos, principalmente pelos elevados percentuais de silte. Este fato se relaciona a menor evolução dos neossolos quando comparado aos Latossolos, que devido ao menor grau de intemperismo não apresentam o processo de intensa lixiviação e floculação, responsável pela formação dos macroporos.

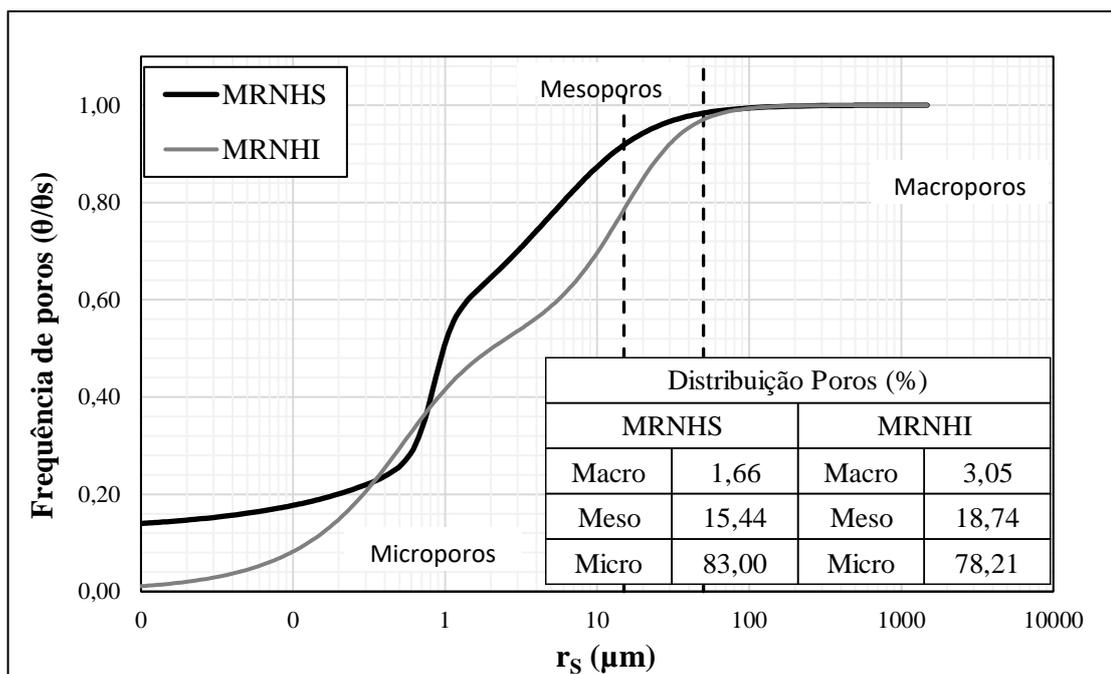


Figura 5.4 – Frequência de poros para o talude Mariana (MRN), com diferenciação entre os horizontes superior (MRNHS) e inferior (MRNHI).

Segundo Santos *et al.* (2013), as partículas destes solos (Neossolos) tendem a se arranjar de forma a estabelecer um contato face a face, gerando uma estrutura mais adensada, na qual as partículas finas, principalmente silte e argila ocupam (bloqueiam) os espaços dos poros formados pelos poucos agregados existentes, originando solos de menor porosidade.

Apesar do comportamento similar entre os dois horizontes, a umidade volumétrica do horizonte resistente a erosão é superior, principalmente próximo a saturação, sendo esvaziado em baixas tensões (inferiores a 5 kPa). Provavelmente, esta condição se deve a maior presença de raízes e matéria orgânica deste horizonte. Segundo Almeida *et al.* (2015), solos com maiores conteúdo de matéria orgânica são propensos a maior retenção de água. Ainda vale ressaltar que, assim como para as amostras do talude ITA, maiores sucções em condições não saturadas se relacionam a maior resistência à erosão, principalmente em precipitações após grandes períodos de estiagem.

Em resumo, no neossolo regolítico estudado, a distribuição de poros e a sucção apresentam importância nos processos que governam o desencadeamento do processo erosivo, porém em menor intensidade quando comparados aos Latossolos, que exibem diferença abrupta entre os horizontes resistentes e erodíveis.

➤ **Talude Lavras Novas (LVN) – Cambissolo Háplico Tb Distrófico Típico.**

A Figura 5.5 ilustra os pontos experimentais e as curvas de ajustes determinadas para os solos do horizonte superior e inferior do talude de Lavras Novas (LVN), classificado como cambissolo háplico. Inicialmente observa-se que as duas amostras exibem trajetória bimodal, principalmente a amostra do horizonte inferior LVNHI, sendo melhor ajustadas pelo modelo de Durner (1994). De maneira diferente aos outros solos estudados, tanto o horizonte resistente quanto o erodível apresentam aumentos expressivos de sucção com a dessaturação do solo.

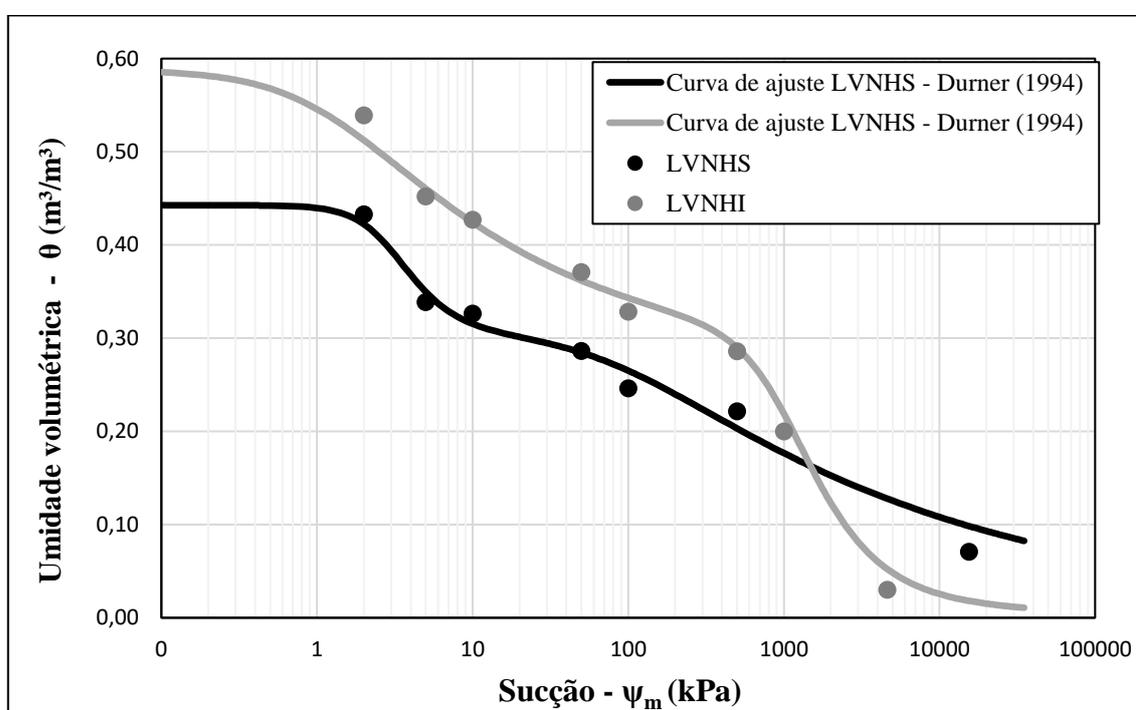


Figura 5.5 – Curva de retenção de água para o talude Lavras Novas (LVN), com diferenciação entre os horizontes superior (LVNHS) e inferior (LVNHI).

Destaca-se os valores superiores da sucção e respectivos teores de umidade volumétrica para o horizonte inferior (LVNHI), condição associada a característica expansiva deste, principalmente em umidade acima de $0,10 m^3/m^3$. Conforme será apresentado nos resultados referentes ao método expedito das pastilhas MCT (Seção 5.3.2), este horizonte apresenta alta expansão quando submetido a saturação e baixa reabsorção de água após a secagem, indicando que o solo não retorna a porosidade original.

Segundo Fredlund e Morgenstern (1977) e Fredlund *et al.* (2012), solos expansivos podem apresentar altas sucções mátricas, resultado de uma interação entre diversos

fatores, como: tamanho e forma dos poros naturais, tensão superficial, propriedades químicas e elétricas das partículas do solo. No entanto, quando ocorre a perda de umidade a redução do tamanho dos poros pode não retornar a sua condição natural, diminuindo a coesão existente, tornando o material propenso a degradação pelo processo erosivo.

A expansão neste caso aumenta o diâmetro dos poros existentes, visto que durante o ensaio a amostra é confinada apenas pelo anel, contendo a deformação horizontal, porém não é eficiente para conter a deformação da amostra no eixo vertical. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2019), a ocorrência da expansão pode estar ligada à estrutura da rocha de origem, levando a formação de solos com estrutura constituídas por partículas orientadas, suscetíveis de terem as distâncias relativas entre elas alteradas pelos ciclos de umedecimento e secagem. Para Menezes (2010), estes ciclos de umedecimento e secagem favorecem a expansão e retração dos argilominerais dos solos, incluindo os de natureza saprolítica, como no caso do solo LVNHI, resultando na remoção de partículas e início da erosão.

A Figura 5.6 mostra a distribuição de poros entre os dois horizontes. Em uma primeira análise nota-se que tanto o horizonte resistente quanto o erodível apresentam distribuição semelhante, como maior concentração de microporos.

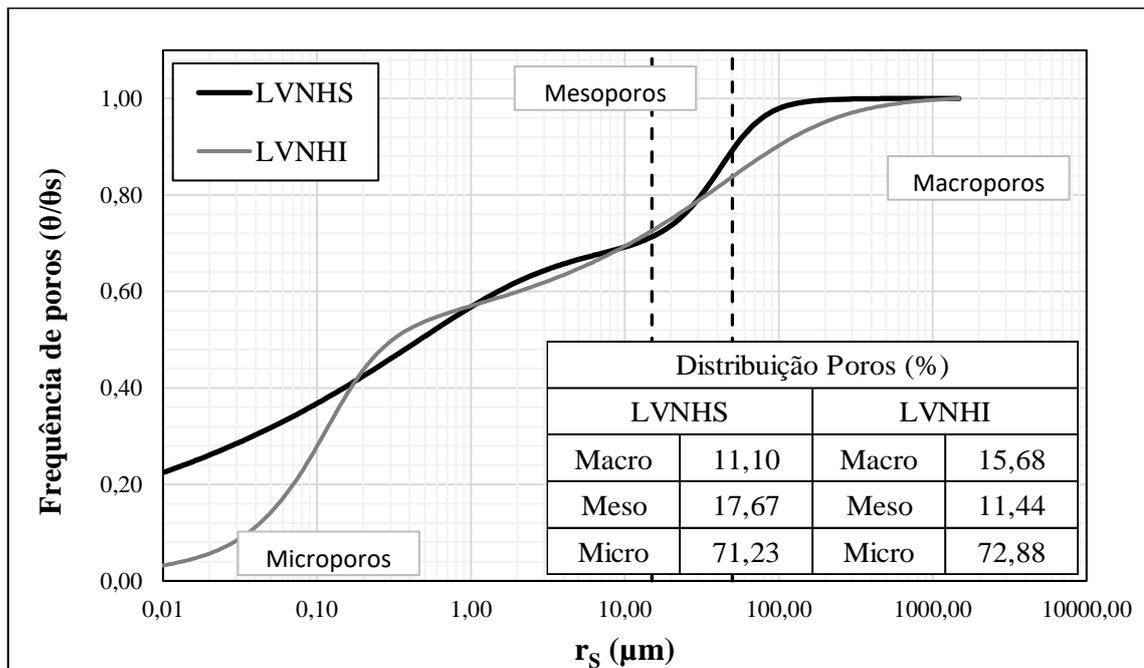


Figura 5.6 – Frequência de poros para o talude Lavras Novas (LVN), com diferenciação entre os horizontes superior (LVNHS) e inferior (LVNHI).

No entanto, nota-se que para amostra erodível (LVNHI), devido ao processo de expansão, esta porosidade se altera no decorrer do ensaio. Durante o umedecimento o tamanho dos microporos aumenta como resultado da absorção de moléculas de água no espaço entre as camadas dos argilominerais, fenômeno que, em condições confinadas, diminui a macroporosidade reduzindo assim a permeabilidade (Camapum de Carvalho *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019).

Comparando estes resultados aos provenientes do latossolo, nota-se menor efeito da distribuição de poros na deflagração dos processos erosivos, entretanto a expansão no horizonte LVNHI exerce grande influência na degradação, principalmente quando considerados os ciclos de umedecimento e secagem.

5.1.2 Estabilidade de agregados

Este método consiste na avaliação da distribuição de agregados por tamanho, considerando a elevada correlação verificada entre esta propriedade e a estrutura do solo, se relacionando a suscetibilidade ao movimento pela água e vento. Nestes estudos busca-se avaliar as forças responsáveis pela destruição dos agregados do solo, estando estas relacionadas ao cultivo, erosão ou simples umedecimento (Jong van Lier, 2010).

No entanto, não é definida uma forma de expressão dos resultados por meio da qual possa classificar qualidades boas ou más dos agregados. As formas mais comuns de expressão dos resultados envolvem o cálculo do Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e do Diâmetro Médio Geométrico (DMG), ambos realizados por pré-umedecimento, condição natural ou seca. O primeiro diâmetro se baseia em uma média aritmética dos agregados enquanto o segundo representa uma estimativa da classe de agregados de maior frequência.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de estabilidade de agregados nas condições seca e úmida, onde foram calculados o DMP e DMG. De maneira complementar, foi calculado o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), conforme a equação 5.2. Nesta condição foi calculado o índice de estabilidade de agregados considerando o DMP, denominado IEA-P, e considerando o DMG, denominado IEA-G.

$$IEA = \frac{DMP_u}{DMP_s} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Onde: DMP_u é diâmetro médio ponderado obtido por via úmida e DMP_s é o diâmetro médio ponderado obtida por via seca. De forma geral, observa-se uma nítida diminuição do DMP e DMG para os horizontes inferiores sob a condição de peneiramento via úmida, indicando a instabilidade frente a ação da água pelo processo de umedecimento e agitação lenta. Analogamente, os horizontes resistentes se mostram conservados em condições de peneiramento via seca e úmida.

Tabela 5.4 – Avaliação da estabilidade de agregados para os horizontes estudados.

Horizonte	Via Seca		Via úmida		IEA - P (%)	IEA - G (%)
	DMP (mm)	DMG (mm)	DMP (mm)	DMG (mm)		
ITAHS	3,36	3,31	3,18	2,94	94,64	88,82
ITAHl	3,30	3,12	0,84	0,33	25,45	10,58
VARHS	3,37	3,35	3,36	3,31	99,70	98,81
VARHl	3,30	3,11	0,89	0,28	26,97	9,00
OBRHS	3,37	3,35	2,85	2,55	84,57	76,12
OBRHl	3,34	3,25	1,01	0,32	30,24	9,85
MRNHS	3,35	3,26	2,59	2,04	77,31	62,58
MRNHl	3,11	2,64	1,27	0,46	40,84	17,42
ALGHS	3,36	3,32	2,35	1,10	69,94	33,13
ALGHl	3,13	2,67	1,04	0,35	33,23	13,11
PTOHS	3,36	3,31	3,34	3,28	99,40	99,09
PTOHl	3,34	3,22	1,90	1,09	56,89	33,85
ATPHS	3,18	2,78	2,90	2,18	91,19	78,42
ATPHl	3,35	3,33	2,24	1,11	66,87	33,33
LVNHS	3,33	3,24	3,27	3,09	98,20	95,37
LVNHl	2,46	1,41	1,35	0,62	54,88	43,97
AMFHS	3,35	3,26	3,26	3,05	97,31	93,56
AMFHl	3,36	3,33	2,53	1,54	75,30	46,25
CNGHS	3,34	3,27	3,29	3,15	98,50	96,33
CNGHl	3,35	3,27	1,50	0,84	44,78	25,69

Ao considerar os índices de estabilidade de agregados, fica clara a distinção entre solos resistentes e erodíveis. De forma geral os solos resistentes apresentam IEA > 70%, assegurando que a estrutura se mantém conservada após imersão, ao passo que solos erodíveis apresentam baixos IEA (inferiores 50 %), demonstrando que os agregados se desintegram em contato com a água.

Analisando o IEA pelo diâmetro médio geométrico nota-se uma maior variação quando comparados horizontes resistentes e erodíveis, indicando que este parâmetro se adequa

melhor a avaliação da erodibilidade, principalmente quando estudados os horizontes dos pontos PTO, ATP e AMF. Segundo Jong van Lier e Albuquerque (1997), o DMP apenas é correto quando ocorrer uma distribuição simétrica da massa de agregados dentro de cada classe, o que é muito pouco provável em termos práticos, levando a expressão dos resultados em função também do diâmetro geométrico (DMG).

Uma exceção para as constatações acima se deve a amostra ALGHS, pois o mesmo se mostrando como um solo resistente à erosão, apresentou baixa estabilidade de agregados quando umedecido. Tal resposta pode ser ocasionada devido a concentração expressiva de silte e ao baixo índice de vazios (e), condição que confere maior compactidade e menor permeabilidade ao material, podendo também ocasionar maiores pressões na fase gasosa, superando a coesão e o atrito entre os agregados.

Apesar do ensaio utilizado para avaliação da estabilidade ser demasiado simples, a resposta dos agregados frente a interação com a água é obtida pela ação complexa e conjunta de diferentes propriedades do solo. Segundo Bastos *et al.* (2005), os principais são: tipo e teor de argila, concentração de carbonato de cálcio, teores de óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio, manganês, matéria orgânica, exudatos orgânicos das plantas, microrganismos e outros compostos orgânicos, além dos ciclos de umedecimento e secagem. Desta forma, os índices de estabilidade não podem ser utilizados como parâmetros absolutos no estudo da erodibilidade, necessitando de análise conjunta e comparação a outras propriedades do solo.

Outras condições relevantes e que devem ser levadas em consideração no procedimento de execução do ensaio se referem a umidade inicial e maneira como é realizado o umedecimento da amostra. Caso o processo de umedecimento ocorra de forma acelerada, poderá ocorrer a compressão do ar no interior dos poros existentes, levando a desintegração do material, observado principalmente quando o solo se encontra previamente seco. A partir deste fato, Bryan (2000) afirma que o processo de umedecimento deve levar em consideração os processos erosivos específicos da região em estudo. Inclusive, esta condição pode ser responsável pela maior instabilidade observada para os agregados do solo ALGHS.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

5.2.1 Análise química da fração TFSA

Os atributos químicos dos solos, assim como os físicos, também são passíveis de manejo, identificar aqueles de maior interação com a erodibilidade e tolerância de perdas pode representar uma importante ferramenta para ações de caráter conservacionista dos solos (Lima *et al.*, 2016).

A Tabela 5.5 sistematiza os resultados das análises químicas da fração Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), considerada para partículas de dimensão inferior a 2,0 mm. Foram determinados: pH (em H₂O e KCl), macronutrientes (K, Na, Ca, Mg), alumínio trocável (Al⁺³), acidez potencial (H + Al), Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (CTC_e), Capacidade de Troca Catiônica Total (CTC_t) e teor de matéria orgânica (M. O.).

O pH é um dos primeiros parâmetros avaliados devido a sua simplicidade de determinação e pela influência nos demais parâmetros químicos, principalmente naquelas relacionados as trocas iônicas existentes no solo. Trata-se, também, de parâmetro importante para avaliação da disponibilidade de nutrientes e da evolução da pedogênese.

Segundo Uehara e Gilman (1981) *apud* Silva *et al.* (1999), com a elevação do pH há uma predisposição para elevação dos valores de argila dispersa em água, afetando significativamente os atributos importantes do solo relacionados ao processo erosivo, como: encrostamento, agregação, porosidade, infiltração de água e arraste de partículas e agregados pela enxurrada, podendo estar contribuindo para um aumento ou redução da erodibilidade.

Analisando a Tabela 5.5 é possível verificar que os solos resistentes à erosão exibem menores valores de pH em água e maiores valores de pH em solução de KCl, ao passo que a observação é inversa para os horizontes erodíveis. De maneira a consolidar as informações de pH determinados nas duas soluções, é empregado o conceito de Δ pH, conforme a Equação 5.3.

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (5.3)$$

Tabela 5.5 – Propriedades químicas da TFSA dos horizontes estudados.

Horizonte	pH			Macronutrientes								CTC		M. O. (dag/kg)
	H ₂ O	KCl	Δ pH	K ⁺ mg/dm ³	Na ⁺ mg/dm ³	Ca ²⁺ cmol _c /dm ³	Mg ²⁺ cmol _c /dm ³	Al ³⁺ cmol _c /dm ³	H + Al cmol _c /dm ³	SB cmol _c /dm ³	V %	CTC _e cmol _c /dm ³	CTC _t cmol _c /dm ³	
ITAHS	5,17	4,14	-1,03	6,00	-	0,56	0,07	0,98	3,50	0,65	15,70	1,63	4,15	1,73
ITAHl	5,53	4,16	-1,37	10,00	-	0,04	0,46	0,59	0,80	0,53	39,80	1,12	1,33	0,13
VARHS	4,62	3,81	-0,81	8,00	-	0,27	0,06	1,27	3,20	0,35	9,90	1,62	3,55	1,20
VARHl	5,6	4	-1,6	4,00	-	0,12	0,03	1,07	1,40	0,16	10,30	1,23	1,56	0,13
OBRHS	6,24	5,39	-0,85	90,00	7,28	2,79	0,18	0,00	2,90	3,23	52,70	3,23	6,13	3,59
OBRHl	5,86	4,25	-1,61	3,00	-	0,10	0,03	0,68	2,30	0,14	5,70	0,82	2,44	0,13
MRNHS	5,62	4,47	-1,15	90,00	17,02	0,11	0,03	0,78	2,70	0,44	14,00	1,22	3,14	2,26
MRNHl	5,72	4,04	-1,68	5,00	-	0,09	0,10	0,59	0,30	0,20	40,00	0,79	0,5	0,13
ALGHS	5,67	5,35	-0,32	-	-	0,13	0,02	-	0,80	0,15	21,90	0,15	0,95	1,03
ALGHl	5,35	4,1	-1,25	-	-	0,07	0,02	0,98	1,30	0,21	13,90	1,07	1,39	0,27
PTOHS	4,81	5	0,19	22,00	-	0,48	0,14	0,00	1,60	0,68	29,80	0,68	2,28	1,06
PTOHl	5,04	4,46	-0,58	2,00	-	0,19	0,03	0,19	0,60	0,23	27,70	0,25	0,75	0,23
ATPHS	4,9	6,18	1,28	-	-	0,12	-	-	0,60	0,11	15,50	0,11	0,71	0,63
ATPHl	4,8	5,07	0,27	31,00	-	0,15	0,01	-	-	0,16	100,00	0,16	0,16	0,10
LVNHS	4,45	3,75	-0,7	9,00	-	0,16	0,01	1,37	2,30	0,20	8,00	1,57	2,5	0,85
LVNHl	5,46	4,37	-1,09	2,00	-	0,12	0,02	-	-	0,14	100,00	0,14	0,14	0,13
AMFHS	5,13	5,97	0,84	13,00	-	1,00	0,28	-	0,30	1,31	81,40	0,97	1,78	0,13
AMFHl	5,08	5,5	0,42	4,00	-	1,23	0,11	-	0,50	1,35	73,00	1,35	1,85	0,40
CNGHS	4,92	5,99	1,07	10,00	-	0,27	0,06	-	0,30	0,36	37,50	0,36	0,96	0,53
CNGHl	5,23	4,24	-0,99	1,00	-	0,06	-	0,49	1,10	0,06	5,20	0,25	0,75	0,10

Onde: Δ pH = pH_{H₂O} – pH_{KCl}; SB = saturação por bases; H + Al = acidez potencial; CTC_e = capacidade de troca catiônica efetiva; CTC_t = capacidade troca catiônica total; V% = índice de saturação por bases; M. O. = teor de matéria orgânica; - = valor igual a zero.

Nos horizontes superiores (HS), os valores obtidos para Δ pH foram superiores aos erodíveis, o que indica uma condição de maior intemperismo das camadas superiores. Segundo Melo e Aleoni (2016), à medida que o grau de intemperismo do solo aumenta, os valores de Δ pH em horizontes subsuperficiais tendem a ser superiores a zero, em virtude do predomínio da presença de cargas variáveis (originadas pela adsorção de íons na superfície dos coloides).

Analisando o complexo sortivo (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ e $\text{H} + \text{Al}$) é observada a tendência dos horizontes superiores apresentarem maiores valores, principalmente para o cálcio (Ca^{+2}) e para a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$). Lima *et al.* (2016), estudando atributos químicos para tolerância de perdas de solo encontrou correlação negativa entre o complexo sortivo, principalmente Ca^{+2} , e a erodibilidade.

Neste contexto, os cátions bivalentes (Ca^{+2} e Mg^{+2}) desempenham papel importante na estabilidade dos agregados do solo, uma vez que aumentam a carga positiva no meio, diminuindo a repulsão entre as partículas e, conseqüentemente, acarretando na aglomeração e formação de estruturas estáveis. Santos (1989) ainda afirma que estes cátions bivalentes diminuem a espessura da camada de água adsorvida pela sua maior carga e menor raio iônico, dando uma geometria mais bem definida, que pode ser interpretada como característica que confere estabilidade à erosão hídrica.

Em conjunto com o complexo sortivo, têm-se a análise do percentual de saturação por bases ou V%, que expressa a proporção da capacidade de troca catiônica, determinada a pH 7,0, que é preenchida pelas bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+). Segundo Lepsch (2011), este parâmetro é utilizado para verificação dos solos quanto a relação de nutrientes e fertilidade, fato que favorece ao estabelecimento de vegetação. No caso dos horizontes estudados, não se observa uma relação entre este parâmetro e a erodibilidade.

A acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) também é maior nos horizontes superiores (HS), condição acompanhada pela elevação dos teores de alumínio trocável disponíveis (Al^{+3}), indicando que os mesmos se encontram em maior grau de intemperismo. Devido a ação do intemperismo químico, ocorre intensa remoção e lixiviação de cátions de reação básica, com resultante acúmulo de Al^{+3} trocável nos sites de carga negativa, dada a hidrólise do Al^{+3} , ocorre a disponibilização do íon H^+ que acidifica o meio (Melo e Alleoni, 2016).

Analisando a capacidade de troca catiônica do Solo (CTC), observa-se que tanto para o parâmetro efetivo (CTC_e) quanto para o parâmetro total (CTC_t), os valores encontrados foram baixos, variando de 0,11 a 6,13 $cmol_c/dm^3$. Porém, nota-se que os horizontes inferiores exibem menores CTC, variando de 0,25 a 1,35 $cmol_c/dm^3$, basicamente por um conjunto complexo de fatores compostos pelos baixos teores de argila, de sais dissolvidos e de matéria orgânica. Segundo Le Bissonnais *et al.* (2017) a CTC reflete o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e o tipo das partículas de argila, que estimulam a agregação, portanto, em solos de maior CTC é provável que ocorra maior estabilidade dos agregados quando submetidos a ação da água.

A matéria orgânica dos horizontes estudados apresenta, em termos gerais, associação com a resistência dos solos a erosão, uma vez que os horizontes superiores apresentaram os maiores valores para este parâmetro. Neste contexto, a principal função da matéria orgânica é agir como agente cimentante e assim aderir as partículas minerais do solo, atuando de forma direta na estabilidade dos agregados. Apesar da constatação da influência do teor de matéria orgânica na resistência aos processos erosivos, não existe consenso na literatura quanto ao limite que diferenciaria solos resistentes e erodíveis.

Para Jong van Lier (2010) a matéria orgânica pode melhorar a estrutura do solo de duas maneiras distintas. A primeira é atuando de maneira direta como agente cimentante, principalmente pela ação dos polissacarídeos que estão associados à formação e estabilidade dos macroagregados. A segunda se refere aos materiais orgânicos humidificados associados a óxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade, constituindo na fase mais importante na formação de microagregados do solo (Tisdall e Oades, 1982 *apud* Bastos, 2005).

5.2.2 Fluorescência de raios x

Por meio dos ensaios de fluorescência de raios x foram determinados os óxidos majoritários que compõe os horizontes estudados (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O e MnO), conforme a Tabela 5.6. De maneira a associar os percentuais de óxidos ao estágio de evolução dos solos estudados, foram calculadas as relações moleculares K_i e K_r , conforme as equações 5.4 e 5.5 (Teixeira *et al.*, 2017).

$$K_i = 1,7 \frac{\% SiO_2}{\% Al_2O_3} \quad (5.4)$$

$$K_r = 1,7 \frac{\% SiO_2}{Al_2O_3 + 0,6375Fe_2O_3} \quad (5.5)$$

Tabela 5.6 – Teor dos óxidos majoritários determinados por fluorescência de raios x.

Horizonte	Óxidos Majoritários (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	K _i	K _r	K _e
ITAHS	43,45	33,02	20,63	1,30	0,81	0,03	2,24	1,60	1,54
ITAH	56,61	31,96	5,22	0,32	4,30	0,04	3,01	2,73	2,70
VARHS	47,02	41,93	8,29	0,84	1,55	0,02	1,91	1,69	1,66
VARHI	60,48	31,61	4,47	0,53	2,76	-	3,25	2,98	2,93
OBRHS	21,27	50,83	24,02	2,32	-	0,04	0,71	0,55	0,52
OBRHI	31,46	43,78	21,48	1,92	0,09	0,05	1,22	0,93	0,89
MRNHS	48,74	28,34	13,83	1,51	6,77	0,17	2,92	2,23	2,12
MRNHI	51,91	31,34	7,98	0,59	7,48	0,07	2,82	2,42	2,37
ALGHS	36,74	32,25	22,72	1,33	6,18	0,03	1,94	1,34	1,29
ALGHI	51,56	33,18	7,27	0,35	7,03	0,05	2,64	2,32	2,29
PTOHS	40,45	31,76	23,17	0,92	2,80	0,04	2,17	1,48	1,44
PTOHI	53,03	20,64	16,02	0,86	2,95	0,11	4,37	2,92	2,82
ATPHS	9,50	30,09	57,18	1,88	0,14	0,48	0,54	0,24	0,23
ATPHI	35,53	21,87	35,65	0,83	4,71	0,24	2,76	1,35	1,32
LVNHS	55,78	29,52	7,40	0,73	6,32	-	3,21	2,77	2,70
LVNHI	56,37	29,04	5,24	0,59	8,27	-	3,30	2,96	2,89
AMFHS	36,40	32,98	27,79	2,40	0,24	0,06	1,88	1,22	1,15
AMFHI	53,97	25,97	12,63	1,45	4,21	0,23	3,53	2,70	2,56
CNGHS	30,39	38,88	27,53	2,08	-	0,03	1,33	0,92	0,87
CNGHI	47,98	35,83	12,36	1,18	1,86	0,03	2,28	1,87	1,80

Considerando a influência dos óxidos de titânio como de grande importância na avaliação do grau de intemperismo dos solos, Couto (2015) formulou uma relação molecular adicional chamada K_e (Equação 5.6), cujos valores também se encontram na Tabela 5.6.

$$K_e = \frac{\frac{\%SiO_2}{0,60}}{\frac{\%Al_2O_3}{1,02} + \frac{\%Fe_2O_3}{1,60} + \frac{\%TiO_2}{0,80}} \quad (5.6)$$

De maneira similar a resultados anteriores, observa-se que os horizontes superiores (HS) se mostram em maior grau de intemperismo quando comparados aos horizontes erodíveis (HI). Tal afirmação é evidente uma vez que os horizontes resistentes (HS) apresentam menores teores de sílica (SiO_2) e maiores concentrações de óxidos de ferro (Fe_2O_3) e alumínio (Al_2O_3). Este resultado é reflexo direto da lixiviação da sílica e da concentração dos óxidos de ferro e alumínio, de baixa mobilidade. Segundo Melo e Alleoni (2016), óxidos de ferro e alumínio se formam em ambientes de alta intemperização (alta pluviosidade e fluxo de a água livre), com intensa lixiviação de silício (Si).

O maior percentual de óxido de ferro e alumínio nas camadas superiores também é responsável por conferir resistência aos agregados, devido ao seu efeito cimentante. Segundo van Wambeke (1982, *apud* Melo e Allenoni, 2016) as propriedades físicas dos solos são melhoradas graças aos efeitos flocculantes destes dois óxidos, os quais formam microagregados fortes e estáveis (conhecidos como estrutura de “pó de café”), favorecendo o preparo do solo, a permeabilidade e a drenagem. Alguns autores ainda consideram que os óxidos de alumínio desempenham maior função na agregação do solo, principalmente com o predomínio do mineral gibbsita na fração argila, que confere maior resistência, gerando estrutura microgranular, resultando em elevados valores de permeabilidade (Ferreira *et al.*, 1999).

Os percentuais de óxidos de potássio (K_2O) apresentam diferença significativa quando analisados em um mesmo talude. Estes óxidos se associam de forma direta a argilominerais do tipo 2:1, que exibem característica expansiva, além de serem indicativo de solos pouco intemperizados.

As relações moleculares K_i e K_r confirmam uma tendência: solos em menor grau de intemperismo apresentam maior suscetibilidade aos processos erosivos. Esta afirmação é evidente quando analisados, de forma isolada, as amostras provenientes de latossolos, onde observam-se valores baixos para as relações moleculares dos horizontes superiores, ao passo que nas camadas erodíveis as relações são maiores. Segundo Farias (2012) o valor de K_i estabelecido para a caulinita foi igual a 2,0, indicando solos muito intemperizados, logo convencionou-se que solos com valores de K_i inferiores a 2,0 seriam considerados muito intemperizados, ao passo que valores superiores a 2,0 se relacionam a solos pouco intemperizados.

De forma a ilustrar a importância das relações moleculares K_i e K_r , foi construído o gráfico da Figura 5.7, onde é possível notar as diferenças entre os coeficientes obtidos para os solos resistentes e suscetíveis a erosão. Esta relação é derivada dos trabalhos realizados por Resende e Santana (1988), porém em suas análises os autores determinaram os óxidos majoritários para a fração argila dos solos utilizando o método do ataque sulfúrico, metodologia diferente da utilizada no presente estudo.

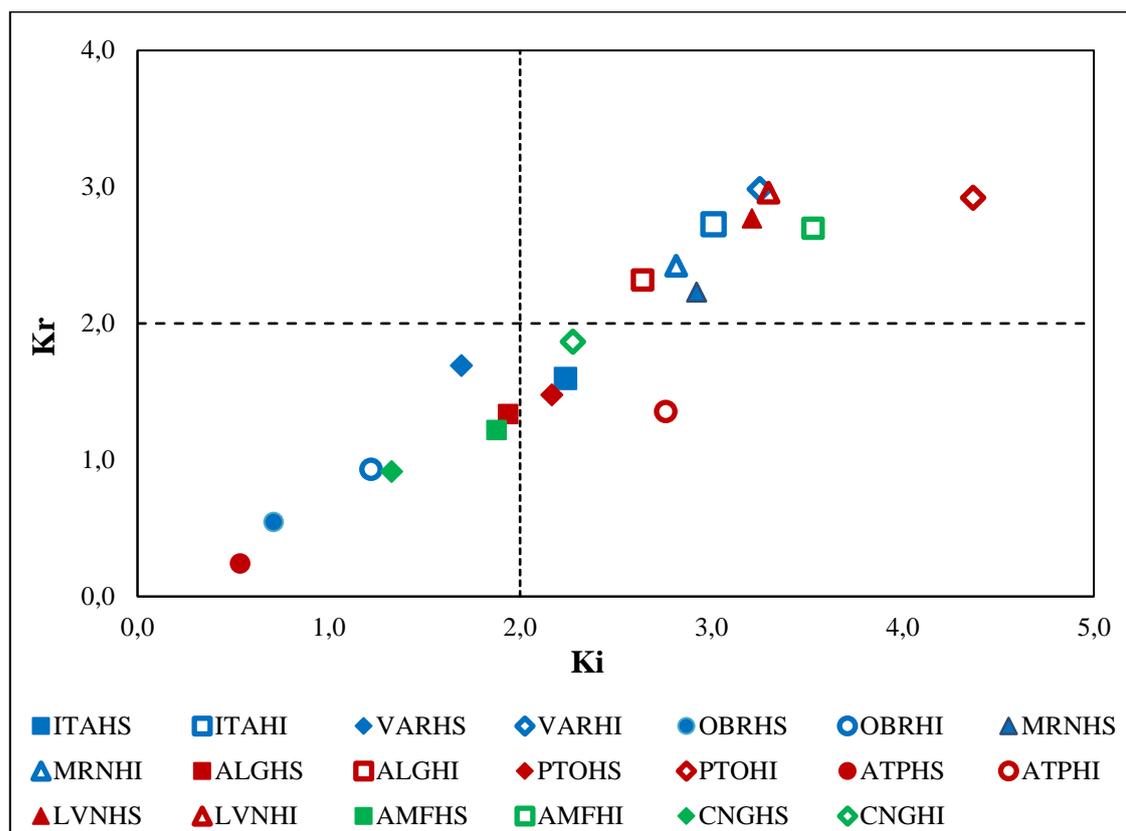


Figura 5.7 – Correlação entre os valores de K_i e K_r .

Ainda é possível observar que grande parte das amostras resistentes (HS) apresentam coeficiente K_i inferior a 2,0 ou próximo a este valor, enquanto que as erodíveis (HI) apresentam valores elevados. Uma constatação interessante deve ser feita para os solos MRN e LVN que não exibiram grandes diferenças entre seus horizontes, uma vez que se tratam de Neossolo e Cambissolo respectivamente, ou seja, solos pouco evoluídos, sendo assim apresentam grande teores de sílica em sua constituição.

As relações moleculares com a inclusão dos óxidos de titânio (K_e) seguem o determinado pelas relações K_i e K_r e distinguem, de forma geral, solos resistentes dos suscetíveis a

erosão. A inclusão dos óxidos de titânio tem o intuito de considerar minerais resistentes as intempéries, como o rutilo e o anatásio, portanto, torna-se também um parâmetro complementar para a avaliação do grau de intemperismo.

5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para verificar o arranjo estrutural dos solos estudados. As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram a diferença estrutural entre os horizontes resistente e erodível para o talude ITA. As imagens obtidas para os demais horizontes encontram-se sistematizadas no Apêndice B. Para fins de comparação, todas as amostras foram analisadas sob a mesma resolução (ampliação).

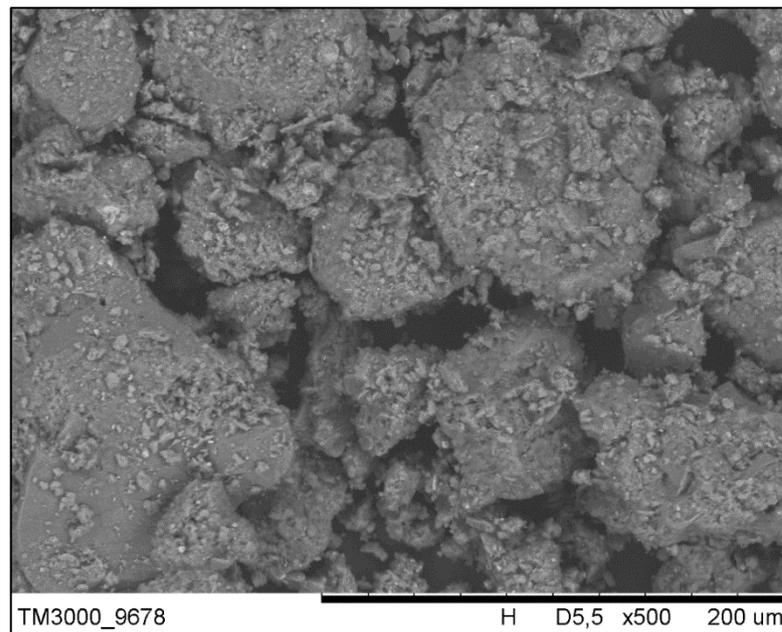


Figura 5.8– Ensaio de MEV para amostra ITAHS (500 x).

Os horizontes superiores apresentam estrutura compacta, principalmente pela presença de macroporos com partículas agregadas em seu entorno (Figura 5.8). Neste tipo de solo, os poros apresentam distribuição gradual, com presença de macro, meso e microporos, conforme verificação da curva de retenção de água (Seção 5.1.1). Essa distribuição de poros garante a infiltração rápida de água, minimizando o escoamento superficial e o destacamento de partículas que aceleram o processo erosivo. Vale ressaltar que esta estrutura é consequência do maior grau de intemperismo e lixiviação, principalmente pela presença de óxidos de ferro e alumínio que atuam como agente cimentante.

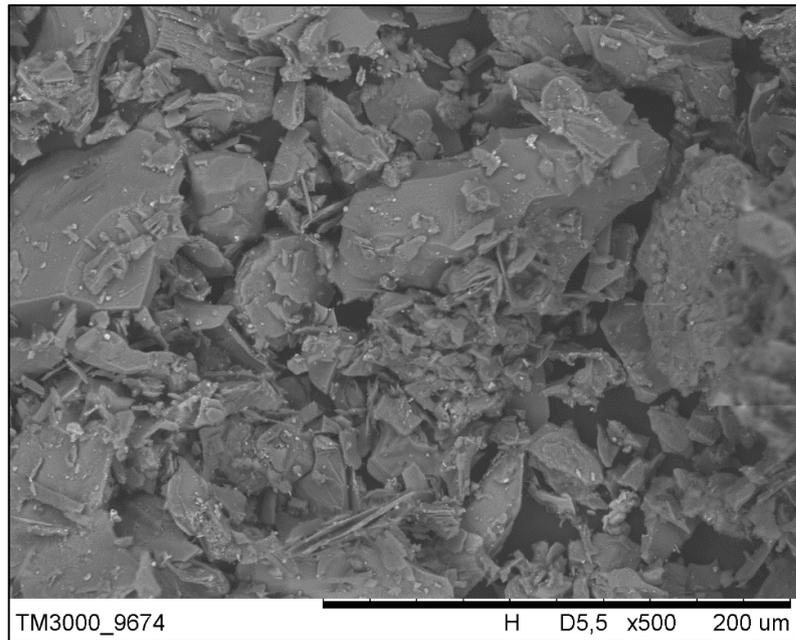


Figura 5.9 – Ensaio de MEV para amostra ITAHI (500 x).

Nos solos erodíveis (HI) é verificada maior concentração de microporos (Figura 5.9), e, em muitos casos, acompanhados da ausência de macro e mesoporosidade em sua estrutura (conforme visto na Seção 5.1.1). Essa diferenciação na porosidade tende a explicar a causa do processo erosivo se iniciar justamente na transição entre o horizonte resistente e erodível, uma vez que ocorre a alteração da percolação de uma estrutura com distribuição gradual de poros para outra predominantemente microporosa.

Além da distribuição de poros se relacionar à infiltração, têm-se a associação da sucção ao grau de saturação atuante, relação muito importante em condições não saturadas, principalmente pela possibilidade de pressão sobre a fase gasosa. Em situações onde a estrutura microporosa é dominante (solos erodíveis) a drenagem é dificultada, havendo maior possibilidade de pressão na fase ar. Vale ressaltar que nos solos erodíveis a agregação é mínima, sendo mais importante a interação entre as partículas, ao passo que nos solos resistentes à erosão (mais intemperizados) a interação principal ocorre entre os agregados.

Quando analisados em taludes de corte, os efeitos da microestrutura se relacionam a diversas fases do processo erosivo. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006) a infiltração da água de chuva em um solo, com fase ar contínua, tende a ter sua frente de saturação bloqueada pelo aumento de pressão na fase gasosa, aumentando o escoamento

superficial, favorecendo a erosão em sulcos na superfície. Em casos de fluxo subterrâneo associados a infiltração simultânea de água da chuva, a fase gasosa é descontínua, podendo gerar a ruptura dos agregados, situação que pode acontecer na base de taludes, levando ao processo conhecido por solapamento.

5.3 ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT

5.3.1 Metodologia MCT convencional

A Tabela 5.7 sistematiza os dados classificatórios da metodologia MCT para os horizontes estudados, contemplando os parâmetros d' , c' , P_i e e' , obtidos por meio dos ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão. A classificação dos solos estudados se encontra na Figura 5.10.

Tabela 5.7 – Parâmetros classificatórios da Metodologia MCT.

Horizonte	d'	c'	P_i (%)	e'	Classificação
ITAHS	77,73	2,18	17,1	0,78	LG'
ITAHI	38,04	0,50	318,1	1,62	NA
VARHS	51,69	1,81	30,1	0,86	LG'
VARHI	20,89	1,11	286,1	1,56	NS'
OBRHS	44,15	0,18	123,5	1,25	LA
OBRHI	43,21	0,95	179,5	1,35	NA'
MRNHS	28,93	0,76	240,0	1,46	NA'
MRNHI	22,06	0,58	300,7	1,61	NA'
ALGHS	35,93	1,06	85,3	1,12	LA'
ALGHI	4,55	0,65	259,6	1,91	NS'
PTOHS	20,36	2,04	20,0	1,06	LG'
PTOHI	19,64	0,70	150,4	1,36	NA'
ATPHS	129,05	2,17	5,0	0,59	LG'
ATPHI	53,33	1,19	27,0	0,86	LA'
LVNHS	33,01	1,01	82,0	1,13	LA'
LVNHI	16,25	0,38	278,0	1,59	NA
AMFHS	23,13	2,08	37,3	1,07	LG'
AMFHI	14,62	1,16	87,3	1,31	NA'
CNGHS	19,64	2,07	40,1	1,12	LG'
CNGHI	3,55	0,90	254,9	2,01	NS'

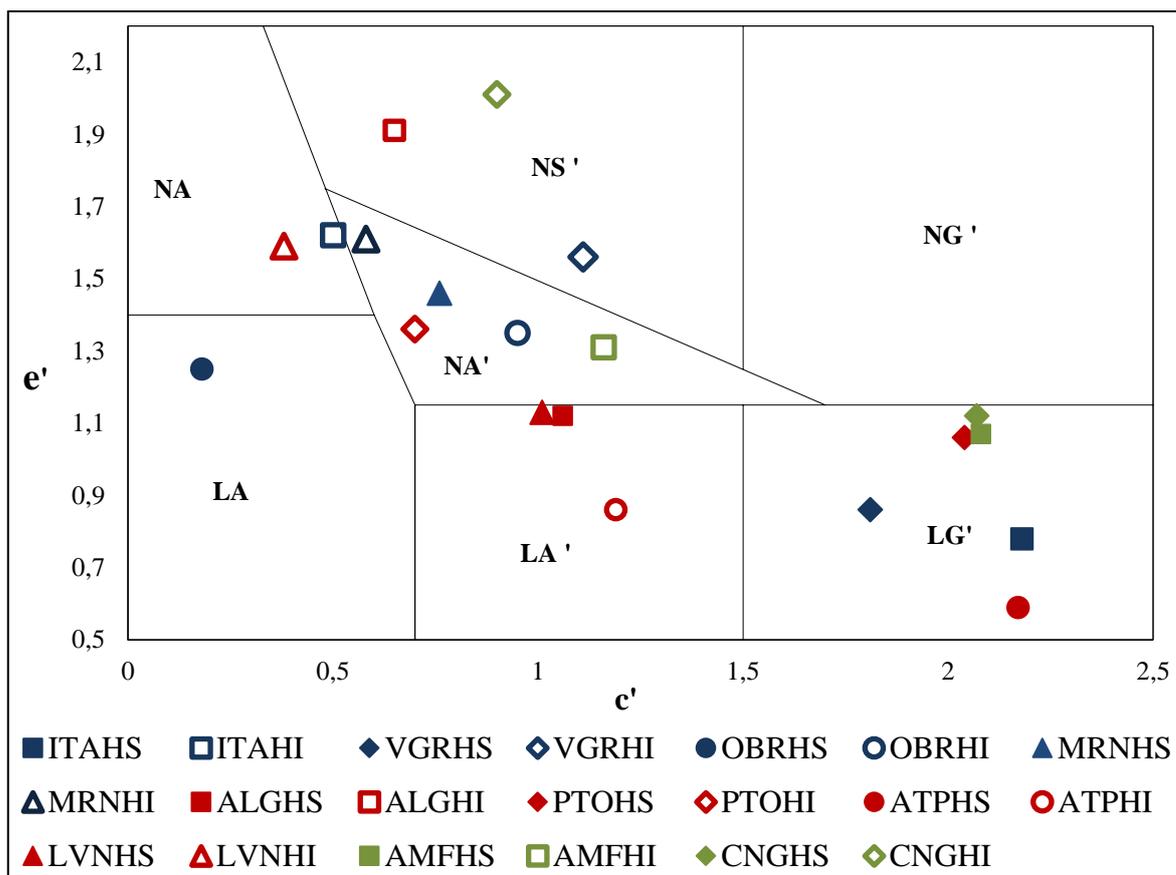


Figura 5.10 – Classificação MCT para os solos estudados.

O coeficiente d' mostrou significativa variação, com maiores valores nos horizontes superiores, principalmente devido aos maiores teores de argila, grau de saturação e massa específica aparente, propriedades que interferem no formato das curvas de compactação. Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos argilosos de comportamento laterítico apresentam valores d' superiores a 20, condição que foi verificada nas amostras estudadas. Adicionalmente, o parâmetro d' também pode ser relacionado a sucção atuante, visto que o aumento do teor de umidade resulta em diminuição da sucção e, conseqüentemente, na redução da resistência. Desta forma a quantidade de material compactado é maior, e, assim, o peso específico seco é maior. Portanto, maiores valores de d' resultam em maiores sucções, se relacionando a maior resistência à erosão dos horizontes superiores (HS).

A mesma tendência é observada para o parâmetro c' , que foi maior nos horizontes superiores, uma vez que também é diretamente influenciado pela granulometria do material. Segundo Nogami e Villibor (1995) valores acima de 1,5 são característicos de solos argilosos, enquanto valores abaixo de 1,0 identificam as areias e os siltes não

plásticos. Valores entre 1,0 e 1,5 agrupam misturas entre estas frações, tais como areias siltosas, areias argilosas, etc. O coeficiente c' indica uma combinação da graduação com a coesão, expressa por uma deformabilidade, traduzindo o efeito da granulometria e da coesão do solo observado após a compactação e não na distribuição granulométrica do material utilizado no ensaio (Moura *et al.*, 2006; Couto e Gomes, 2020).

Os valores encontrados para a perda de massa (P_i) e para o coeficiente e' foram superiores nos horizontes erodíveis (apresentando muitas vezes valores acima de 200 %), evidenciando seu alto potencial de desagregação quando imersos totalmente em água. Este comportamento se deve a baixa coesão das partículas em ação conjunta com a estrutura microporosa, que devido a rápida saturação durante o ensaio de perda de massa por imersão, gerando elevadas pressões na fase gasosa que desestruturam o solo e rompem os eventuais agregados existentes.

Analisando a Figura 5.10, observa-se que a maior parte dos horizontes resistentes a erosão se enquadra na classe dos solos lateríticos argilosos (LG'). A amostra OBRHS devido as suas características arenosas e a baixa perda de massa, foi classificada como areia laterítica (LA) evidenciando uma boa resistência a erosão, resultado semelhantes aos encontrados por Pejon (1992) e Silva *et al.* (2019).

Segundo Nogami e Villibor (1995), solos LG' e LA apresentam-se resistentes aos processos erosivos, uma vez que apresentam pequenas ou até mesmo perdas de massa nulas. Este resultado é reflexo de um conjunto de propriedades, que englobam maiores concentrações de finos, maior estabilidade dos agregados (principalmente pela maior concentração de óxidos de ferro e alumínio) e também a microestrutura do material, com a presença de macro, meso e microporos. Este arranjo de poros facilita a entrada de água nos poros de maior tamanho durante a saturação, sendo posterior redistribuindo para os microporos, condição que minimiza a pressão na fase gasosa.

Outra constatação é a associação do potencial erosivo dos solos enquadrados nas classes NS', NA' e NA, primeiramente por não exibirem propriedades lateríticas em um segundo momento por serem constituídos por frações majoritárias de silte e areia que não conferem coesão e estabilidade ao material. Para Nogami e Villibor (1995), estes grupos

contemplam os solos saprolíticos, que apresentam características muito dependentes da rocha de origem, com a presença de minerais parcialmente intemperizados, podendo ser muito plásticos e expansivos, de baixa capacidade de suporte e altamente erodíveis. Neste contexto, também é importante o efeito da sucção durante a saturação das amostras, principalmente nos horizontes erodíveis dos Latossolos, conforme observado na curva característica, estes apresentam perda abrupta de sucção com aumento dos teores de umidade (Figura 5.1), que aliados a estrutura microporosa (Figura 5.2) e a baixa coesão entre as partículas levam a ruptura dos agregados, dando início ao processo erosivo.

A amostra MRNHS, foi classificada como NA', desempenho inesperado, em um primeiro momento, para horizontes resistentes a erosão. Este comportamento está associado ao maior percentual de silte, sofrendo desintegração quando imerso totalmente em água. No entanto, observa-se que a condição de campo tem importância fundamental, uma vez que o horizonte se mostra conservado em campo, possivelmente pela presença de raízes e alta concentração de matéria orgânica (conforme apresentado na Tabela 5.5).

Os solos classificados como LA' apresentaram comportamento ambíguo, com enquadramento de solos resistentes (LVNHS e ALGHS) quanto solos suscetíveis a erosão (ATPHI). As amostras LVNHS e ALGHS são considerados solos pouco evoluídos, ou seja, que não apresentam grau de intemperismo que evidencie uma condição laterítica avançada, portanto estes se localizam no limiar entre o grupo LA' e NA'. No entanto, quando comparados aos seus respectivos horizontes erodíveis (LVNHI e ALGHI), as perdas de massa e o coeficiente e' são inferiores.

Considerando a amostra ATPHI, mesmo sendo um horizonte erodível, exibe características lateríticas ocasionadas pelas mudanças de propriedades no decorrer dos ensaios da metodologia MCT. Para Nogami e Villibor (1995), em condições naturais, esses solos possuem baixa massa específica e capacidade de suporte, podendo ser colapsíveis quando imersos em água. Entretanto, quando devidamente compactados, adquirem elevada capacidade de suporte, coesão, pequena contração por perda de umidade e pequena expansibilidade quando imersos em água, propriedades estas que podem possibilitar o seu uso em bases e sub-bases de pavimentos.

5.3.2 Método expedito das pastilhas

Os resultados obtidos pelo método expedito das pastilhas, segundo procedimento definido por Godoy e Bernucci (2002), se encontram na Tabela 5.8. Foram determinados os parâmetros contração e inchamento diametral, umidade de moldagem, reabsorção (Reabs.), índice de reabsorção e resistência a penetração (para cones de 10 e 30 g), além das observações acerca das esferas de solo moldadas. É importante ressaltar que esta metodologia foi utilizada no intuito de verificar sua aplicação na análise da erodibilidade em alternativa à classificação MCT.

A primeira característica avaliada se refere a umidade de moldagem das pastilhas, apresentando variação de 35 a 81 %, indicando grande diversidade de materiais, principalmente no que se refere a granulometria e mineralogia. Segundo Godoy (1997), é esperado que solos com maior teor de finos, apresentem maiores teores de umidade.

Os solos apresentam nítido comportamento distinto perante os processos de secagem e umedecimento. No caso dos horizontes resistente (HS), a contração diametral é preponderante, de forma que a tendência de inchamento após a reabsorção de água seja pequena. O inverso é observado em relação aos horizontes erodíveis (HI) que apresentam baixa contração e valores superiores de inchamento diametral, chegando a 18,90 % para a amostra MRNHI. Portanto, é possível afirmar que, no caso dos solos erodíveis os processos de contração em conjunto com a forte expansão auxiliam na diminuição da coesão entre as partículas, de maneira similar ao que acontece naturalmente pelos ciclos de umedecimento e secagem, aumentando o potencial erosivo destes solos.

Perante o comportamento diferenciado dos horizontes resistentes e suscetíveis a erosão, foi construído o gráfico da Figura 5.11, visando correlacionar os valores de contração e inchamento diametral obtido pelo método expedito das pastilhas na distinção do comportamento de solos frente a erosão. Também foi possível a determinação de um limite de separação representado pela linha tracejada com inclinação 1:1. É possível inferir que as determinações da contração e do inchamento diametral são promissoras na distinção de comportamento dos solos frente a erosão. Quando analisados apenas os latossolos, a diferença de comportamento se torna mais evidente. Desta forma, pode-se constatar que horizontes B latossólico tendem a ser mais resistentes à erosão.

Tabela 5.8 – Parâmetros obtidos pelo método expedito das pastilhas, segundo Godoy e Bernucci (2002).

Horizonte	Pastilhas			Reabsorção de Água			Penetração		Esferas			
	Contração Diametral (%)	Inchamento Diametral (%)	Umidade Moldagem (%)	Reabs. (%)	Índice Reabs. (%)	Tipo de Trinca ¹	Cone 10 g (mm)	Cone 30 g (mm)	Umidade Moldagem (%)	R.E. ²	Tempo de interação (min)	Produto ³
ITAHS	10,82	6,16	57,80	39,20	-0,32	2	0,8	1,4	59,80	3	5,2	2
ITAH	3,48	13,53	57,02	61,37	0,08	3	3,1	5,2	52,26	1	1,3	4
VARHS	13,20	5,85	73,58	49,33	-0,33	2	1,2	1,4	70,18	3	150,0	2
VARHI	6,87	18,15	60,18	66,44	0,10	3	4,4	6,2	56,29	1	2,5	4
OBRHS	8,66	2,34	52,87	29,12	-0,45	1	0,1	0,1	51,73	3	150,0	1
OBRHI	9,32	16,20	79,30	88,14	0,11	3	4,6	6,3	76,29	1	1,8	4
MRNHS	11,94	11,67	78,29	85,62	0,09	3	2,4	3,4	71,33	3	120,0	3
MRNHI	3,01	18,90	44,05	50,06	0,14	3	4,1	5,3	39,46	1	1,3	4
ALGHS	9,38	10,98	60,34	58,21	-0,04	3	3,0	4,1	57,52	3	3,4	3
ALGHI	3,73	14,76	42,90	56,95	0,33	3	4,1	5,2	38,83	1	2,4	4
PTOHS	8,31	1,68	69,92	32,82	-0,53	1	0,5	0,8	63,64	3	3,5	2
PTOHI	4,52	17,45	44,25	60,30	0,36	2	3,6	4,5	40,11	2	1,8	3
ATPHS	5,05	1,16	35,22	19,81	-0,44	1	0,1	0,1	34,40	3	150,0	1
ATPHI	4,07	5,17	35,46	18,63	-0,47	1	0,0	0,2	32,40	3	150,0	2
LVNHS	6,57	6,06	52,15	104,21	1,01	2	1,3	2,9	63,64	3	6,0	2
LVNHI	0,00	9,66	40,27	32,64	-0,19	2	4,2	5,6	27,96	2	0,4	4
AMFHS	12,87	8,90	81,09	57,18	-0,29	2	1,1	1,7	77,21	3	6,6	2
AMFHI	10,08	11,45	61,79	42,36	-0,31	3	1,4	2,3	68,38	2	3,1	2
CNGHS	9,03	1,90	66,70	34,61	-0,48	1	0,1	0,1	62,26	3	150,0	2
CNGHI	7,09	12,80	74,00	72,74	-0,02	3	4,3	5,1	68,17	1	1,7	3

Onde: ¹Trincas observadas após etapa de reabsorção de água: 1 – Ausência ou poucas trincas; 2 – presença de certo trincamento com inchamento; 3 – muito trincado com inchamento visível a olho nu. ²R.E. = Resistência ao esmagamento das esferas: 1 – esfera se quebra entre os dedos; 2 – esfera se quebra entre o dedo e superfície plana; 3 – não rompe. ³ Produto das esferas em água: 1- não trinca ou não se altera; 2 – blocos milimétricos; 3 – Partículas; 4 - Pasta.

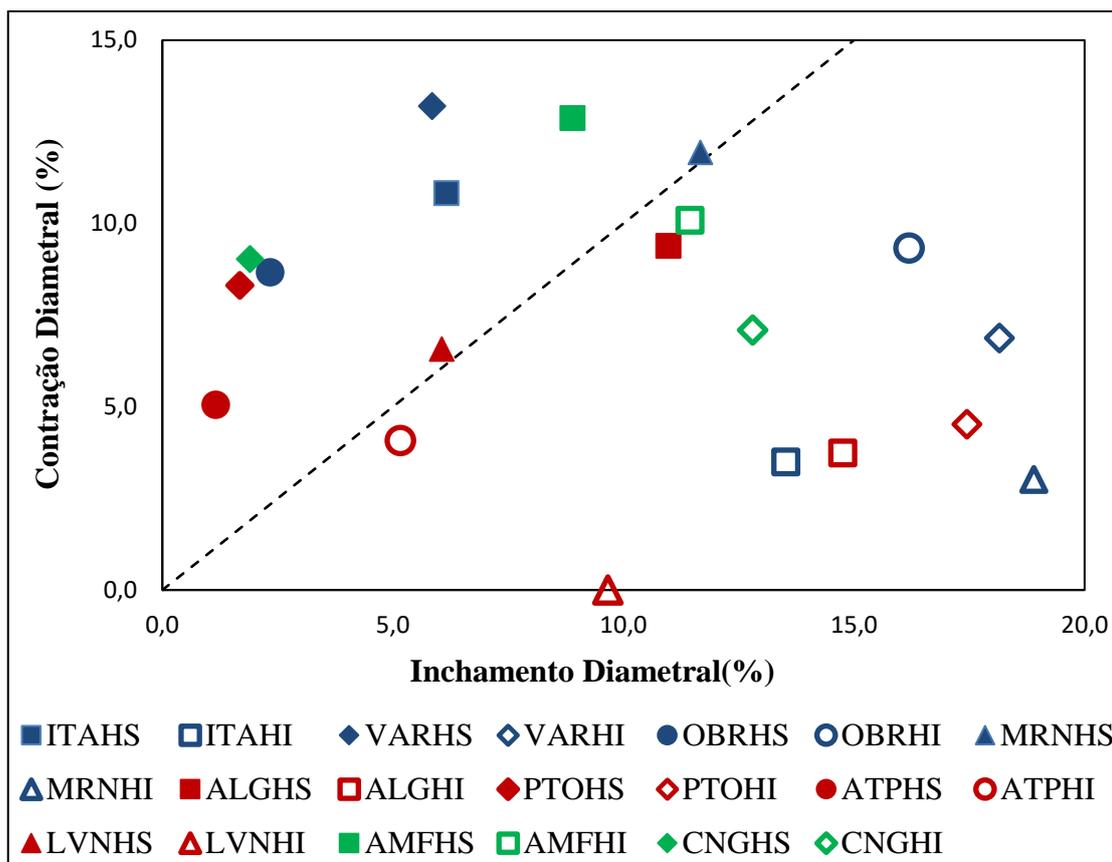


Figura 5.11 – Avaliação da contração e do inchamento diametral na erodibilidade.

Próximo ao limite entre as classes é possível verificar que se encontram as amostras dos horizontes superiores dos solos menos intemperizados (MRN, ALG e LVN). Por serem solos menos intemperizados apresentam maiores valores de expansão em decorrência da presença de minerais micáceos em sua composição. A amostra PTOHI apresenta baixa expansão mesmo sendo um horizonte erodível. Esta condição está relacionada às características intrínsecas deste solo, uma vez que este horizonte apresenta relação molecular K_i igual 2,76, ou seja, mais intemperizado.

O tipo de trinca reflete o comportamento do material frente a reabsorção de água e pode ser utilizado na indicação de caráter laterítico de solos. Portanto solos resistentes tendem a apresentar ausência ou baixo trincamento enquanto que solos erodíveis exibem várias trincas com presença de inchamento perceptível a olho nu.

O índice de reabsorção expressa a quantidade de água reabsorvida (Reabs.) em função da umidade de moldagem da pastilha. Índices negativos indicam que o solo absorve menor quantidade de água depois de sofrer contração, ocorrendo em solos lateríticos devido as

mudanças estruturais do argilomineral desencadeadas pelo processo de expansão e secagem. No presente estudo, o índice de reabsorção apresentou comportamento diverso para os horizontes estudados, não sendo possível determinar um valor que fosse aplicado a erodibilidade.

Os valores de penetração do cone de 10g variaram de 0,0 a 4,6 mm, enquanto que para o cone de 30 g de 0 a 6,30 mm. Os horizontes superiores (HS) exibiram os menores valores, indicando resistência a penetração, sendo os valores nulos, ou muito baixos (0,1 mm) pertencendo as amostras provenientes de horizonte B latossólico. O comportamento para os materiais erodíveis é diferente, apresentando maior penetração.

A análise do produto obtido pela submersão das esferas em água revela que solos erodíveis se desintegram facilmente em água e em curto período de tempo, da ordem de poucos minutos, sendo o resultado a formação de pasta ou partículas, enquanto que solos resistentes se mantêm intactos ou se rompem em blocos milimétricos, mesmo após grandes intervalos de interação (Figura 5. 12). Isto acontece devido a estrutura majoritariamente microporosa dos solos erodíveis (conforme Figura 5.2), somado ao processo acelerado de saturação, que aumentam a pressão sobre a fase gasosa, superando a coesão entre as partículas, levando a desagregação do material.



Figura 5.12 – Diferenças entre os produtos da interação das esferas após imersão em água. A) Amostra OBRHS. B) Amostra OBRHI.

Os testes de resistência ao esmagamento (RE) e produto de interação com a água realizado nas esferas de solo visam fornecer informações adicionais sobre o comportamento dos solos. Em síntese, solos resistentes apresentam alta, ao passo que solos erodíveis apresentam baixa resistência, sendo possível romper o material por pressão entre os dedos.

Em resumo, o método expedito das pastilhas se apresenta promissor na avaliação da erodibilidade, uma vez que, de modo simplificado, permite a análise de diversos parâmetros que intervêm no processo erosivo, além de permitir distinção de comportamento dos solos em relação a estes processos.

5.3.3 Critério de erodibilidade MCT (P_{iM}/s)

A Tabela 5.9 apresenta os dados da perda de massa por imersão modificada (P_{iM}), coeficiente sorção (s) e a relação P_{iM}/s para os horizontes estudados nas condições de umidade natural e secos ao ar. O coeficiente de sorção tem o objetivo de quantificar a velocidade de ascensão capilar em amostras de solo, associando o processo de infiltrabilidade do fluxo de água que ascende pela amostra por meio de tensões capilares (Paes, 2017).

As perdas de massa se mostraram bem diferentes entres os horizontes resistentes e suscetíveis a erosão, de maneira que esta variável pode ser considerada fundamental para a utilização deste critério. Os horizontes resistentes apresentaram perdas de massa máximas em torno de 15 %, tanto para as condições seca ao ar quanto em umidade natural, enquanto os horizontes erodíveis apresentaram valores elevados, que chegam aos 80 %. Esta perda de material acentuada nos horizontes erodíveis se deve a presença de minerais micáceos e a baixa coesão, características também identificadas no ensaio MCT convencional e pelo método expedito das pastilhas.

Conforme o esperado, os coeficientes de sorção apresentam relação com o teor de umidade inicial da amostra, de modo que os valores obtidos para as amostras secas ao ar se mostraram superiores. Entretanto, o coeficiente de sorção considerado de forma isolada apresenta comportamento diferenciado quando relacionado a erodibilidade, pois esperava-se que o aumento deste parâmetro na condição seca ao ar implicaria em

diminuição da perda de massa devido as condições de sucção existentes. Este resultado se associa com distribuição de poros, principalmente dos microporos, e do processo acelerado de saturação. Neste contexto, a rápida saturação pode gerar pressão positiva na fase gasosa, superando as forças de coesão entre as partículas e resultando em maiores perdas de massa, mesmo em baixos teores de umidade.

Tabela 5.9 – Critério de Erodibilidade MCT para os horizontes estudados.

Horizonte	Umidade natural			Seco ao ar		
	Pi _M (%)	s (cm ² /√min)	Pi _M /s	Pi _M (%)	s (cm ² /√min)	Pi _M /s
ITAHS	0,952	0,234	4,068	2,704	0,219	12,347
ITAH I	75,410	0,341	221,144	27,003	0,433	62,363
VARHS	3,393	0,141	24,065	1,798	0,211	8,523
VARHI	72,530	0,289	250,969	78,854	0,275	286,742
OBRHS	0,227	0,362	0,627	0,500	0,465	1,075
OBRHI	46,273	0,203	227,946	72,864	0,491	148,399
MRNHS	1,329	0,381	3,488	0,990	0,517	1,915
MRNHI	63,510	0,355	178,901	82,310	0,656	125,473
ALGHS	7,310	0,248	29,476	1,350	0,280	4,821
ALGHI	69,170	0,406	170,369	76,950	0,441	174,490
PTOHS	8,950	0,388	23,067	5,080	0,415	12,241
PTOHI	64,256	0,153	419,977	78,199	0,307	254,720
ATPHS	0,940	0,593	1,585	12,180	0,775	15,716
ATPH I	65,600	0,087	754,023	44,450	0,247	179,960
LVNHS	0,611	0,207	2,952	2,512	0,187	13,433
LVNHI	30,750	0,618	49,757	33,481	0,559	59,894
AMFHS	15,630	0,645	24,233	16,680	0,745	22,389
AMFHI	20,280	0,231	87,792	15,166	0,303	50,053
CNGHS	10,208	0,356	28,674	0,710	0,393	1,807
CNGHI	70,180	0,555	126,450	82,310	0,470	175,128

Considerando as relações Pi_M/s definidas por Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992) pode-se ter uma resposta conjunta para o comportamento dos solos para a condição de umidade natural (Figura 5.13) e seco ao ar (Figura 5.14).

Solos resistentes à erosão apresentam $0,627 < Pi_M/s < 29,476$, enquanto os horizontes erodíveis $49,757 < Pi_M/s < 754,023$, portanto, as metodologias demonstraram eficiência na distinção entre horizontes resistentes e erodíveis, sendo que o critério definido por Pejon (1992) conseguiu distinguir todas as amostras estudadas.

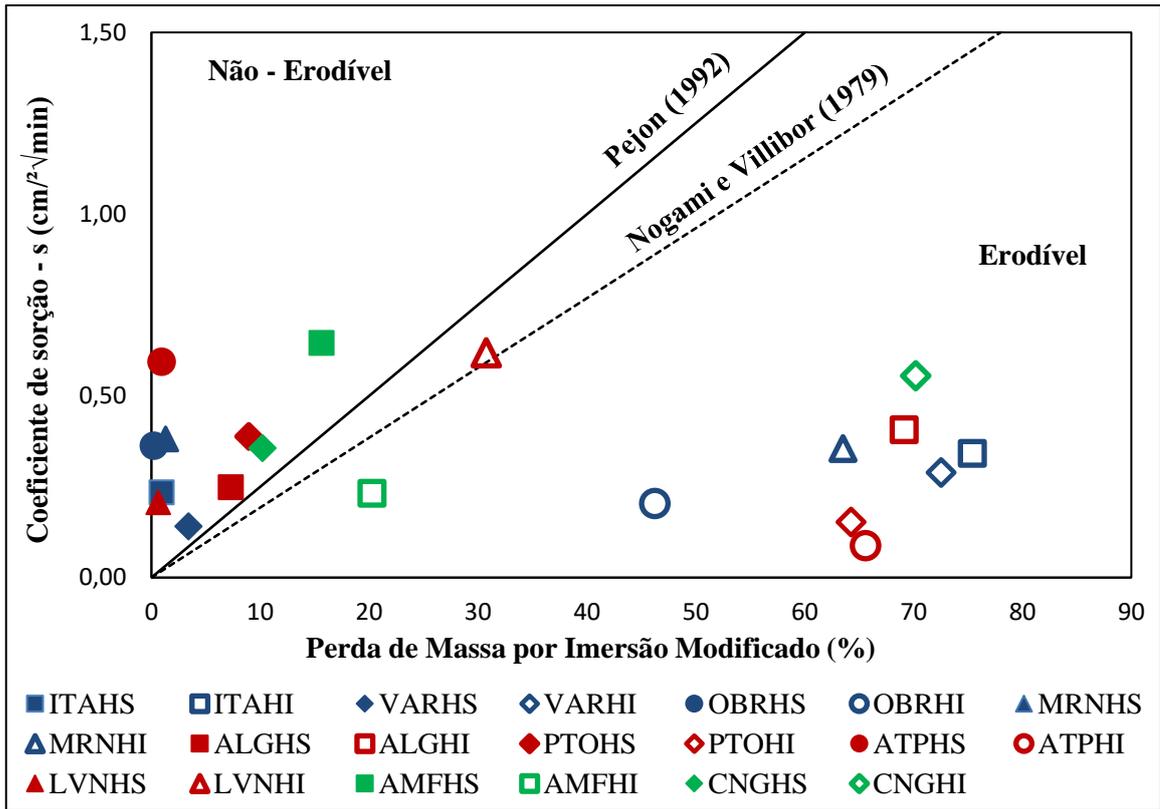


Figura 5.13 – Critério de erodibilidade MCT (condição de umidade natural).

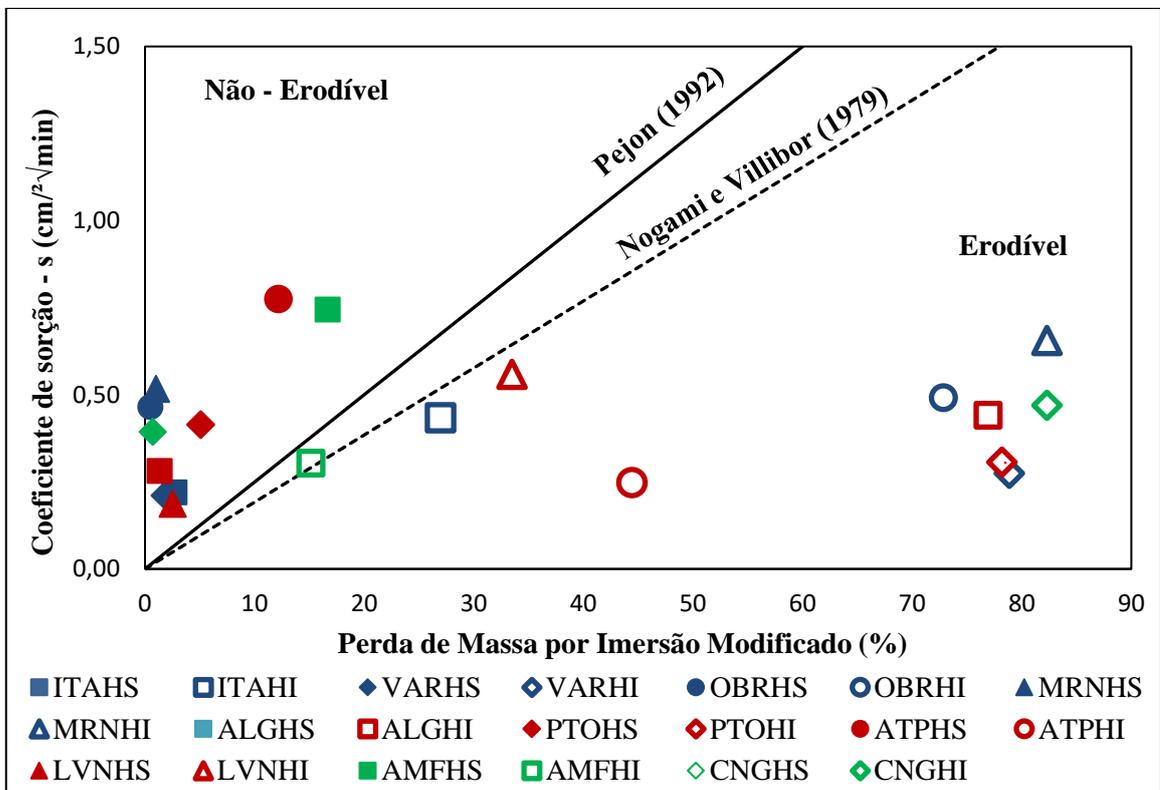


Figura 5.14 – Critério de erodibilidade MCT (condição seca ao ar).

As observações encontradas se assemelham a outros resultados encontrados na literatura, como Alcântara (1997), Bastos (1999), Menezes e Pejon (2010), Fernandes (2011) e Paes (2017), que consideram os critérios válidos para a distinção de comportamentos de solos frente erosão.

Os horizontes erodíveis apresentam tendência de aumento de perda de massa na condição seca ao ar, associando a distribuição de poros, geralmente microporosa, e a pressão na fase gasosa. Desta forma, quanto menor o teor de umidade destes solos no início do evento chuvoso maior poderá ser a sua perda de material. Observações similares foram encontradas nos trabalhos de Menezes e Pejon (2010) em solos dos municípios de São Carlos e São Pedro no estado de São Paulo.

5.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA “IN SITU”

Esta seção se dedica a avaliação da resistência em campo por meio do penetrômetro de bolso e do mini *vane test*, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 4. Primeiramente foram avaliados os resultados da resistência a penetração por meio de equipamento portátil, sendo mensurada a sua resistência em 10 pontos distintos sob a condição de superfície natural e com remoção da camada superficial de cerca de 2,0 cm. A partir dos resultados foram calculadas as resistências médias (τ_P), o desvio padrão médio (DP) e a diferença de resistência entre a condição natural e de remoção ($\Delta\tau_P$), conforme a Tabela 5.10.

Os horizontes resistentes aos processos erosivos apresentaram resistência elevada a penetração, superando o limite máximo do penetrômetro portátil (4,5 kg/cm²), portanto, nestes casos, foi considerado o valor máximo registrado pelo equipamento, ou seja, 4,5 kg/cm². Logo, por não conseguir quantificar precisamente os valores elevados de resistência a penetração, pode-se dizer que o penetrômetro portátil pode ser utilizado para investigação da erodibilidade de forma qualitativa.

As resistências médias dos horizontes superiores, mesmo limitadas pela capacidade de leitura do equipamento, foram maiores, tanto para as condições natural quanto de remoção da camada superficial. Ainda considerando estes horizontes, verifica-se que os

valores obtidos são mais consistentes, ou seja, possuem menor dispersão, indicando que a resistência a erosão é igualmente distribuída ao longo de todo o talude. Desta forma, mesmo de forma qualitativa, este ensaio se mostra promissor na indicação de solos potencialmente resistentes ao processo erosivo.

Tabela 5.10 – Avaliação da resistência a penetração para os horizontes estudados

Horizonte	Natural		Remoção		$\Delta \tau_P$ (kg/cm ²)
	τ_P (kg/cm ²)	DP	τ_P (kg/cm ²)	DP	
ITAHS	4,50	0,000	4,45	0,158	0,05
ITAH I	2,20	0,654	3,13	0,860	-0,93
VARHS	4,45	0,158	4,30	0,350	0,15
VARHI	3,05	0,926	2,85	0,784	0,20
OBRHS	4,50	0,000	3,88	0,475	0,63
OBRHI	3,08	0,913	2,55	0,705	0,53
MRNHS	4,20	0,422	3,83	0,374	0,38
MRNHI	2,70	0,798	2,13	0,930	0,58
ALGHS	4,45	0,158	4,35	0,242	0,10
ALGHI	2,30	0,665	2,10	0,689	0,20
PTOHS	4,50	0,000	4,45	0,000	0,05
PTOHI	2,40	0,994	2,15	1,022	0,25
ATPHS	4,50	0,000	4,25	0,486	0,25
ATPH I	3,50	1,080	2,55	0,734	0,95
LVNHS	4,50	0,000	4,40	0,000	0,10
LVNHI	1,93	0,913	2,28	0,692	-0,35
AMFHS	4,50	0,000	4,45	0,158	0,05
AMFHI	3,50	0,882	3,20	0,978	0,30
CNGHS	4,50	0,000	4,38	0,460	0,13
CNGHI	3,63	0,945	4,00	0,782	-0,38

Com a retirada do solo superficial observa-se propensão a diminuição da resistência, evidenciando a importância desta fina camada na resistência de solos frente ao processo erosivo, verificado pelo parâmetro $\Delta \tau_P$ (τ_P natural - τ_P remoção). Nos horizontes superiores (HS), este resultado se relaciona ao efeito de selagem superficial, que confere grande resistência a penetração e estabilidade frente ao impacto das gotas de chuva durante a precipitação. Observa-se também que o decréscimo de resistência para os horizontes superiores é menor, indicando que, mesmo com a retirada da camada superficial, estes solos apresentam baixa suscetibilidade ao destacamento pela ação das gotas de chuva.

Os horizontes ITAHI, LVNHI e CNGHI apresentaram $\Delta\tau_P$ negativo, ou seja, a resistência após a remoção da camada superficial é maior que em superficial natural, fato decorrente do horizonte C e/ ou saprolito em questão apresentar feições alteradas da rocha de origem subjacentes a parcela removida, e, assim, se mostram em grau de menor alteração que a fina camada superficial. No entanto, vale ressaltar que alteração da camada superficial se dá de forma acelerada resultando em intenso potencial de desagregação desse material.

Ao contrário do observado pelo penetrômetro portátil, foi possível abordar, de forma quantitativa, os resultados provenientes do ensaio de mini *vane test*, a partir das 10 repetições e das respectivas umidades determinadas em campo. Sob o contexto geral, ou seja, considerando todas as amostras, as umidades exerceram pouca influência nos valores de resistência *in situ* (S_I), considerando horizontes superiores e inferiores, conforme pode ser verificado na Figura 5.15.

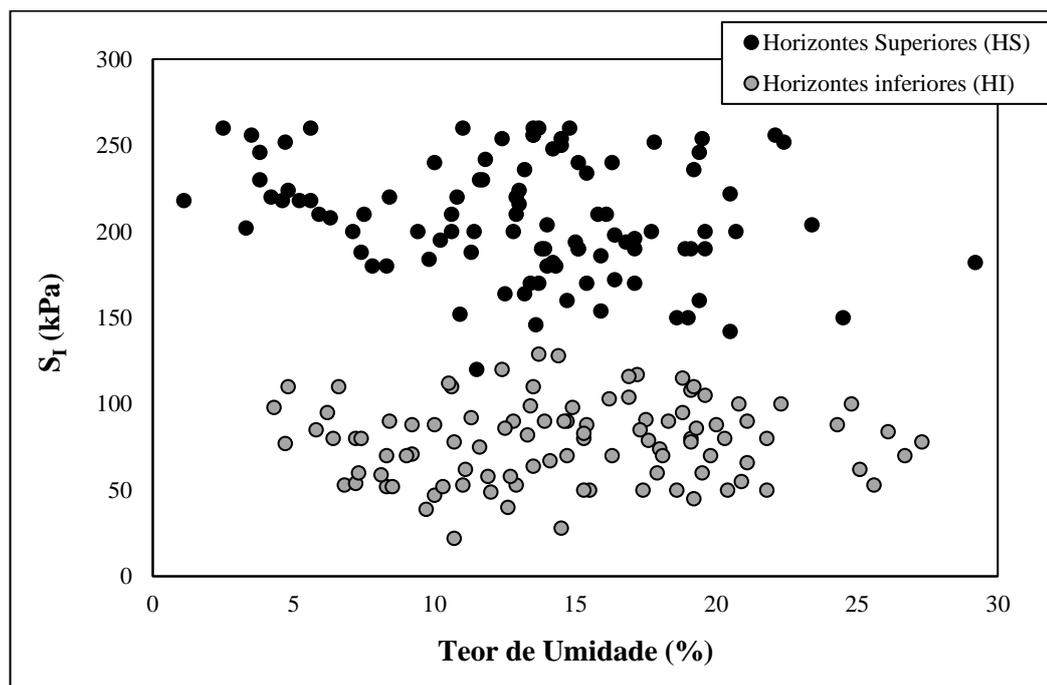


Figura 5.15 – Influência de teor de umidade na “*in situ*” (S_I).

Entretanto é necessário avaliar considerando as particularidades de cada perfil pedológico e de cada horizonte amostrado. Desta forma, a Figura 5.16 retrata a influência do teor de umidade nos diferentes horizontes do talude ITA. Para o solo resistente (HS), a influência dos conteúdos de água nos valores de S_I é baixa, uma vez que a forte agregação existente,

resultado das concentrações de argila e dos teores elevados de ferro e alumínio, se torna preponderante em relação as forças de sucção e possíveis problemas ocasionados a pressão na fase ar. Entretanto, no solo erodível (HI) o valor de S_I apresenta maior associação ao teor de umidade, indicando que o aumento do conteúdo de água, em conjunto com a matriz microporosa, são responsáveis pela colapsibilidade e desestruturação do material.

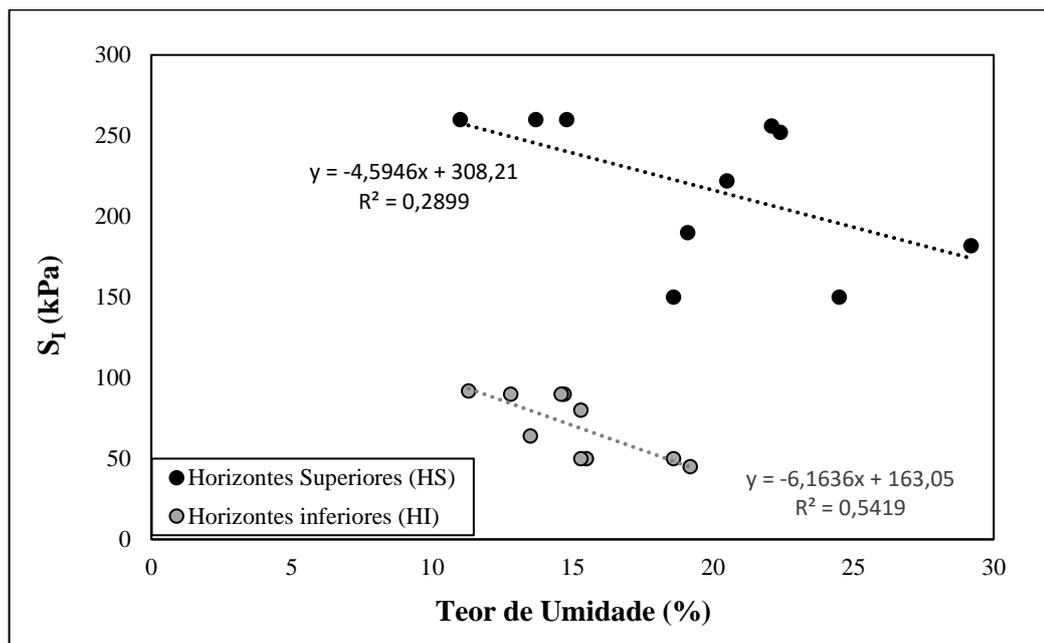


Figura 5.16– Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude ITA.

Os gráficos demonstrando as associações entre S_I e o conteúdo de água para as demais amostras encontram-se sistematizados no Apêndice C. De maneira geral, a associação entre S_I e o teor de umidade não é observada para todas as amostras estudadas, indicando que o conteúdo de água não poder ser analisado como fator determinante da resistência “*in situ*”. Entretanto, a associação entre as duas variáveis tende a ser maior nos solos erodíveis (HI), principalmente pela perda de coesão em maiores conteúdos de água.

Alguns solos apresentaram relação direta entre S_I e o teor de umidade, o que pode ser explicado pela sua maior densidade, associado aos efeitos da capilaridade e da sucção atuante, que conferem maior estabilidade a estrutura do solo (Rocha *et al.*, 2002). Adicionalmente, Bryan (2000) afirma que os efeitos da umidade na resistência ao cisalhamento podem ser positivos ou negativos, tornando complexa uma resposta precisa.

Os valores de S_I obtidos foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e organizados em um boxplot (Figura 5.17), onde é possível visualizar valores máximos, mínimos, média, mediana e características referentes a dispersão dos dados. Em uma primeira análise, verifica-se que os horizontes superiores (HS) apresentam a maior S_I , porém com maior distância interquartil e média afastada da mediana, ou seja, com maior dispersão. Esta condição acontece devido a variação da agregação e dos processos de selagem superficial, os quais não ocorrem de maneira uniforme ao longo do horizonte. Somando-se a essa condição encontra-se o teor de umidade, associado à geometria do talude e face exposta ao sol, de maneira que a incidência dos raios solares não se dá de maneira homogênea ao longo do talude resultando em manchas de umidade em determinados pontos, provavelmente relacionadas à variabilidade estrutural do maciço.

Além disso, ressalta-se que a resistência destes solos foi determinada a partir de condições não saturada, de forma que a sucção mátrica (ψ_m) exerça papel fundamental. No caso dos solos resistentes (HS), são verificadas maiores sucções com a dessaturação, principalmente nos horizontes provenientes de Latossolos, ou seja, confirmando sua relação direta com a resistência “*in situ*”.

Em contrapartida, os horizontes inferiores apresentam menores valores de S_I , acompanhados de menor dispersão dos dados, devido à proximidade entre média e mediana. Em algumas amostras (OBRHI e MRNHI) são observados valores extremos, tanto máximos quanto mínimos, os quais refletem pontos isolados que não podem ser considerados como *outliers*. Estes resultados são reflexo das propriedades físicas, químicas e mineralógicas associadas à pedogênese, principalmente no que tange a granulometria, plasticidade, matéria orgânica, distribuição dos poros (predominantemente microporosa) e teores de óxidos de ferro e alumínio.

Ainda considerando a Figura 5.17, verifica-se a existência de um valor crítico de resistência de S_I próximo a 125 kPa que permitiria diferenciar solos resistentes dos erodíveis. Com intuito de verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre as amostras foi utilizado o Teste de Tukey para médias independentes ao nível de significância de 5,0 % (Tabela 5.11).

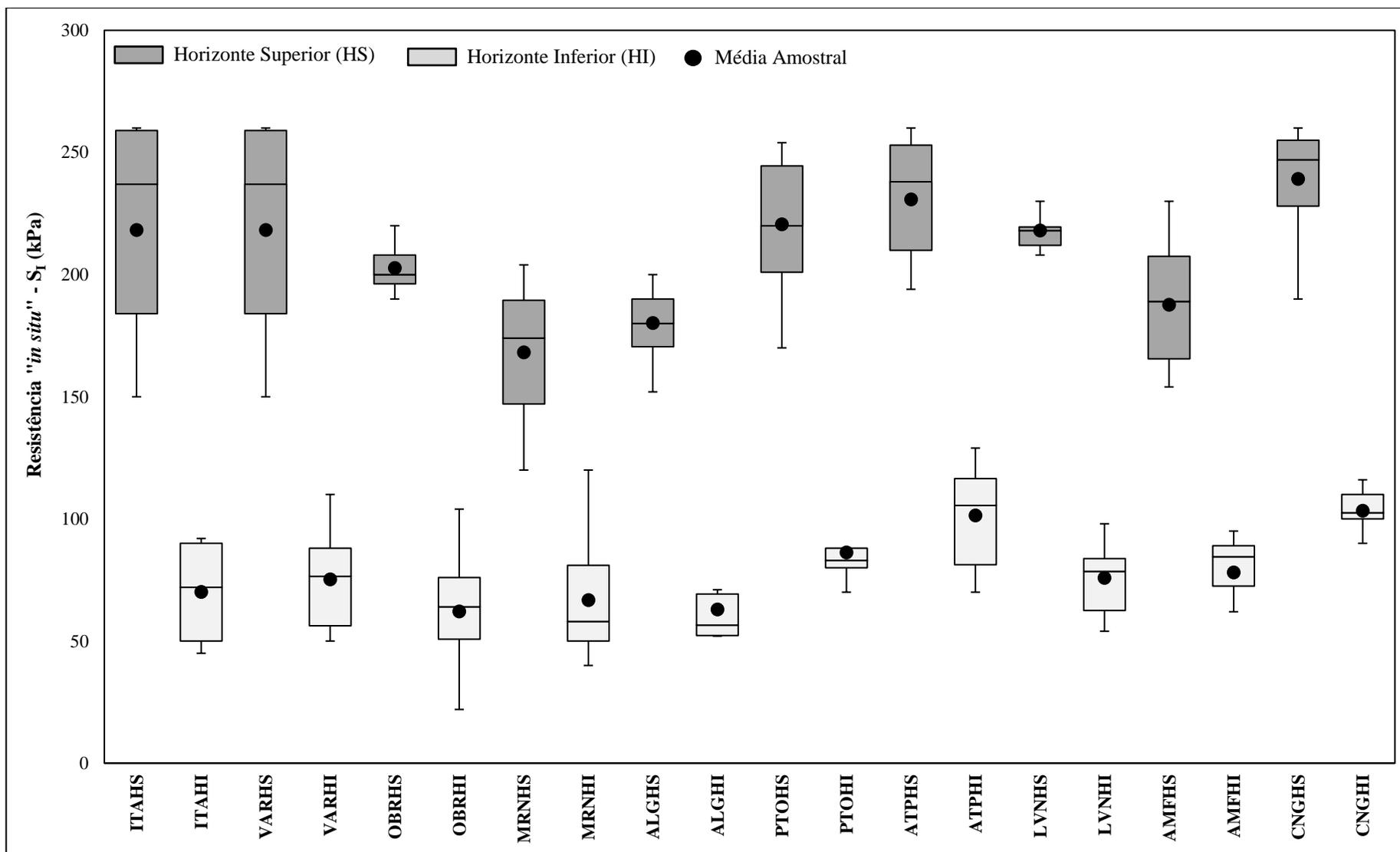


Figura 5.17 – Boxplot para a resistência "in situ" (S_I), considerando a diferenciação entre cada uma das amostras estudadas.

Tabela 5.11 – Teste de Tukey para médias independentes, considerando todas as amostras.

Amostra	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Agrupamento	Intervalo de Confiança	
HS	CNG	190,00	260,00	239,20	A	223,55 - 254,85
	ATP	194,00	260,00	230,80	A B	212,95 - 248,65
	PTO	170,00	254,00	220,60	A B C	200,88 - 240,32
	ITA	150,00	260,00	218,20	A B C D	185,10 - 251,30
	LVN	208,00	230,00	218,00	A B C D	203,85 - 232,15
	VAR	150,00	260,00	210,20	A B C D	186,70 - 233,70
	OBR	190,00	220,00	202,70	B C D	194,95 - 210,45
	AMF	154,00	230,00	187,60	B C D	169,57 - 205,63
	ALG	152,00	200,00	180,20	C D	169,61 - 190,79
	MRN	120,00	204,00	168,20	D	148,37 - 188,03
HI	CNG	90,00	116,00	103,30	E	96,92 - 109,68
	ATP	70,00	129,00	101,40	E F	85,80 - 117,00
	PTO	70,00	88,00	86,20	E F G	76,14 - 96,26
	AMF	62,00	95,00	78,10	E F G	66,01 - 90,19
	LVN	54,00	98,00	75,80	F G	65,07 - 86,53
	VAR	50,00	110,00	75,20	F G	60,15 - 90,25
	ITA	45,00	92,00	70,10	F G	55,70 - 84,50
	MRN	40,00	120,00	66,80	F G	49,57 - 84,03
	ALG	52,00	71,00	62,90	G	52,24 - 73,56
	OBR	22,00	104,00	61,10	G	44,01 - 80,19

É possível afirmar que a média de S_I nos horizontes superiores (assinalados com as letras A, B, C e D) é maior que a média dos horizontes erodíveis (assinalados com as letras E, F e G), indicando que a resistência “*in situ*”, determinada pelo mini vane test, pode ser utilizada para aferir a suscetibilidade dos solos aos processos erosivos.

Analisando a Tabela 5.11 também é possível verificar que o mínimo valor alcançado para um solo resistente a erosão foi de 120 kPa (MRNHS), e o máximo para um solo erodível foi igual a 129 kPa (ATPHI), ou seja determinações isoladas não representam de maneira consistente a resposta do solo frente a erosão, sendo necessário um número de repetições, sugerindo-se no mínimo 10 conforme realizado neste estudo. Entretanto, verifica-se que os solos resistentes apresentaram médias e intervalos de confiança (considerando 95.0 %) superiores a 148 kPa.

Com intuito de produzir uma análise mais objetiva e consistente, as amostras foram classificadas em dois grandes grupos de acordo com a sua resposta aos processos erosivos: Horizontes Superiores (HS) e Horizontes Inferiores (HI), seguidos de uma nova análise de variância e da construção de um novo Boxplot (Figura 5.18).

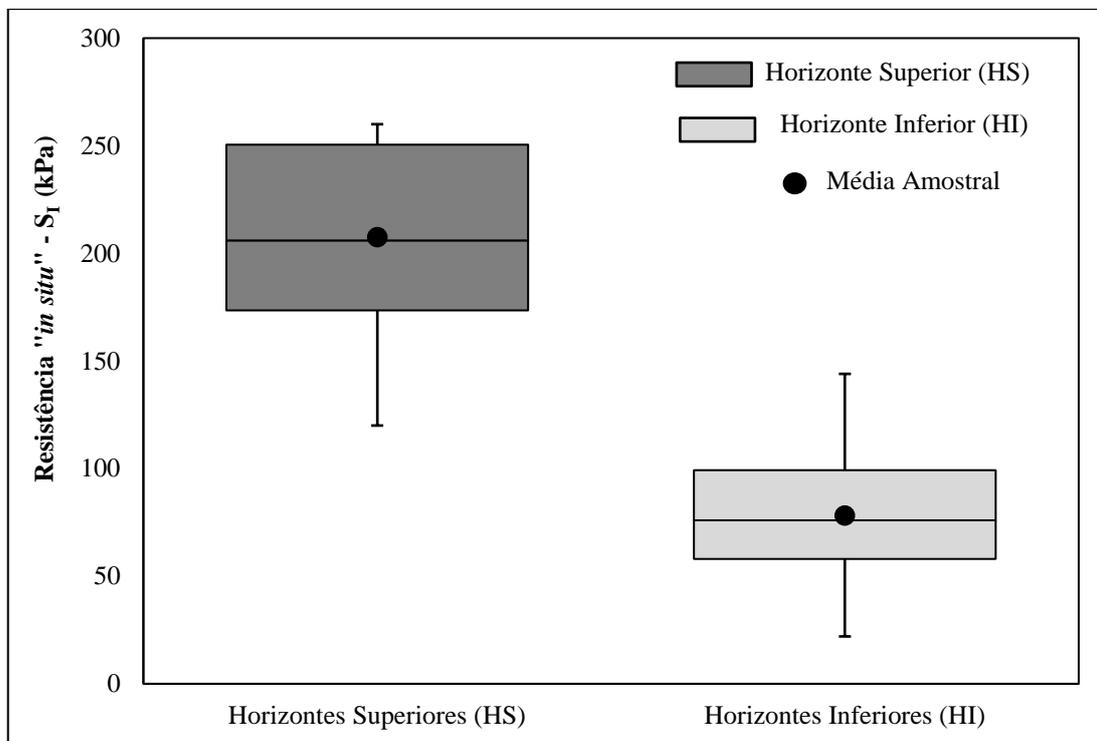


Figura 5.18 – Boxplot para a resistência “*in situ*” (S_I), considerando agrupamento das amostras apenas em horizontes superiores (HS) e inferiores (HI)

Para os horizontes superiores foram encontradas resistência média variando $120,00 < S_I < 260,00$ kPa, enquanto nos solos inferiores os valores ficaram compreendidos entre $22,00 < S_I < 129,00$ kPa, reafirmando que a baixa resistência “*in situ*” está associada ao início do processo erosivo. Os resultados apresentam tendências semelhantes aos apresentados na Figura 5.17, onde os horizontes superiores apresentam maior S_I seguidos de maior distância interquartil, entretanto é possível observar que a média nestes solos se assemelha a mediana, indicando que a dispersão é menor, diminuindo a interferência de determinações pontuais, como no caso das amostras ITAHS e VARHS principalmente.

Analogamente, foi verificada a existência de diferença estatisticamente significativa entre os horizontes superiores e inferiores por meio do Teste de Tukey para médias independentes ao nível de significância de 5,0 % (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Teste de Tukey para médias independentes, considerando agrupamento em Horizontes Superiores (HS) e inferiores (HI).

Amostras	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Agrupamento	Intervalo de Confiança
Horizontes Superiores	120,00	260,00	207,57	A	200,91 - 214,23
Horizontes Inferiores	22,00	129,00	78,19	B	73,67 - 82,71

Com este teste é possível verificar que a média dos horizontes superiores (HS) difere estatisticamente da média dos horizontes inferiores (HI), ou seja, os resultados demonstram que solos com maior S_f são mais resistentes aos processos erosivos. Adicionalmente, verifica-se que para um extenso conjunto de dados os solos HS apresentam 95,0 % dos valores da média acima de 200 kPa, em contrapartida nos solos HI estes valores são inferiores a 100 kPa.

A resistência “*in situ*”, determinada pelo *vane test*, apresenta-se promissora na determinação de solos potencialmente erodíveis, principalmente por se relacionar a propriedades associadas à suscetibilidade a erosão, sendo mais comum a distribuição de partículas, plasticidade, estrutura, agregação, conteúdo de matéria orgânica e permeabilidade. No intuito de avaliar a influência destas propriedades, foi construída uma matriz de correlação linear baseada em coeficientes de Pearson seguida de teste de significância, associando S_f e os principais parâmetros que distinguiram os horizontes superiores (HS) dos inferiores (HI), conforme a Tabela 5.13. Para tal foram considerados: os conteúdos de Argila (A), de Silte (S), de Areia Fina (AF), LL, IP índice de vazios (e), DMG_U , IEA-G, coeficientes c' e e' da classificação MCT, contração (C %) e inchamento (I %) determinados pelo método expedito das pastilhas MCT, percentual de óxidos de silício (% SiO_2) e de ferro (% Fe_2O_3), coeficientes de intemperismo K_i e K_r , Δ pH, matéria orgânica (M.O.) e a CTC_t .

As partículas finas apresentam correlações significativas com S_f , onde maiores teores de argila se associam à maiores resistências ($r = 0,845$, $p < 0,01$), enquanto os percentuais de silte são responsáveis pela diminuição da mesma ($r = - 0,650$, $p < 0,01$). Conforme explicado anteriormente, a fração argila é responsável pela maior coesão e agregação das partículas do solo (Cassol *et al.*, 2018; Shahabinejad *et al.*, 2019), enquanto que o inverso é observado para a fração silte, geralmente associada a baixa estabilidade de agregados em água (Wischmeier *et al.*, 1971; Ampontuah *et al.*, 2006).

Tabela 5.13 – Correlação entre S_I e as principais propriedades físicas e químicas dos solos.

	S _I	A	S	AF	e	LL	IP	DMG _U	IEA _G	c'	e'	C (%)	I (%)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K _i	K _r	Δ pH	M.O.	
A	0,845 **	1																		
S	-0,650 **	-0,738 **	1																	
AF	-0,476 *	-0,664 **	0,131	1																
e	0,496 *	0,511 *	-0,029	-0,546 *	1															
LL	0,499 *	0,556 *	-0,147	-0,564 *	0,655 **	1														
IP	0,778 **	0,676 **	-0,550 *	-0,297	0,451 *	0,770 **	1													
DMG _U	0,915 **	0,853 **	-0,713 **	-0,417	0,473 *	0,614 **	0,860 **	1												
IEA-G	0,911 **	0,848 **	-0,754 **	-0,389	0,419	0,498 *	0,806 **	0,985 **	1											
c'	0,661 **	0,692 **	-0,504 *	-0,399	0,427	0,501 *	0,634 **	0,67 **	0,66 **	1										
e'	-0,713 **	-0,670 **	0,526 *	0,377	-0,317	-0,322	-0,590 **	-0,68 **	-0,68 **	-0,71 **	1									
C (%)	0,542 *	0,606 **	-0,138	-0,703 **	0,616 **	0,872 **	0,702 **	0,622 **	0,53 *	0,51 *	-0,39	1								
I (%)	-0,831 **	-0,760 **	0,727 **	0,312	-0,283	-0,248	-0,555 *	-0,79 **	-0,82 **	-0,554 *	0,70 **	-0,26	1							
% SiO ₂	-0,546 *	-0,626 **	0,294	0,597 **	-0,386	-0,162	-0,129	-0,37	-0,37	-0,41	0,59 **	-0,23	0,63 **	1						
% Fe ₂ O ₃	0,496 *	0,545 *	-0,379	-0,391	0,356	0,061	0,137	0,340	0,36	0,55 *	-0,69 **	0,13	-0,60 **	-0,90 **	1					
K _i	-0,557 *	-0,632 **	0,173	0,699 **	-0,390	-0,307	-0,186	-0,37	-0,37	-0,40	0,42	-0,35	0,57 **	0,88 **	-0,64 **	1				
K _r	-0,585 **	-0,661 **	0,253	0,643 **	-0,423	-0,321	-0,238	-0,43	-0,41	-0,48 *	0,57 **	-0,39	0,63 **	0,96 **	-0,82 **	0,93 **	1			
Δ pH	0,552 *	0,649 **	-0,719 **	-0,349	0,220	0,141	0,327	0,552 *	0,572 **	0,66 **	-0,62 **	0,23	-0,67 **	-0,58 **	0,75 **	-0,34	-0,52 *	1		
M.O.	0,561 *	0,495 *	-0,221	-0,389	0,401	0,364	0,408	0,505 *	0,47 *	-0,06	-0,27	0,44	-0,46 *	-0,35	0,12	-0,38	-0,36	-0,05	1	
CTC _t	0,447 *	0,487 *	-0,109	-0,451 *	0,423	0,626 **	0,533 *	0,511 *	0,45 *	0,02	-0,24	0,59	-0,32	-0,20	-0,06	-0,36	-0,28	-0,2	-0,85 **	

Onde: * significativo ao nível de 5,0 % de probabilidade
** significativo ao nível de 1,0% de probabilidade

Havaee *et al.* (2015), estudando solos calcários da região central do Irã, também encontrou correlações positivas entre o teor de argila e a resistência ao cisalhamento, principalmente devido ao tamanho coloidal destas partículas, elevada área superficial e um grande número de ligações químicas.

Somando-se ao efeito da distribuição das partículas finas, verifica-se forte influência das propriedades plásticas, principalmente do IP ($r = 0,778$, $p < 0,01$), uma vez que o mesmo apresenta associação com a força coesiva. Bjerrum (1973), analisando casos de rupturas com uso de *vane test*, verificou que os maiores valores para a resistência estavam relacionados aos maiores valores de IP, resultado que o levou a elaborar o fator de correção (μ), considerando ainda os efeitos da anisotropia e do tempo de carregamento em sua análise. Dolinar (2010), a partir do estudo da resistência “*in situ*” normalizada em solos finos, concluiu que a relação entre IP e S_I é diretamente dependente da natureza do argilomineral, verificando que em solos de características expansivas a relação é pouco significativa.

O DMG_U apresenta correlação forte e muito significativa com S_I ($r = 0,915$, $p < 0,01$), uma vez que se encontra diretamente relacionado ao atrito e coesão inter e intra agregados, portanto, quanto maior o diâmetro, maior será o esforço necessário para sua ruptura. A resistência inter agregados corresponde ao atrito entre os agregados do solo (o que acontece em tensões baixas), enquanto a parcela intra agregados é decorrente da ruptura interna e individual o que geralmente ocorre em tensões elevadas (Braidá *et al.*, 2007).

A presença de agregados maiores resulta em aumento da resistência ao escoamento superficial, ao impacto das gotas de chuva, além de facilitar a infiltração de água nas camadas subjacentes. Vaezi e Sadeghi (2011), a partir de estudos em solos da região semiárida do Irã encontraram forte coeficientes de correlação entre o diâmetro dos agregados (DMP e DMG) e a erodibilidade.

Neste mesmo contexto insere-se a estabilidade de agregados (IEA-G) apresentando também correlação forte e muito significativa com S_I ($r = 0,911$, $p < 0,01$). Esta propriedade é muito importante nos solos erodíveis, onde a baixa estabilidade em água leva a ruptura dos eventuais agregados e pacotes de argila existentes, principalmente pelo impacto das gotas de chuva, resultando na diminuição da porosidade, e conseqüentemente das taxas de infiltração que aumentam o escoamento superficial (Fu *et al.*, 2017, Vaezi *et al.*, 2018).

Os resultados demonstram que os solos mais intemperizados apresentam maiores valores de S_I , conforme pode ser verificado pela relação negativa com os coeficientes K_i ($r = -0,557$, $p < 0,05$) e K_r ($r = -0,585$, $p < 0,05$). Deng *et al.* (2017), estudando voçorocas no sul da China, encontrou que o grau de intemperismo se relaciona com o índice de plasticidade (IP) e agregação, de maneira que os maiores valores de IP se relacionam as camadas superficiais, mais evoluídas, enquanto que os solos subsuperficiais, com menores valores de IP, apresentam menor coesão e maior tendência ao colapso. Adicionalmente, solos menos evoluídos possuem maiores percentuais de silte (Tabela 5.13), apresentando menor grau de estruturação, com conseqüente redução do contato entre os grãos e menores forças de atrito, o que os torna mais propensos a erosão (Rocha *et al.*, 2002).

Adicionalmente, os coeficientes da classificação MCT apresentaram correlação forte e antagônica em relação à resistência “*in situ*”. O coeficiente c' apresentou correlação positiva ($r = 0,661$, $p < 0,01$), enquanto e' apresentou forte correlação negativa ($r = -0,713$, $p < 0,01$), demonstrando que a condição laterítica, associada ao maior grau de intemperismo é responsável por maior S_I .

As propriedades químicas exercem menor influência sobre a resistência “*in situ*” quando comparadas as propriedades físicas. Os resultados demonstram relações positivas para os parâmetros Δ pH ($r = 0,552$, $p < 0,05$), matéria orgânica ($r = 0,561$, $p < 0,05$) e CTC_t ($r = 0,447$, $p < 0,05$). Conforme explicado na seção 5.2.1, o Δ pH pode ser utilizado na identificação do grau de intemperismo dos solos, sendo esta condição relacionado a resistência à erosão. No caso dos solos erodíveis estes valores tendem a ser baixos, principalmente pelo aumento do pH em água que favorece a dispersibilidade de determinados solos. Abedi Koupai *et al.* (2019), estudando argilas naturais encontrou que os parâmetros de compressão não confinada, resistência ao cisalhamento e limite de liquidez variam significativamente com a alteração do pH.

A capacidade de troca catiônica é o reflexo de um conjunto de propriedades dos solos, dentre eles os teores de argila e plasticidade, porém apresentando grande relação com a matéria orgânica ($r = 0,850$, $p < 0,01$). Considerando o teor de matéria orgânica, existe divergência na literatura sobre sua influência nos parâmetros determinantes da resistência ao cisalhamento, onde alguns trabalhos exibem relações significativas positivas (Soane, 1990;

Morgan, 2005) e outras relações negativas ou até sua inexistência (Ekwue, 1990; Hemmat *et al.*, 2010). Havaee *et al.* (2015), não encontrou correlações significativas entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a matéria orgânica, sugerindo que a textura do solo e sua influência na estrutura tenham sido os principais fatores que ocultaram os efeitos da matéria orgânica e demais propriedades químicas.

CAPÍTULO 6

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE

6.1 INTRODUÇÃO

No capítulo 2 foram apresentadas as principais metodologias para a estimativa da erodibilidade em solos. Considerando o enfoque agrônomico, a melhor forma de mensurar as perdas de solo é com uso de parcelas delimitadas em campo sob condições de chuva natural e simulada, acarretando em morosidade e aumento dos custos. Além disso, estas metodologias também se tornam muito limitadas quando se considera o fenômeno da erosão em taludes de corte rodoviários, principalmente pelas elevadas inclinações e pela proximidade às vias de circulação.

Neste cenário, destacam-se as metodologias indiretas para estimativa da erodibilidade em taludes de corte, levando ao desenvolvimento de equipamentos e ensaios específicos. Maior ênfase é dada a ensaios que visam a determinação de perdas de solo em laboratório sob condições controladas, como no caso do ensaio de Inderbitzen e suas variações (seção 2.6.4). As alterações feitas na versão original deste equipamento visaram a praticidade e a simplicidade, com a inserção de outros parâmetros, como variação da inclinação, maior número de corpos de prova e alteração no formato das amostras utilizadas. No entanto, além das perturbações hidráulicas, causadas pelas descontinuidades entre a rampa e a amostra, os procedimentos desenvolvidos também se tornam limitados para aplicação em campo.

Portanto, neste capítulo é apresentada uma metodologia para estimativa da erodibilidade, de modo a reduzir a complexidade operacional na execução do ensaio e na coleta de amostras indeformadas em campo. A metodologia em questão se baseia no equipamento desenvolvido pelo CSIR (Jones *et al.*, 2005; Range e Horak, 2005; Jones, 2007) para determinação da resistência a erosão em pavimentos (conforme apresentado na seção 2.6.4) A escolha deste método como referência se deve à praticidade e às dimensões reduzidas do equipamento, o que permite além de simplicidade operacional, a repetibilidade do ensaio com emprego de várias amostras.

6.2 O EQUIPAMENTO PROPOSTO

A metodologia proposta se baseia na determinação das perdas de solo a partir de amostras indeformadas, colocadas sobre uma rampa e submetidas a aspersão de água constante durante um período de tempo fixo. A erodibilidade do material é determinada pela quantidade de material erodida e coletada por uma peneira fixada abaixo da extremidade da rampa. O equipamento é desmontável, sendo possível a retirada de sua parte superior para encaixe da amostra no fundo da rampa (Figura 6.1 e Figura 6.2).

Para a coleta da amostra indeformada foi confeccionado um amostrador específico, com 50 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura (Figura 6.3). Para a retirada do corpo de prova intacto, o amostrador é bipartido e dotado de anéis para fixação (Figura 6.4). Uma das metades deste amostrador apresenta crivo para fixação na rampa do equipamento. De maneira a facilitar o processo de extração do corpo de prova do amostrador é aplicado uma fina camada de vaselina líquida.

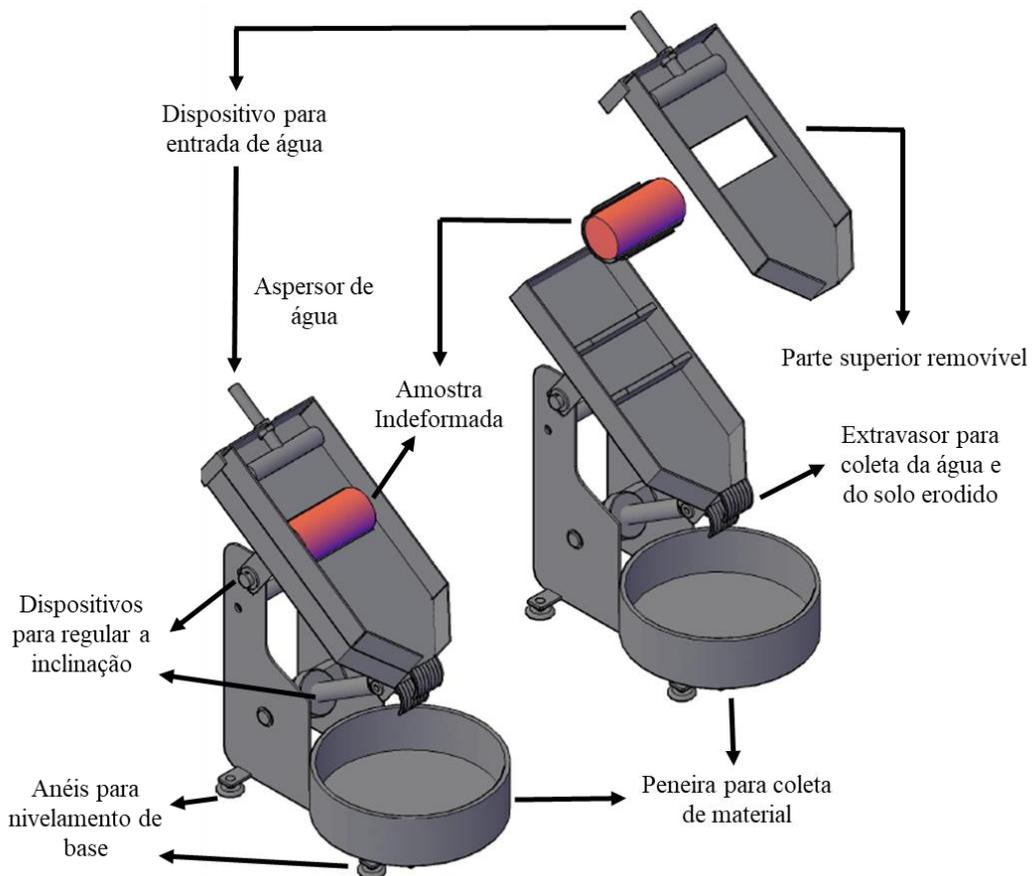


Figura 6.1 – Desenho esquemático do equipamento desenvolvido.



Figura 6.2 – Equipamento desenvolvido para avaliação da erodibilidade.

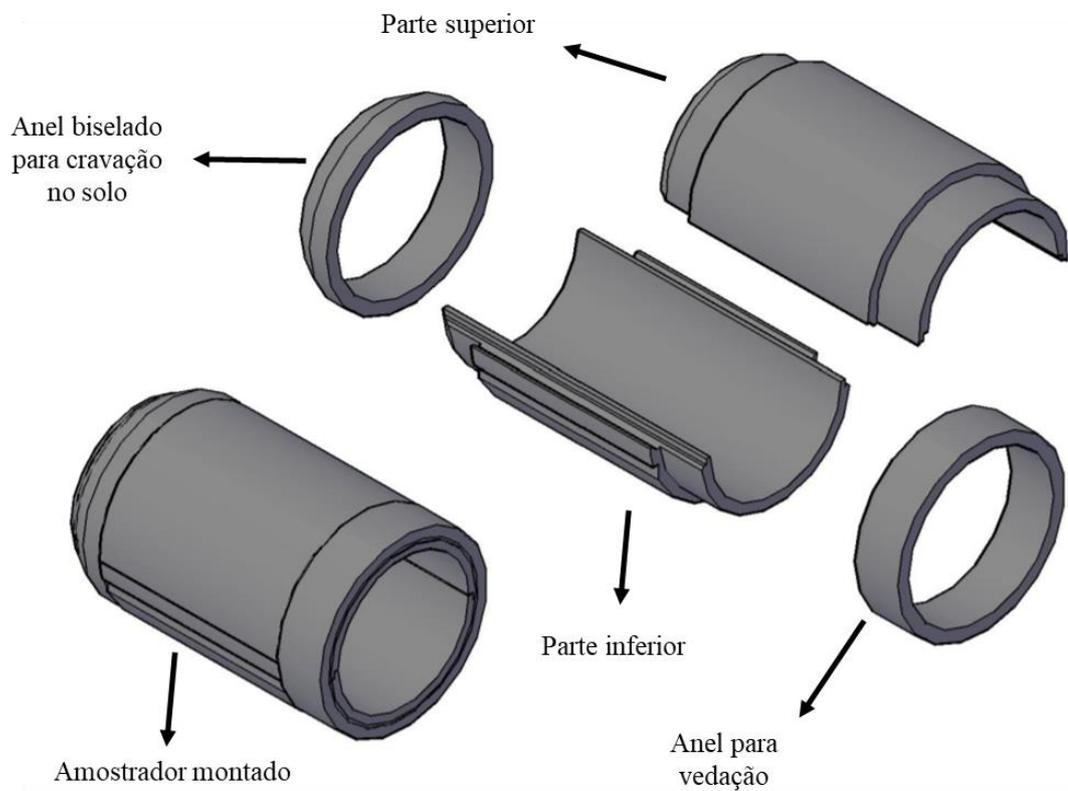


Figura 6.3 – Desenho esquemático do amostrador utilizado no ensaio.



Figura 6.4 – Amostrador utilizado: A) Detalhe das partes componentes; B) Detalhe do crivo utilizado para fixação na parte inferior da rampa.

O equipamento é composto por duas rampas sobrepostas: uma chamada de inferior e a outra de superior. A parte inferior é responsável pela fixação da base corpo de prova, (Figura 6.5), além de coletar água e sedimentos carreados pelo fluxo que percolam pela amostra, conduzindo-os a peneira de coleta.



Figura 6.5 – Parte inferior da rampa: A) Detalhe das hastes para fixação do corpo de prova; B) Posicionamento de uma das partes do cilindro no fundo da rampa.

A parte superior é posicionada de forma que metade do diâmetro da amostra (25 mm) fique acima do nível da rampa (Figura 6.6). Esta metade estará sujeita a aspensão de água, com vazão constante em tempo fixo. Assim, no início do ensaio a perda de solo ocorrerá majoritariamente pelo impacto do jato de água na amostra, com o avanço do ensaio, a amostra será erodida e então o escoamento superficial, em conjunto com a infiltração, terá maior ação na remoção de partículas.

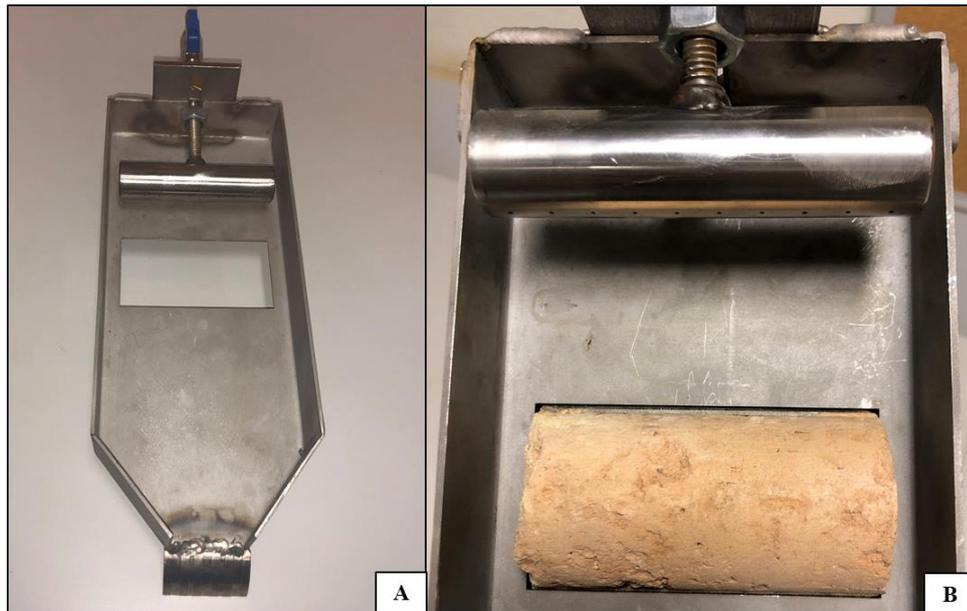


Figura 6.6 – A) Detalhe da parte superior da rampa. B) posicionamento do corpo de prova, onde metade do seu diâmetro fica acima do nível da rampa.

O sistema aspersor é constituído por um tubo metálico perfurado de 105 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro interno, possuindo 10 orifícios igualmente espaçados em 10 mm, onde cada um destes apresenta diâmetro igual a 1 mm (Figura 6.7). O aspersor também apresenta dispositivos para posicionamento vertical e horizontal em relação ao corpo de prova, de forma que a posição correta é aquela onde os jatos de água incidam em arco descendente, evitando-se que os mesmos perfurem a amostra no decorrer do ensaio. Desta forma o impacto dos jatos de água simula o efeito *splash*, sendo posteriormente acompanhado pelo escoamento pela superfície da amostra.

Também é possível fazer ajustes na inclinação do equipamento, por meio de um parafuso de rosca sem fim com ajuste manual (Figura 6.8). A amplitude varia de 0° a 70°, tornando possível o ensaio em diversas situações. Para facilitar o ajuste foi feita uma escala de inclinação na parte lateral do equipamento com marcação a cada 5°.

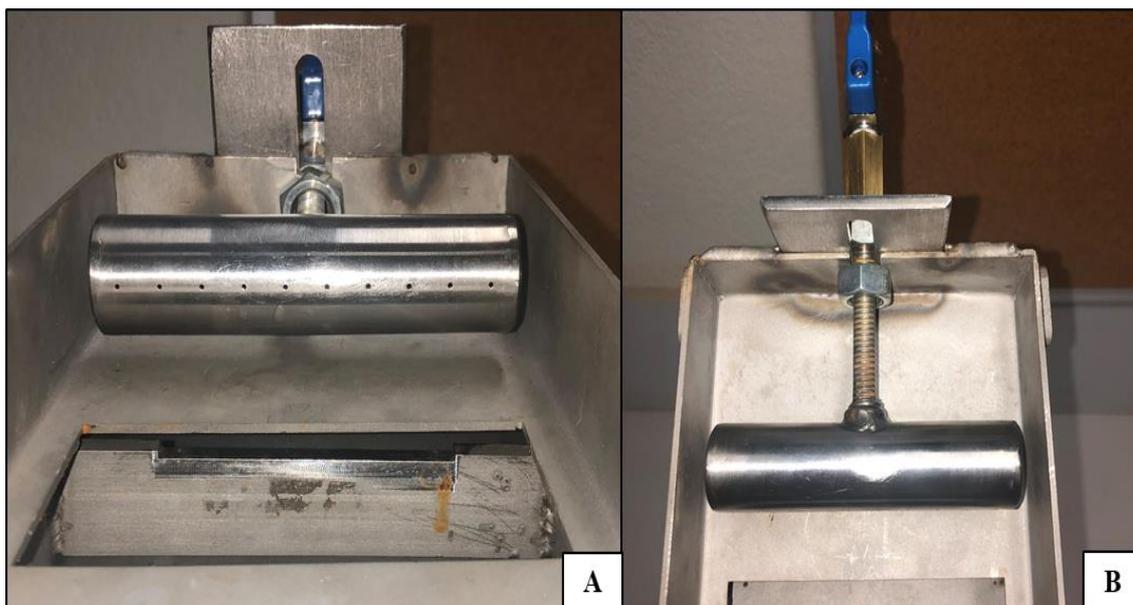


Figura 6.7 – Sistema de aspersão. A) detalhe do sistema de aplicação e dos orifícios. B) Detalhe do sistema de posicionamento.



Figura 6.8 – Ajuste de inclinação. A) parafuso de rosca sem fim. B) escala para aferição do ângulo de inclinação.

O material erodido, pela ação conjunta do impacto dos jatos de água, escoamento superficial e infiltração, é direcionado para uma peneira de coleta. Nesta metodologia foi utilizada uma peneira nº 200 (abertura igual a 0,075 mm) com aplicação de papel filtro, no intuito de considerar todas as partículas carregadas (Figura 6.9). Nos ensaios de Inderbitzen convencional, é considerado apenas o material retido em uma ou em um conjunto de peneiras, sendo posteriormente comparados a análise granulométrica do material de origem.

Para a condução do escoamento para a peneira de coleta, foi instalado um sistema extravasor nas partes inferior e superior da rampa, de modo a evitar o retorno de líquido e perda do material erodido (Figura 6.9). Vale ressaltar que este tipo de sistema foi desenvolvido especialmente para esta finalidade, após alguns testes esta foi a melhor configuração para este componente.



Figura 6.9 – Extravasor para direcionamento do fluxo de água e sedimentos para a peneira de coleta.

O sistema ainda apresenta suporte em sua base que permite o nivelamento do equipamento em qualquer superfície (Figura 6.10), visto que o desnível interfere diretamente na forma como ocorre a aspensão de água.



Figura 6.10 – Dispositivo para nivelamento.

Deste modo, com este erosímetro torna-se possível determinar as perdas de solo em amostras indeformadas, sob condições controladas, que podem também ser avaliadas em campo, devido as dimensões reduzidas e a simplicidade operacional. No entanto, alguns parâmetros necessitam de maior estudo, dentre estes: tempo de duração do ensaio, carga aplicada no sistema de aspersão e condição da amostra (umidade natural ou saturada), no intuito de padronização do método.

6.3 ENSAIOS PARA PADRONIZAÇÃO DO MÉTODO

No intuito de determinar a melhor metodologia para aplicação do erosímetro, foram realizados testes preliminares para a avaliação dos parâmetros mais importantes, que interferem diretamente nas perdas de solo decorrentes da ação erosiva. Desta forma, a amostra ITAHI foi escolhida, devido a sua baixa coesão e facilidade de moldagem, condição que permite a conformação de vários corpos de prova e repetibilidade dos ensaios em curtos intervalos de tempo. A partir desta amostra, foram analisadas as seguintes variáveis:

- Condição inicial da amostra (seca ao ar ou saturada);
- Carga hidráulica aplicada no sistema de aspersão;
- Tempo de duração do ensaio;
- Efeito da declividade;

Nos testes preliminares foram consideradas amostras em duas condições iniciais distintas. A primeira utilizou corpos de prova previamente secos ao ar por um período de 72 horas. A segunda condição aplicada foi a saturação do corpo de prova, por período mínimo 24 horas, utilizando ascensão capilar em pedra porosa. Estas condições foram escolhidas visando a simulação dos efeitos das perdas de solo quando uma precipitação incide em um solo previamente seco, o que acontece no início da estação chuvosa, e também quando o solo está saturado, devido a ocorrência de uma precipitação antecedente. Desta forma, torna-se possível avaliar o efeito da umidade inicial na desagregação do solo durante o ensaio.

Os experimentos foram conduzidos em período máximo de 90 minutos, onde foram contabilizadas as perdas de solos nos intervalos de tempo iguais a: 0,5; 1; 2; 4; 8; 10; 15; 30; 60 e 90 minutos, no intuito de verificar como se processa a perda no tempo.

A carga hidráulica foi avaliada por meio da utilização do permeâmetro de grandes proporções do CTGA/UFOP, com aplicação de cargas constantes iguais a: 0,25; 0,30; 0,35, 0,40 e 0,45 metros. Os ensaios foram realizados para as amostras secas ao ar e saturadas, com inclinação fixa em 35°, sendo os resultados expressos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Estudo dos efeitos da carga aplicada e da condição de umidade inicial nas perdas de solo.

Condição	Carga Hidráulica (m)	Massa Inicial Solo Seco (g)	Umidade Inicial (%) ¹	Massa Erodida Solo Seco (g)	Perda de Solo (%)	Taxa de Perda de Solo (g/min) ²
Seca ao ar (72 horas)	H = 0,25	281,13	1,0	253,21	90,07	2,81
	H = 0,30	261,24	1,1	233,03	89,20	2,59
	H = 0,35	290,46	1,3	248,18	85,44	2,76
	H = 0,40	280,84	1,4	250,13	89,06	2,78
	H = 0,45	259,68	1,4	130,1	50,10	1,45
Saturada (24 horas)	H = 0,25	299,10	27,2	40,21	13,44	0,45
	H = 0,30	287,48	26,0	168,88	58,74	1,88
	H = 0,35	283,93	27,8	227,97	80,29	2,53
	H = 0,40	284,92	24,4	142,85	50,14	1,59
	H = 0,45	273,53	28,8	61,33	22,42	0,68

¹ umidade antes do ensaio

² taxa de perda de solo considerando a duração total do ensaio igual a 90 minutos.

É importante ressaltar que Jones e Ventura (2003), no desenvolvimento do teste de resistência a erosão do CSIR, utilizaram carga constante igual a 1,0 metros, uma vez que as amostras ensaiadas eram submetidas a ação de aditivos, além de previamente compactadas. Portanto, a aplicação desta carga hidráulica em amostras indeformadas é demasiada alta para o estudo em questão.

Por meio dos resultados da Tabela 6.1, verifica-se que para as amostras secas ao ar, as perdas de material foram semelhantes, independentemente das cargas adotadas. Isto

acontece devido à rápida saturação, propiciando a formação de pressão positiva na fase gasosa, superando a coesão entre os agregados e, conseqüentemente, levando o material a ruptura. Esta condição se assemelha as perdas de solo observadas em campo nas primeiras chuvas que sucedem grandes períodos de estiagem.

Uma exceção se deve a maior carga (0,45 m), pois neste teste os jatos do aspersor perfuram a amostra em trajetória reta, sendo que a partir de certo momento não incidem sobre a amostra, sendo impossível adequar o aspersor para uma trajetória descendente sobre o corpo de prova, tanto para as condições seca ao ar como saturada (Figura 6.11), resultando em uma perda de massa inferior quando comparada às demais cargas. Desta forma, cargas iguais ou superiores a 0,45 metros não se adequam ao equipamento proposto.



Figura 6.11 – Teste para carga de 0,45 metros em amostra seca ao ar e saturada

Considerando os ensaios realizados na condição saturada, observa-se uma diferença das perdas de material em função das cargas aplicadas. Para cargas hidráulicas inferiores, como no caso de 0,25 metros, as perdas de solo foram baixas, evidenciado que o teor de umidade exerce influência na coesão e aumento da resistência, sendo que esta carga hidráulica se mostra insuficiente para determinação das perdas de material. Para as maiores cargas (0,40 e 0,45 metros) as perdas também foram inferiores, principalmente pelos problemas de ajuste do fluxo de água sobre a amostra.

A menor perda de material na condição saturada também pode estar relacionada ao processo de saturação, sendo este realizado dentro do amostrador bipartido, principalmente pela alta susceptibilidade ao colapso dos solos erodíveis durante a saturação. Como este material apresenta potencial expansivo é possível que ocorra compressão do corpo de prova (CP) no interior do amostrador, principalmente no contato entre o CP e o amostrador, elevando o atrito entre os mesmos, o que poderia também modificar sua estrutura natural, aumentando a coesão aparente.

De modo a ilustrar as perdas de solo acumulada em função do tempo, foi construído o gráfico da Figura 6.12, considerando as diversas cargas hidráulicas aplicadas, bem como as condições iniciais da amostra, seca ao ar e saturada. Em função dos ensaios realizados, observou-se que a melhor carga para as diversas condições de umidade inicial é aquela igual 0,35 metros, uma vez que cargas inferiores demonstraram baixa energia para erosão da amostra, enquanto que cargas elevadas apresentaram problemas na regulagem da aspersão, minimizando as perdas de solo.

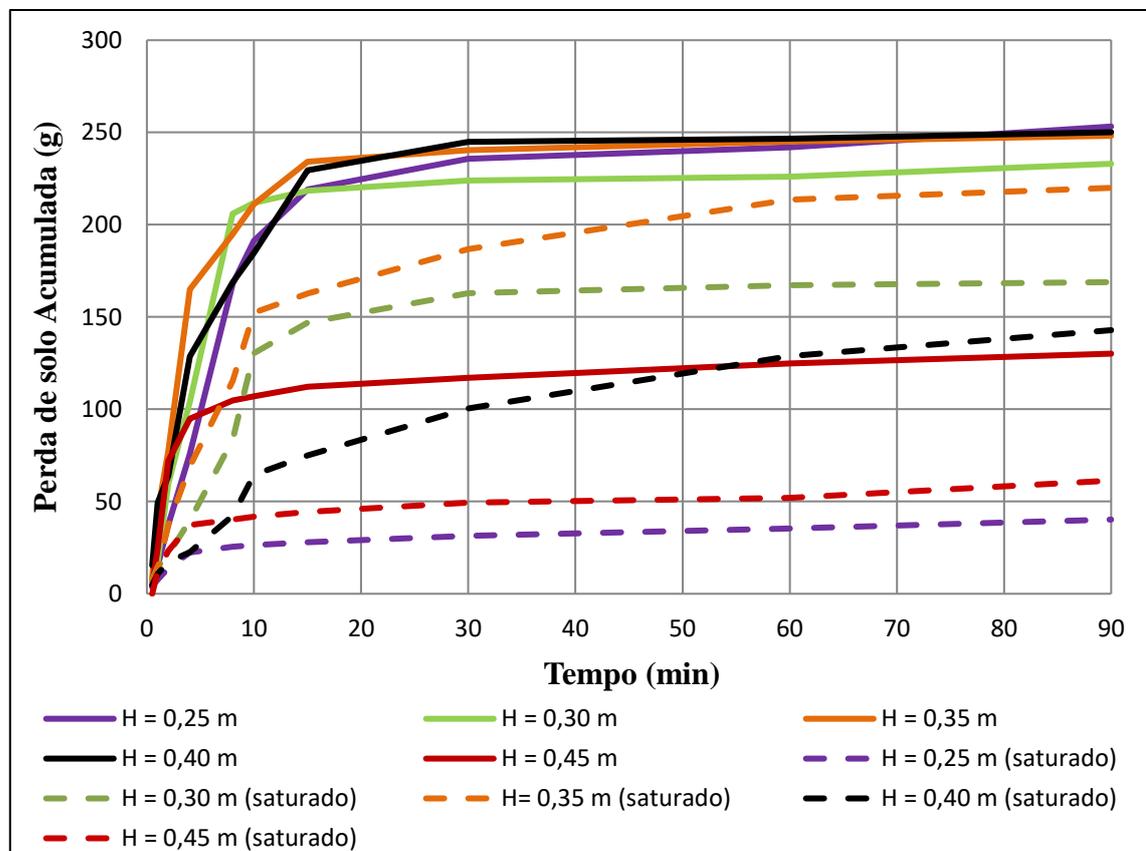


Figura 6.12 – Perda de solo acumulada em função do tempo.

A partir da Figura 6.12 também é possível visualizar que a maior parte das perdas de solo ocorre no início do ensaio, sendo mais acentuadas para as amostras secas ao ar. Conforme demonstrando na seção 5.1.1, este solo apresenta estrutura microporosa, que associada a perda de sucção com umedecimento (Figura 5.1) levam ao colapso do material.

Adicionalmente a esta condição tem-se a pressão na fase ar que supera a coesão entre os grãos/partículas, levando-os a ruptura. Considerando as amostras saturadas, as perdas de solo se processam de forma mais lenta, necessitando de maior tempo de ensaio. Entretanto, para considerar as diversas situações que poderiam ocorrer durante a ação dos jatos de água e do processo de umedecimento, optou-se por considerar 90 minutos de ensaio para todas as amostras.

Também foi avaliado o efeito da declividade nas perdas de material no decorrer do ensaio, em três diferentes inclinações: 35°, 45° e 60° (Figura 6.13). Nota-se que a declividade é pouco importante para as perdas, uma vez que o aspersionador é regulado de maneira que o fluxo incida sempre da mesma maneira sob a amostra. No entanto, é observado que as perdas para as declividades maiores (45° e 60°) se processam mais rapidamente.

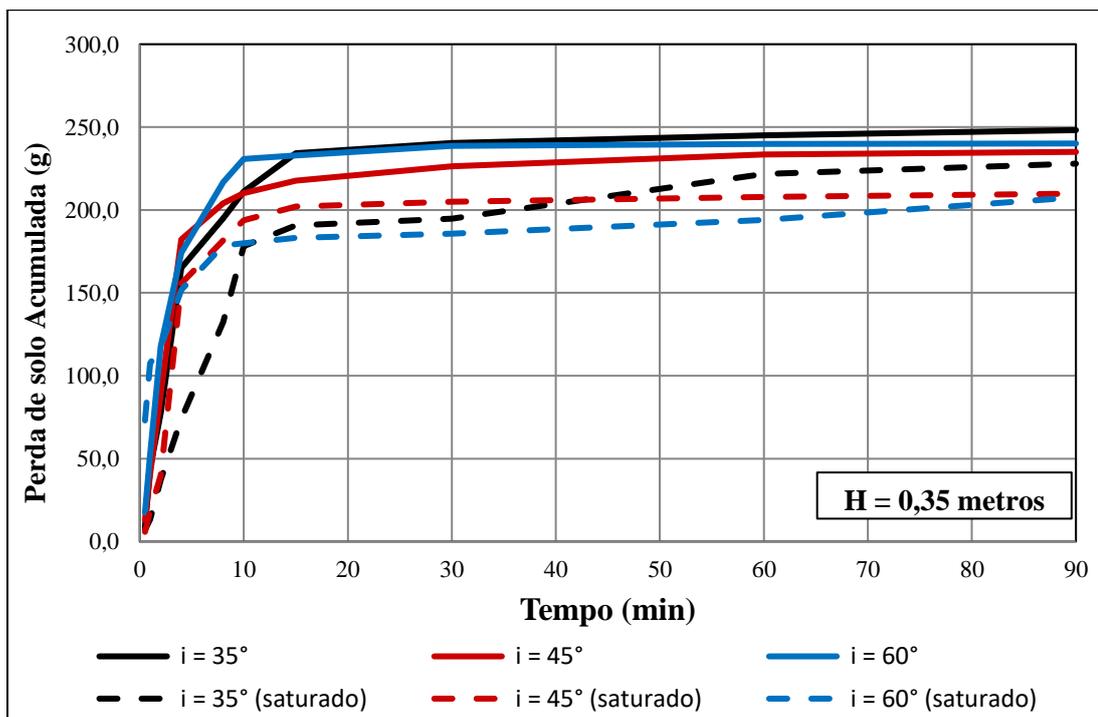


Figura 6.13 – Avaliação da inclinação da rampa nas perdas de solo.

No desenvolvimento do teste de resistência a erosão do CSIR, Jones e Ventura (2003) afirmam que a melhor declividade para estudo é 35°, pois permite também o escoamento da água sob a amostra. Nos testes realizados verifica-se que esta inclinação é a que melhor permite a avaliação conjunta do impacto dos jatos e do escoamento sobre a amostra, portanto, a declividade de 35° será adotada neste estudo.

Em resumo, foram determinados os seguintes parâmetros para a execução dos ensaios:

- Carga Hidráulica Aplicada: H = 0,35 metros;
- Inclinação do equipamento fixa em 35°;
- Condição da amostra: Seca ao ar e saturada;
- Tempo de duração do ensaio: 90 minutos;

Os parâmetros fixados acima foram pré-estabelecidos por meio de ensaios realizados na amostra erodível ITAHI. De maneira a confirmar se estas variáveis poderiam distinguir solos erodíveis daqueles resistentes a erosão, foram realizados ensaios nestas condições para a amostra ITAHS (Tabela 6.2). Nota-se que as perdas de solo para o horizonte superior são muito baixas, com um pequeno acréscimo para a condição seca ao ar, demonstrando o efeito do teor de umidade na resistência a erosão.

Tabela 6.2 – Comparação dos resultados de perda de solo para o talude ITA.

Condição	Amostra	Massa Inicial Solo Seco (g)	Umidade Inicial (%) ¹	Massa Erodida Solo Seco (g)	Perda de Solo (%)	Taxa de Perda de Solo (g/min) ²
Seca ao ar (72 horas)	ITAHS	245,39	5,1	7,88	3,21	0,088
	ITAHI	281,13	1,0	235,06	83,61	2,612
Saturada (24 horas)	ITAHS	227,48	38,0	1,76	0,77	0,020
	ITAHI	290,48	34,4	227,97	78,48	2,533

Obs.: realização de ensaios para carga hidráulica igual a 0,35 metros, inclinação de 35° e tempo de duração do ensaio igual 90 minutos.

Para avaliação das perdas de material da amostra ITAHS, o experimento foi conduzindo por intervalo de tempo igual a 90 minutos (Figura 6.14), no intuito de verificar a ocorrência de perdas de solo em maiores intervalos de tempo. No entanto, as perdas de

solo ocorreram majoritariamente no início do processo de aspersão, assim como evidenciado nos testes realizados na amostra ITAHI.

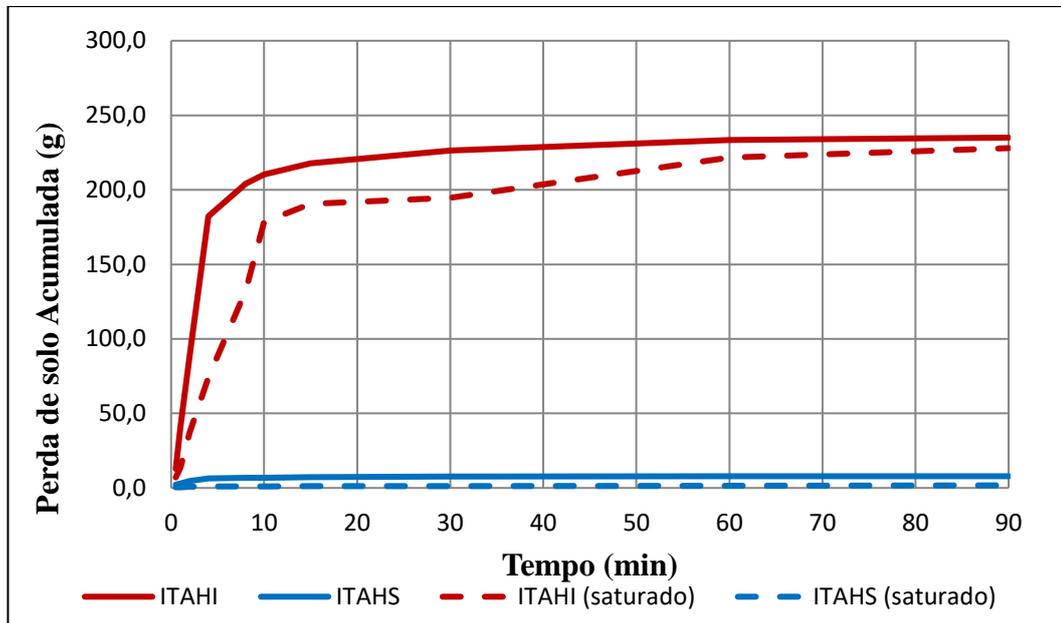


Figura 6.14 – Perda de solo acumulada em função do tempo – talude Itabira (ITA).

A amostra ITAHS se apresenta conservada após o ensaio proposto, indicando sua resistência ao processo erosivo. A Figura 6.15 ilustra o resultado das amostras ITAHS e ITAHI após a execução do procedimento pré-estabelecido, demonstrando que a metodologia é promissora para distinguir solos resistentes daqueles potencialmente erodíveis.



Figura 6.15 – Resultado das amostras no final do ensaio. A) ITAHS – horizonte resistente a erosão; B) ITAHI – horizonte erodível.

6.4 AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE

A partir dos testes realizados na Seção 6.3, foi possível a padronização do método para as variáveis: carga hidráulica, inclinação, tempo de ensaio e condição inicial dos corpos de prova. Desta forma, o procedimento foi replicado para as demais amostras, sendo os resultados expressos separadamente para as condições: seca ao ar e saturada por 24 horas (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Perdas de solo e fator de erodibilidade K determinados pelo erosímetro.

Amostra		Seca ao ar (72 horas)				Saturada (24 horas)			
		w _i (%)	P (%)	T _P (g.min ⁻¹)	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	w _i (%)	P (%)	T _P (g.min ⁻¹)	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
ITA	HS	5,1	3,21	0,088	0,0022	38,0	0,77	0,020	0,0005
	HI	1,0	83,61	2,612	0,0654	34,4	78,48	2,533	0,0635
VAR	HS	4,4	9,71	0,254	0,0065	34,9	0,22	0,008	0,0002
	HI	1,2	97,18	2,707	0,0678	30,7	45,33	1,305	0,0170
OBR	HS	7,9	0,95	0,023	0,0006	32,1	0,75	0,025	0,0006
	HI	6,0	72,98	1,870	0,0469	36,2	33,36	0,894	0,0139
MRN	HS	2,0	16,95	0,474	0,0121	42,1	0,35	0,009	0,0002
	HI	0,7	90,73	3,280	0,0822	28,0	44,24	1,518	0,0380
ALG	HS	1,2	1,58	0,047	0,0012	24,2	0,2	0,006	0,0001
	HI	0,6	72,21	2,429	0,0609	18,2	58,03	2,071	0,0519
PTO	HS	4,2	1,94	0,056	0,0014	30,3	0,14	0,004	0,0001
	HI	3,0	75,54	2,090	0,0524	27,0	11,48	0,350	0,0088
ATP	HS	4,9	3,78	0,112	0,0028	33,6	0,37	0,009	0,0002
	HI	4,0	37,22	1,053	0,0264	19,9	7,84	0,256	0,0064
LVN	HS	2,1	5,62	0,191	0,0049	20,5	0,9	0,031	0,0008
	HI	0,2	60,36	2,180	0,0546	14,1	65,54	1,938	0,0547
AMF	HS	2,2	13,04	0,406	0,0103	29,3	1,26	0,043	0,0011
	HI	0,8	42,94	1,285	0,0322	26,8	15,8	0,483	0,0121
CNG	HS	2,8	2,43	0,054	0,0017	37,3	2,39	0,067	0,0017
	HI	1,3	68,8	1,836	0,0460	32,8	31,96	0,855	0,0022

Onde: w_i = teor de umidade inicial (%); P = perda de solo total (%); T_P = taxa de perda de massa (g/min); K_{Dry} = Fator erodibilidade determinado pelo erosímetro na condição seca; K_{Sat} = Fator erodibilidade determinado pelo erosímetro na condição saturada.

No intuito de comparar os resultados entre as amostras dos horizontes superior (HS) e inferior (HI), foram calculadas a perda de solo total - P (em %) e a taxa de perda de solo total - T_P (g.min⁻¹). Para a avaliar a contribuição da sucção inicial atuante na resistência ou degradação das amostras, foram registrados os teores de iniciais (Tabela 6.3).

Resultados de experimentos de perdas de solo são comumente apresentados de forma normalizada, no intuito da replicação dos mesmos em escalas diferentes das originais ou mesmo em campo, sendo mais comum a normalização em função das dimensões das amostras (ou parcelas) e da energia hidráulica utilizada. Neste contexto, as perdas de solos no erosímetro foram normalizadas a partir da área superficial das amostras e da energia cinética promovida pelos jatos de aspersão. Utilizando a carga hidráulica de 0,35 metros, obtém-se a energia cinética igual a $0,434 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, conforme o método de Wischmeier e Smith (1958), descrito no Capítulo 2 (Seção 2.4.1). Assim, foi determinado o fator erodibilidade K para o erosímetro, considerando a condição seca (K_{Dry}) e para a condição saturada (K_{Sat}), mensurados nas unidades do sistema internacional ($\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$).

Em linhas gerais os horizontes superiores (HS) apresentam resistência a aspersão de água, com perdas de solo inferiores a 17,0 %, mesmo considerando o período de ensaio igual a 90 minutos, tanto para condição seca ao ar quanto para a condição saturada. Em contrapartida, os horizontes inferiores (HI) apresentam as maiores perdas, chegando a superar 90% em alguns casos (VARHI e MRNHI).

Estes resultados são reflexos das diferentes propriedades que determinam o comportamento antagônico dos dois horizontes, onde os resistentes aos processos erosivos (HS) apresentam maior agregação principalmente pelos maiores teores de argila, matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio, bem como maiores diâmetros e estabilidade de agregados, que em conjunto conferem resistência aos processos erosivos.

Ainda considerando a Tabela 6.3, nota-se que a condição seca ao ar apresenta maiores perdas de solo quando comparadas as condições saturadas. Basicamente, o processo de umedecimento acelerado nas amostras secas ao ar, favorece a formação de fase gasosa descontínua no interior do corpo de prova, o que leva a pressões elevadas na fase ar que superam a forças coesivas no interior dos agregados e o atrito existente entre os mesmos, levando o material a ruptura. Vale ressaltar que esta condição se torna muito mais evidente nos horizontes erodíveis (HI), principalmente pelos maiores teores de silte e agregados de baixa estabilidade em água.

Complementando o exposto anteriormente, deve-se considerar o teor de umidade inicial na resistência ou suscetibilidade aos processos de destacamento ocorridos no erosímetro, principalmente pelo papel da distribuição de poros e da sucção atuante. Desta forma, foram analisados os efeitos dos teores de umidades iniciais nas perdas de solo, considerando as condições seca ao ar (Figura 6.16) e saturada (Figura 6.17).

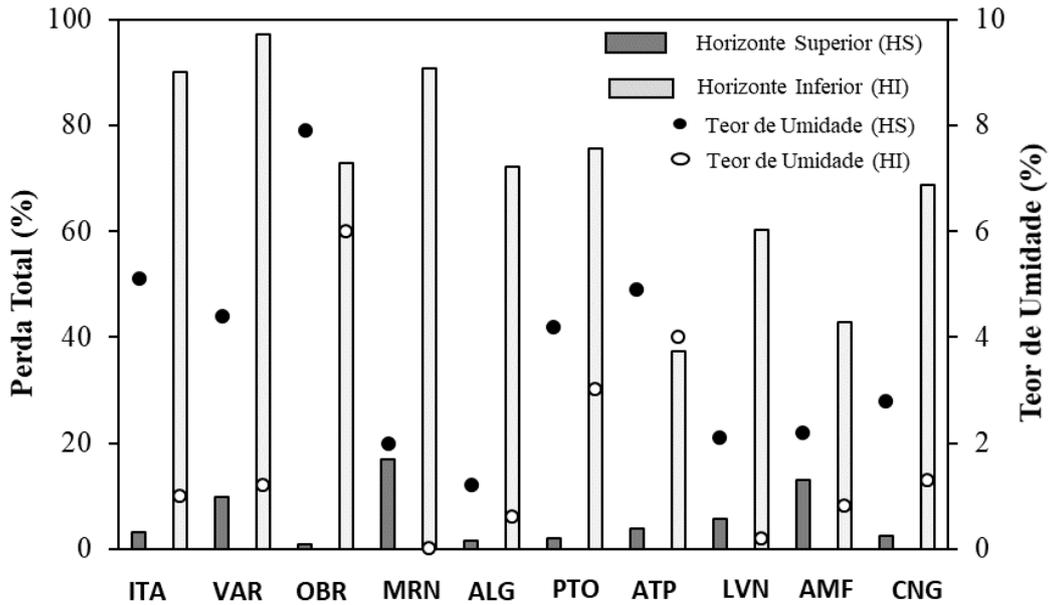


Figura 6.16 – Perdas de solo determinadas pelo erosímetro na condição seca por 72 horas. Detalhe para os teores de umidade atuantes.

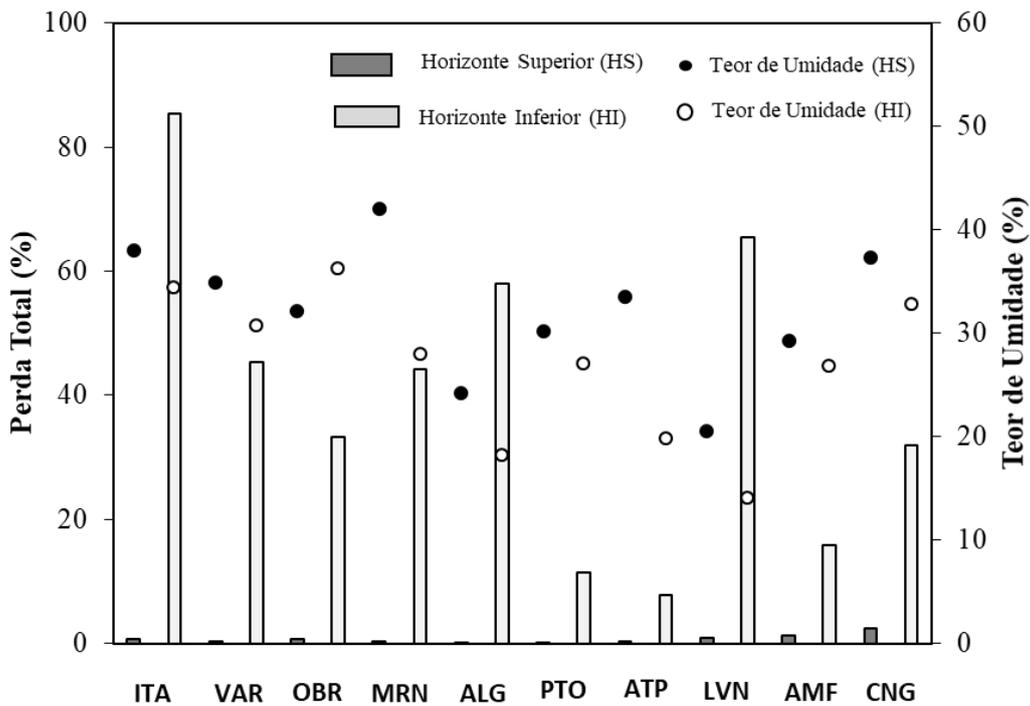


Figura 6.17 – Perdas de solo determinadas pelo erosímetro na condição saturada. Detalhe para os horizontes e os teores de umidade atuantes.

Em uma primeira análise, verifica-se que os horizontes superiores (HS) apresentam maiores teores de umidade, tanto nas condições secas ao ar quanto saturadas. Para a condição seca ao ar (Figura 6.16), a maior umidade inicial é decorrente da maior retenção de água nestes solos, ou seja, maior sucção mátrica atuante, decorrente da distribuição bimodal de poros e das propriedades intrínsecas do material.

Observa-se que para a condição seca ocorrem perdas elevadas nos horizontes erodíveis (HI), pois quanto mais desidratado, maior o risco das pressões na fase ar ultrapassarem a coesão do solo durante o umedecimento (Almeida, 2014; Camapum de Carvalho *et al.*, 2015). Aliados a este fenômeno tem-se as propriedades intrínsecas destes materiais, caracterizadas por baixa agregação e perda abrupta de sucção com a saturação. Bastos (1999), estudando perfis pedológicos na região metropolitana de Porto Alegre, verificou que isto acontecia em solos saprolíticos a partir de pequenos aumentos na umidade, tornando estes materiais suscetíveis à erosão.

No caso dos horizontes superiores este fenômeno é mais difícil de ocorrer, principalmente pela forte cimentação e estabilidade dos agregados, em conjunto com a distribuição bimodal de poros. Durante o umedecimento pela aspersão de água, a distribuição bimodal de poros garante a infiltração rápida, com a condução de água primeiramente pelos macroporos, seguida para os meso e posteriormente para os microporos. Este processo é de suma importância na resistência dos horizontes superiores provenientes de latossolos, conforme pode ser vista na curva características na seção 5.1.1. Portanto, pode-se dizer que a distribuição bimodal de poros e as maiores sucções atuantes, em conjunto com as propriedades que conferem maior agregação e coesão entre as partículas, tornam estes solos extremamente resistentes à erosão.

Dentre os solos não erodíveis, a amostra MRNHS apresentou uma considerável perda na condição seca, associada ao maior percentual de silte e a concentração expressiva de microporos, conforme visto na seção 5.1.1. Por se tratar de um solo de menor grau de intemperismo (neossolo) exibe menores concentrações de óxidos de ferro e alumínio quando comparado aos latossolos. Vale ressaltar que este solo também apresentou elevada desagregação pelo ensaio de perda de massa por imersão da metodologia MCT, reafirmando esta observação.

Na Figura 6.17 observa-se o mesmo para a condição saturada, os horizontes superiores apresentam maiores teores de umidade, consequência da matriz argilosa e da maior porosidade que conferem maior retenção de água. Além disso, em linhas gerais, as perdas são menores quando comparadas as condições secas, principalmente pela menor probabilidade de ocorrência de pressão na fase ar, uma vez que a saturação é feita por capilaridade.

É importante ressaltar que algumas amostras dos horizontes inferiores (HI) apresentaram expansão durante o processo de saturação (ITA, MRN, ALG, LVN), acarretando em elevadas perdas de massa, devido a diminuição do atrito pelos maiores teores de umidade (Zhang *et al.*, 2019). Esta condição pode ser associada a maiores perdas de solo em campo quando o solo se encontra saturado, pois tem-se o início do escoamento superficial que, associados a diminuição da resistência ao cisalhamento a medida em que o solo se aproxima da saturação, promovem o destacamento e transporte de partículas (Bastos, 1999; Holz *et al.*, 2016). Adicionalmente, a saturação acarreta maiores perdas em solos de textura siltosa ou compostos majoritariamente por areia fina, devido à baixa coesão entre as partículas (Zhang *et al.*, 2019).

6.5 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO SOLO NAS PERDAS DETERMINADAS PELO EROSÍMETRO.

Na seção anterior foi possível verificar que o erosímetro e o procedimento proposto são promissores na diferenciação de comportamento entre os solos resistentes (HS) e os suscetíveis a erosão (HI). No entanto, é interessante verificar se as propriedades dos solos apresentam associação com as perdas encontradas, tanto para as condições secas quanto saturadas. Desta forma foram elaboradas: a matriz de correlação com as propriedades físicas (Tabela 6.4) e químicas (Tabela 6.5).

Conforme discutido em outras seções, as partículas finas exercem influência expressiva nas perdas de solos, principalmente a fração argila que apresenta relação inversamente proporcional as perdas de solo, com maior efeito na condição seca ($r = - 0,725$, $p < 0,01$). Considerando o ensaio em condições saturadas, observa-se a contribuição da areia fina (AF), fração que apresentam baixa coesão quando saturada.

Tabela 6.4 – Correlação entre o fator erodibilidade determinado pelo erosímetro e as principais propriedades físicas dos solos.

	K _{Dry}	K _{Sat}	A	S	AF	e	LL	IP	DMG _U	IEA-G	c'	e'	Pi _M	C (%)	I (%)
K _{Sat}	0,763**	1													
A	-0,725**	-0,591**	1												
S	0,549*	0,340	-0,738**	1											
AF	0,43	0,469*	-0,664**	0,131	1										
e	-0,507*	-0,489*	0,510*	-0,029	-0,546*	1									
LL	-0,540*	-0,640**	0,556*	-0,147	-0,560*	0,655**	1								
IP	-0,723**	-0,693**	0,676**	-0,550*	-0,297	0,451*	0,770**	1							
DMG _U	-0,822**	-0,660**	0,853**	-0,713**	-0,417	0,473*	0,614**	0,860**	1						
IEA-G	-0,771**	-0,600**	0,848**	-0,754**	-0,389	0,419	0,498*	0,806**	0,985**	1					
c'	-0,53*	-0,534**	0,692**	-0,504*	-0,399	0,427	0,501*	0,634**	0,670**	0,659**	1				
e'	0,700**	0,628**	-0,670**	0,526*	0,377	-0,317	-0,322	-0,590**	-0,677**	-0,680**	-0,711**	1			
Pi _M	0,746**	0,624**	-0,764	0,57	0,618	-0,398	-0,438	-0,676**	-0,823**	-0,848**	-0,480*	0,663**	1		
C (%)	-0,594**	-0,722**	0,606**	-0,138	-0,703**	0,616**	0,872**	0,702**	0,622**	0,531*	0,514*	-0,392	-0,593**	1	
I (%)	0,649**	0,523**	-0,760**	0,727**	0,312	-0,283	-0,248	-0,555*	-0,790**	-0,819**	-0,554*	0,702**	0,719**	-0,261	1
S _I	-0,864**	-0,658**	0,845**	-0,650**	-0,476*	0,496*	0,499*	0,778**	0,915**	0,911**	0,661**	-0,710**	-0,854**	0,542*	-0,831**

Onde: * = significativo ao nível de 5,0 % de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1,0 % de probabilidade; A = % Argila; S = % Silte; AF = % Areia Fina; e = índice de vazios; C (%) = contração determinada pelas pastilhas MCT; I (%) = expansão determinada pelas pastilhas MCT; S_I = resistência “*in situ*” determinada pelo mini vane test.

Considerando as propriedades plásticas é observada a relação inversamente proporcional, ou seja, maiores valores de LL e IP conferem maior resistência à erosão. Entretanto, o limite de liquidez apresenta maior contribuição nas perdas sob condições saturadas ($r = - 0,640$, $p < 0,01$), pois quando o teor de umidade atinge o LL o material se torna propício ao escoamento, diminuindo as forças coesivas e, conseqüentemente, suscetível ao destacamento pela ação do escoamento superficial (Deng *et al.*, 2017).

A agregação também se associa às perdas de solo determinadas pelo erosímetro, conforme explicitado anteriormente, maiores diâmetros de agregados e maiores índices de estabilidade são responsáveis pela resistência a erosão, ressaltando a maior associação as condições secas. Associando-se a agregação ao processo de evolução dos solos, observa-se que aqueles mais intemperizados exibem as menores perdas o que também pode ser evidenciado pelas propriedades relacionadas a metodologia MCT, onde os coeficientes c' e a contração (C) são responsáveis pela diminuição da erodibilidade, ao passo que a erodibilidade específica (e'), P_{iM} e a expansão são responsáveis pelo desprendimento e perda de material, propriedades que se relacionam com a fração de finos, plasticidade e natureza do argilomineral presente.

De maneira complementar também foi feita a correlação das perdas obtidas pelo erosímetro com a resistência “*in situ*” (S_I), conforme descrito na Seção 5.4. Os resultados demonstraram correlação negativa forte entre S_I e a erodibilidade determinada pela condição seca (K_{Dry} ; $r = - 0,864$, $p < 0,01$), ou seja, condição não-saturada, a qual se assemelha com as condições de campo. Essa associação é possível uma vez que grande parte das propriedades que interferem na susceptibilidade aos processos erosivos afetam também a resistência “*in situ*”, destacando-se os teores de finos, plasticidade e a agregação (conforme visto na Seção 5.4). Estes resultados demonstram o potencial de S_I como importante indicador da susceptibilidade de solo não saturados à erosão.

A correlação de S_I com as perdas determinadas pelo erosímetro na condição saturada apresenta menor intensidade (K_{Sat} ; $r = - 0,658$, $p < 0,01$), visto que os conteúdos de água em K_{Sat} e S_I são discrepantes. Desta forma, para se obter uma relação mais precisa entre S_I e a perda na condição saturada tornam-se necessários a execução de novos ensaios de vane test durante ou imediatamente após um período chuvoso, buscando maior percentual de saturação.

As propriedades químicas, assim como na correlação com a resistência “*in situ*” (Seção 5.4), apresentam menor influência, porém considerável nas perdas de solo tanto para as condições secas quanto saturadas (Tabela 6.5). Os percentuais dos óxidos majoritários, Δ pH e as relações moleculares (K_r e K_e), demonstram que o grau de intemperismo também estão associados aos resultados do erosímetro, principalmente pela maior concentração de óxidos de ferro e alumínio nos horizontes resistentes (HS) em detrimento dos maiores percentuais de sílica para os horizontes erodíveis (HI).

Tabela 6.5 Correlação entre o fator erodibilidade determinado pelo erosímetro e as principais propriedades químicas dos solos.

	K_{Dry}	K_{Sat}	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	K_r	K_e	Δ pH	M.O.	Ca ⁺²
K_{Sat}	0,763 **	1									
SiO ₂	0,548 *	0,468 *	1								
Fe ₂ O ₃	-0,542 *	-0,502 *	-0,901 **	1							
TiO ₂	-0,540 *	-0,628 **	-0,754 **	0,623 **	1						
K ₂ O	0,292	0,532 *	0,532 *	-0,494 *	0,592 *	1					
K_r	0,568 **	0,498 *	0,961 **	-0,819 **	-0,758 **	0,593 **	1				
K_e	0,579 **	0,515 *	0,961 **	-0,822 **	-0,774 **	0,597 **	1,000 **	1			
Δ pH	-0,543 *	-0,523 *	-0,577 **	0,746 **	-0,529 *	-0,347	-0,515 *	-0,525 *	1		
M.O.	-0,582 **	-0,423 *	-0,347	0,120	0,403	0,027	-0,362	-0,368	-0,56	1	
Ca ⁺²	-0,315	-0,317	-0,353	0,150	0,556 *	-0,305	-0,341	-0,350	0,173	0,665 **	1
CTC _t	-0,432	-0,407	-0,204	-0,058	0,378	-0,336	-0,284	-0,289	-0,20	0,859 **	0,69 **

Onde: * = significativo ao nível de 5,0 % de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1,0 % de probabilidade.

Os óxidos de potássio (K₂O) apresentam associação nas perdas sob condições saturadas ($r = 0,532$, $p < 0,05$), relação que não é verificada para a condição seca. Este óxidos são responsáveis por maiores perdas em solos com menor grau de intemperismo, principalmente nos horizontes inferiores, uma vez que se relacionam a presença de minerais do grupo das micas geralmente de estrutura 2:1, compostos por uma estrutura orientada e que podem apresentar caráter expansivo ou mesmo originar minerais secundários com este comportamento (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

A matéria orgânica também se mostra importante na resistência aos processos erosivos, devido à correlação negativa com as perdas de solo, onde é possível verificar os baixos conteúdos de M.O. para os horizontes inferiores (HI) e maiores concentrações para os horizontes superiores (HS), resultados similares aos encontrados Vaezi e Sadeghi (2011) e Ostovari *et al.* (2019). A matéria orgânica aumenta a resistência dos solos a erosão por meio de sua ação cimentante na formação e flocculação de agregados de maiores diâmetros. Pitaldi *et al.* (2018), estudando a ação de diferentes formas de húmus na estabilidade de agregado e susceptibilidade a erosão nos alpes italianos, verificaram que a perda de agregados diminui consideravelmente com o aumento do teor de matéria orgânica.

Desta forma, pode-se afirmar que o equipamento proposto se mostra promissor na identificação de solos potencialmente erodíveis, visto que permitiu diferir solos erodíveis de não erodíveis, ressaltando que as perdas obtidas se associaram as propriedades físicas e químicas responsáveis por maior susceptibilidade a erosão.

6.6 VALIDAÇÃO DO EROSÍMETRO A PARTIR DE METODOLOGIAS INDIRETAS DE ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE.

Os resultados obtidos pelo erosímetro permitiram distinguir o comportamento entre os solos resistentes (HS) e erodíveis (HI), além de se mostrarem associados as principais propriedades físicas e químicas responsáveis pela deflagração dos processos erosivos. Desta forma este tópico tem o intuito de comparar as perdas determinadas pelo erosímetro com os principais métodos existentes para a estimativa indireta do fator de erodibilidade K, sendo utilizadas para tal as seguintes metodologias:

- Método textural de Bouyoucos (1935);
- Método do nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para Equação Universal de Perda de Solos (USLE);
- Método da Equação Universal de Perda de Solos Revisada (RUSLE), conforme descrito por Ye *et al.* (2018).
- Método de Lima *et al.* (1990), adaptação do nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) à realidade dos latossolos brasileiros;

É importante salientar que estes métodos foram escolhidos por serem aqueles mais utilizados na literatura, sendo por vezes fonte principal para simulação e elaboração de mapas de suscetibilidade às perdas de solos.

O método de Bouyoucos (1935) trata a erodibilidade de solos como um problema específico das partículas que o compõe, associando as perdas ao aumento das frações de menor propriedade ligante, como silte e areia (Equação 6.1). Onde K_B é o fator de erodibilidade segundo Bouyoucos (1935) em t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹. As frações areia, silte e argila são determinadas com uso de aditivo defloculante.

$$K_B = \frac{\% \text{ areia} + \% \text{ silte}}{\% \text{ argila}} \cdot \frac{1}{100} \quad (6.1)$$

O método desenvolvido por Wischmeier *et al.* (1971) também considera o diâmetro e a distribuição das partículas na suscetibilidade à erosão, entretanto adiciona outras variáveis como a matéria orgânica, estrutura e permeabilidade. Conforme visto nas seções anteriores a matéria orgânica exibe função importante na cimentação e coesão dos agregados do solo. A avaliação da estrutura e da permeabilidade permitem inferir sobre o processo de evolução pedogenético o qual pode conferir agregados de maior resistência e porosidade, os quais minimizam os efeitos do escoamento superficial. Para o cálculo da erodibilidade segundo Wischmeier *et al.* (1971) foram utilizadas as Equações 6.2 e 6.3:

$$K_W = \frac{0,1317 \times (2,1 \times 10^{-4} M^{1,14} (12 - MO) + 3,25(S - 2) + 2,5(P - 3))}{100} \quad (6.2)$$

$$M = (\% \text{ Silte} + \% \text{ areia muito fina}) \times (100 - \% \text{ argila}) \quad (6.3)$$

Onde K_W é o fator de erodibilidade segundo Wischmeier *et al.* (1971), em t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹. M é o parâmetro que reflete a distribuição das partículas (Equação 6.3), representado pelo produto do teor de silte acrescido da fração areia fina (fração compreendida entre 0,002 e 0,1 mm) relacionado ao conteúdo de argila. MO é o conteúdo de matéria orgânica (%). S é o código da estrutura do material, determinado segundo Santo *et al.* (2005). P é o código de permeabilidade do solo, determinado de forma indireta segundo o critério de Carsel e Parrish (1988). O coeficiente 0,1317 é utilizado para conversão das unidades para o sistema internacional.

Apesar de considerar variáveis de diferentes naturezas na estimativa da erodibilidade, Renard *et al.* (1997) afirmam que o método do nomograma é adequado para solos superficiais de textura média e baixa agregação e que em condições diferentes destas o modelo apresenta baixa aplicação. Estas observações fizeram o autor desenvolver um novo método para estimativa da erodibilidade baseado no diâmetro médio geométrico das partículas do solo (D_g). Posteriormente, Ye *et al.* (2018), estudando a variabilidade espacial da agregação do solo, aplicou a equação, considerando o diâmetro médio geométrico dos agregados via úmida (DMG_U) ao invés das partículas (Equação 6.4):

$$K_{RUSLE} = 7,954 \times \left\{ 0,0017 + 0,0494 \times \exp \left[-0,5 \times \left(\frac{\log DMG_U + 1,675}{0,6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (6.4)$$

Onde K_{RUSLE} é o fator de erodibilidade calculado segundo o método da RUSLE, conforme descrito por Ye *et al.* (2018). DMG_U é o diâmetro médio geométrico dos agregados após o ensaio de estabilidade de agregados via peneiramento úmido. Devido às limitações dos métodos indiretos aos solos oriundos de regiões tropicais, Lima *et al.* (1990) adaptaram o modelo originalmente proposto por Wischmeier *et al.* (1971) a realidade dos latossolos brasileiros (Equação 6.5).

$$K_L = 1,451 \times 10^{-10} (120 - MO) Ma^{1,14} + 0,0043 (S - 2) + 0,0033 (P - 2) \quad (6.5)$$

Onde K_L é o fator de erodibilidade segundo Lima *et al.* (1990) em $t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$. MO é o teor de matéria orgânica (%). Ma é um parâmetro textural semelhante ao parâmetro “M” do método de Wischmeier *et al.* (1971), porém considerando a determinação do diâmetro das frações a partir da dispersão em água apenas. Os parâmetros S e P se referem aos códigos de estrutura e permeabilidade determinados de maneira idêntica ao proposto para o método de Wischmeier *et al.* (1971).

A partir dos resultados da distribuição de partículas, estabilidade de agregados e da caracterização química (apresentados no Capítulo 5) foram calculados os fatores de erodibilidade K para as metodologias descritas acima e posteriormente associados ao fator de erodibilidade determinado pelo erosímetro, conforme seção 6.4. A Figura 6.18 demonstra a correlação das metodologias indiretas com o fator de erodibilidade do erosímetro determinado para a condição seca ao ar (K_{Dry}), enquanto a Figura 6.19 exibe a relação para a condição saturada (K_{Sat}).

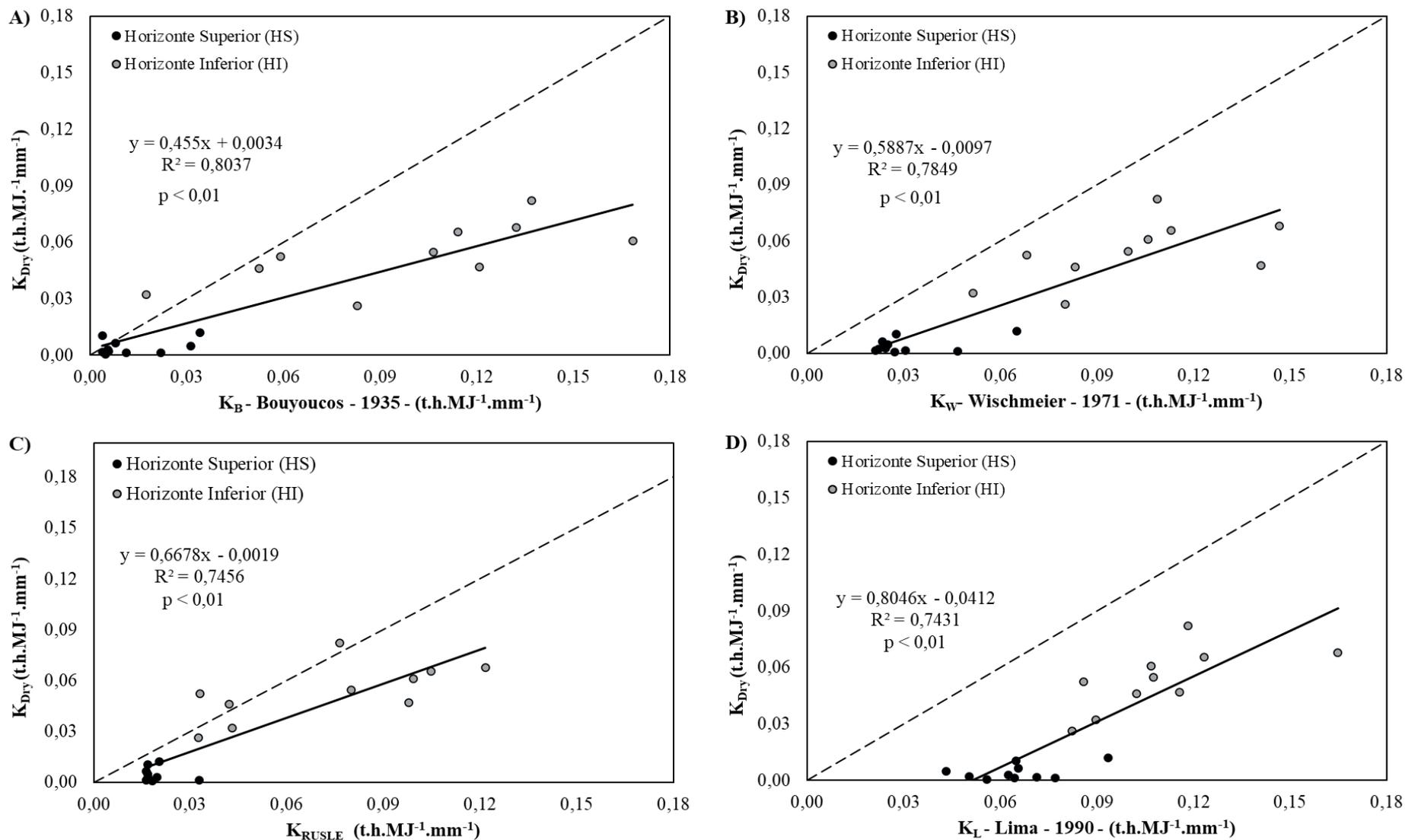


Figura 6.18 – Correlação das perdas de solo obtidas pelo erosímetro na condição seca (K_{Dry}) e as metodologias indiretas para estimativa da erodibilidade. **A)** Bouyoucos (1935). **B)** Wischmeier *et al.* (1971). **C)** Método RUSLE (Ye *et al.*, 2018). **D)** Lima *et al.* (1990).

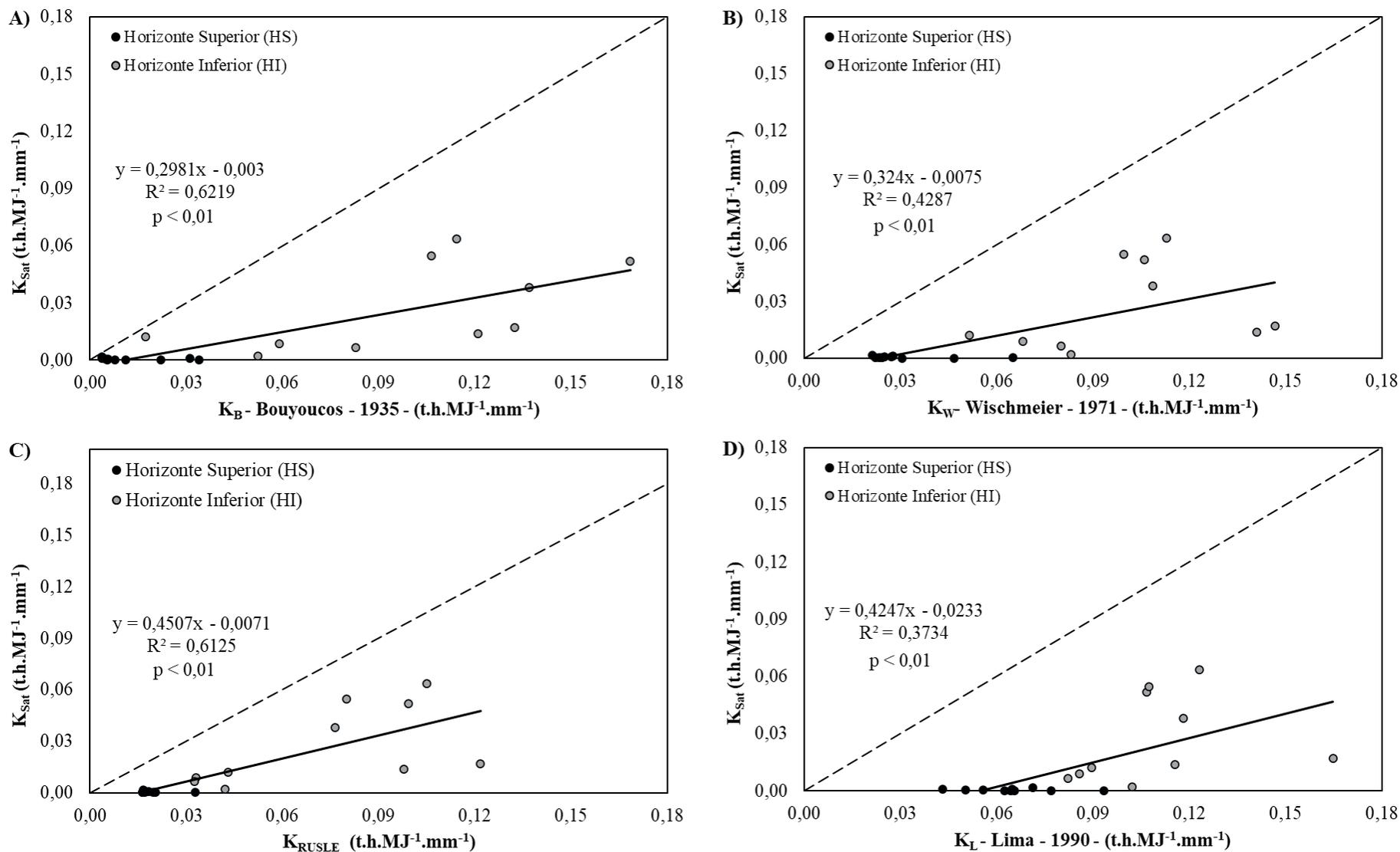


Figura 6.19 – Correlação das perdas de solo obtidas pelo erosímetro na condição saturada (K_{Sat}) e as metodologias indiretas para estimativa da erodibilidade. **A)** Bouyoucos (1935). **B)** Wischmeier *et al.* (1971). **C)** Método RUSLE (Ye *et al.*, 2018). **D)** Lima *et al.* (1990).

No intuito de verificar a correlação entre os modelos foi determinada a linha de tendência (linha contínua) e a linha de igualdade entre os modelos (1:1), representado pela linha tracejada, acompanhados dos coeficientes R^2 e do nível de significância (p-valor). Também é possível verificar a distinção entre as amostras HS e HI.

Na condição seca (K_{Dry}) são observados boas correlações com as metodologias indiretas, principalmente pelos métodos de Wischmeier *et al.* (1971) ($R^2 = 0,7849$, $p < 0,01$) e da RUSLE ($R^2 = 0,7456$, $p < 0,01$), sendo possível também distinguir o comportamento das amostras resistentes (HS), daquelas suscetíveis à erosão (HI). Entretanto, observa-se que os pontos plotados, se encontram a direita da linha tracejada (1:1), indicando que as metodologias indiretas, por vezes, superestimam as perdas, o que se torna mais visível quando analisados os pontos de maior erodibilidade.

Apesar de bons coeficientes de determinação (R^2), verifica-se que em alguns métodos ocorre o aumento da dispersão dos resultados com o aumento da erodibilidade. Basicamente isto se deve as diferenças entre os solos deste estudo e aqueles utilizados no desenvolvimento dos modelos. Neste contexto, destacam-se os métodos formulados por Bouyoucos (1935) e Wischmeier *et al.* (1971), originários de solos de textura média, formados sob condições de clima temperado. Adicionalmente, Marques *et al.* (1997a) afirmam que um dos principais motivos que explique esta baixa adequação seja o fato destes modelos abordarem os atributos do solo de maneira individualizada, não considerando a associação entre os atributos que podem modificar a resposta do solo frente a erosão, como por exemplo a estabilidade de agregados.

O método da RUSLE (K_{RUSLE}) foi o que apresentou um dos melhores coeficientes de determinação (R^2) e a menor dispersão associada ao aumento da erodibilidade, principalmente por ser fundamentado no diâmetro médio dos agregados (DMG). Conforme visto nas seções anteriores, diversos atributos do solo interferem na maior ou menor estabilidade dos agregados (como: teor de argila, IP, natureza do argilomineral, CTC, matéria orgânica, etc.), ou seja, por meio de uma única variável, pode-se ter a resposta de um conjunto de propriedades. Vale ressaltar, que estes resultados corroboram para outros trabalhos encontrados na literatura (El-Swaify e Dangler, 1977; Le Bissonnais, 1996; Ye *et al.* 2018), onde a estabilidade de agregados é tratada como importante indicador de resistência à erosão.

O método proposto por Lima *et al.* (1990), em linhas gerais, superestima a erodibilidade tanto para as amostras HS quanto HI, entretanto observa-se que a dispersão com aumento dos índices de erodibilidade é menor, indicando que um refinamento matemático poderia ser utilizado para adequação dos solos em estudo. A menor dispersão se deve ao fato deste modelo considerar que as partículas de argila se encontram flocoadas, apresentando dimensões maiores e comportamento semelhante as frações silte e areia muito fina, situação comum em latossolos (Marques *et al.*, 1997b). Portanto, ao utilizar o parâmetro M_a se consideram as partículas agregadas, conforme encontrado nos latossolos brasileiros, principalmente no horizonte B latossólico.

Considerando a condição saturada (Figura 6.19), observa-se grande discordância com a condição seca (Figura 6.18), apresentando decréscimo na associação aos modelos de predição indireta, levando a concluir que os mesmos não abordam de forma efetiva os processos erosivos que ocorrem sob condições saturadas, principalmente por estes modelos não considerarem o teor de umidade inicial do solo. Ainda se observa o aumento da dispersão dos resultados em solos de erodibilidade elevada, ressaltando que os mesmos se adequam a solo de textura média.

O modelo da RUSLE é aquele que mais se aproxima das perdas obtidas pelo erosímetro em condições saturada (Figura 6.19), uma vez que antes dos ensaios para determinação do diâmetro e estabilidade, os agregados devem ser saturados por pelo menos 24 horas. Contudo, ainda existem discussões acerca do melhor método para saturação dos agregados, de maneira a evitar aumento das pressão de ar, o que pode gerar a ruptura dos mesmos, situação que pode ocorrer com maior facilidade em solos potencialmente erodíveis (Bastos *et al.*, 2005; Jong van Lier, 2010). Segundo Bryan (2000) a umidade antecedente interfere de forma distinta na estabilidade dos macros e microagregados: os macroagregados fracamente ligados tendem a desintegrar rapidamente sob tensões de umedecimento, enquanto os microagregados são muito mais resistentes, o que determina a natureza dos processos de vedação e selagem superficial.

Estes resultados evidenciam a importância de se considerar a umidade antecedente nos estudos de erodibilidade e que os processos responsáveis pelo destacamento e arraste de partículas em condições não saturadas e saturadas são diferentes. Para Silva *et al.* (2009)

estas considerações refletem o comportamento do solo em campo, visto que podem ocorrer altas perdas de solo em chuvas de baixa intensidade devido as condições de umidade antecedente, em conjunto com fatores como a estrutura e a profundidade.

Portanto, conclui-se que as metodologias indiretas aqui abordadas retratam melhor os processos erosivos que ocorrem nos solos sob as condições não saturadas, principalmente, a baixos teores de umidade. Esta condição pode gerar maiores perdas de solo devido a maior probabilidade de a pressão ar no interior do solo superar a coesão intra e inter agregados, levando o material a ruptura. Adicionalmente, também deve-se considerar a distribuição de poros na estimativa da sucção atuante e nos processos que facilitam a infiltração e condução de água.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DA ERODIBILIDADE

7.1. CONTEXTUALIZAÇÃO PÓS-ENSAIO

Nos capítulos anteriores foram apresentados os principais resultados referentes a caracterização física, química, mecânica e mineralógica para os solos estudados, bem como o desenvolvimento de um equipamento para investigação da erodibilidade por meio de amostras indeformadas. A partir das observações foi possível constatar que os solos dos horizontes superiores (HS) e inferiores (HI) apresentam comportamentos distintos em relação a erosão, por vezes relacionados as suas propriedades específicas.

Entretanto, torna-se interessante verificar a coerência entre as repostas obtidas por meio dos ensaio de laboratório e o comportamento dos solos em campo, uma vez que estes procedimentos poderiam estar sub ou superestimando a resposta dos solos frente a ação das intempéries. Portanto, esta seção se dedica a contextualização dos ensaios de laboratório à realidade de campo, em outras palavras, procura-se responder os seguintes questionamentos:

- Os procedimentos realizados conseguiram distinguir os horizontes resistentes daqueles potencialmente erodíveis?
- A diferença de comportamento obtida pelos ensaios em laboratório retrata na mesma magnitude, ou de forma similar, os fenômenos e processos erosivos observados em campo?

No intuito de verificar a coerência dos resultados, cada talude foi analisado de forma individual, assim é possível identificar quais os atributos do solo exercem maior influência na diferença de comportamento e se a mesma é correspondente ao observado em campo.

➤ **Talude Itabira (ITA) com cobertura em Latossolo Vermelho Distrófico Típico.**

Em campo, os dois horizontes apresentam uma nítida diferença de comportamento, com sulcos profundos no horizonte inferior. Para analisar a variação das informações obtidas foi construída a Tabela 7.1, onde é possível verificar as propriedades mais importantes, ao final é apresentada a variação relativa entre os valores por meio do coeficiente Δv , calculado pela relação percentual entre o maior e o menor valor.

Tabela 7.1 – Contextualização Pós-ensaios – Itabira (ITA)

Propriedades		ITAHS	ITAH I	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	63,5	7,4	858%
		% Silte ¹	12,4	47,6	384%
		RD (%)	21,21	84,11	397%
		LL	68	39	174%
		IP	38	6	633%
		Atividade (T)	6,53	17,97	275%
		DMGU (mm)	2,94	0,33	891%
		IEA-G (%)	88,82	10,58	840%
Químicas (Análises TFSA, FRX)		Δ pH	-1,03	-1,37	-
		Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,56	0,04	1400%
		M.O. (dag/kg)	1,73	0,13	1331%
		K _r	1,60	2,73	171%
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)		Classificação	LG'	NA	-
		Pi _M /s (umidade natural)	4,06	221,14	5447%
		C (%) - Pastilhas	10,82	3,48	311%
		I (%) -Pastilhas	6,16	13,53	220%
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)		S _I (kPa)	218,2	70,1	311%
		K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0022	0,0705	3205%
		K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0005	0,0691	13820%

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

A discrepância obtida pelos procedimentos realizados (Tabela 7.1) retrata a diferença de comportamento em campo para os dois horizontes, sendo que o horizonte superior (HS) apresenta maior concentração de argila, índice de plasticidade, atividade de argilas, M.O. e concentração de íons cálcio, fatores que conferem maiores diâmetros e estabilidade de agregados aumentando sua resistência à erosão. Adicionalmente, a metodologia MCT confirma a distinção entre os dois solos em relação a laterização, sendo esta uma característica de solos resistentes. O conjunto de todos estes atributos interferem nos valores de S_I, maior em ITAHS, e na maior perda de solo obtida pelo erosímetro para os solos inferiores (ITAH I).

Deve-se ressaltar também as diferenças encontradas nas curvas características dos dois horizontes, onde ITAHS apresentou maiores sucções com a dessaturação e distribuição de poros bimodal, em contrapartida ITAHI possui menor sucção atuante com distribuição de poros unimodal, totalmente microporosa. Esta diferenciação fica evidente pelo surgimento de feições profundas justamente na transição entre os dois horizontes, onde a pressão na fase ar supera a baixa coesão do solo do horizonte inferior (HI), levando ao início do processo erosivo.

➤ **Vargem Alegre (VAR) com cobertura em Latossolo Vermelho Distrófico Típico.**

O talude em questão apresenta nítida diferença entre as duas parcelas sendo a inferior (HI) em maior grau de deterioração, com a presença de sulcos rasos, os quais apresentam maior profundidade na transição. Análogo ao talude ITA, as propriedades físicas e químicas apresentam grande variação, levando a formação de agregados de maiores dimensões e de maior estabilidade em HS (Tabela 7.2). Além disso, a variação do parâmetro ΔpH , superior em HS, confirma seu maior grau de intemperismo e, conseqüentemente maior resistência a erosão, conforme o observado em campo.

Tabela 7.2 – Contextualização Pós-ensaios – Vargem Alegre (VAR)

Propriedades		VARHS	VARHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	55,8	7,0	797%
		% Silte ¹	26,2	60,7	232%
		RD (%)	45,96	87,52	190%
		LL	61	40	153%
		IP	30	9	333%
		Atividade (T)	6,36	22,28	350%
		DMG _U (mm)	3,31	0,28	1182%
		IEA-G (%)	98,81	9,00	1098%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	ΔpH	-0,81	-1,61	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,27	0,12	225%	
	M.O. (dag/kg)	1,20	0,13	923%	
	K _r	1,91	3,25	170%	
MCT (convencional, pastilhas e critério P _{iM} /s)	Classificação	LG'	NS'	-	
	P _{iM} /s (umidade natural)	24,06	250,97	1043%	
	C (%) - Pastilhas	13,20	6,87	192%	
	I (%) -Pastilhas	5,85	18,15	310%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	S _I (kPa)	210,2	75,2	280%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0065	0,0678	1043%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0002	0,0170	8500%	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

Verifica-se a distinção de comportamento também pela metodologia MCT, onde o horizonte superior apresenta características lateríticas (LG'), em contrapartida, o solo inferior apresenta comportamento antagônico (NS') com elevado percentual de inchamento (I) e maior relação Pi_M/s . Em conjunto, os resultados corroboram para maior S_I em HS e maiores perdas de massa pelo erosímetro para HI, confirmando as observações de campo.

Como este perfil apresenta a mesma classificação pedológica que o Talude Itabira, pode-se inferir que as curvas características seguem as mesmas tendências, com maiores sucções e distribuição bimodal de poros em HS e o inverso para HI com matriz microporosa, situação que também é responsável pela maior degradação no contato entre os dois horizontes.

➤ **Ouro Branco (OBR) com cobertura em Latossolo Vermelho Acriférico Típico.**

O talude apresenta horizonte superior conservado e a porção inferior em processo de erosão, sendo a diferença de comportamento claramente visível na transição dos dois horizontes. É notável a diferenciação entre as duas parcelas quando considerada a granulometria, onde OBRHS se mostra majoritariamente argiloso, enquanto OBRHI é essencialmente composto por silte (Tabela 7.3). Adicionalmente, OBRHS apresenta maior concentração de matéria orgânica e íons Ca^{+2} , além de grau de intemperismo mais elevado (Δ pH e Kr), que em conjunto com a fração areia fina, formam uma superfície selante e de baixa permeabilidade, aumentando sua resistência, principalmente aos impactos das gotas de chuva (Tabela 7.3).

Mais uma vez, os ensaios da metodologia MCT diferenciam o horizonte superior com características lateríticas do inferior, de propriedades não-lateríticas, o qual, devido ao maior teor de silte, apresenta elevado percentual de inchamento no método expedito das pastilhas. O conjunto dos atributos físicos e químicos é responsável por maiores resistências “*in situ*” além de pequenas perdas de solos em OBRHS, visto a forte agregação existente, corroborando para a realidade de campo. Em contrapartida as perdas de solo são elevadas em OBRHI, tanto para a condição seca (K_{Dry}) quanto saturada (K_{Sat}), quando comparados à OBRHS.

Tabela 7.3 – Contextualização Pós-ensaios – Ouro Branco (OBR).

Propriedades		OBRHS	OBRHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	67,3	7,6	886%
		% Silte ¹	17,7	83,8	473%
		% Areia Fina	7,0	3,4	206%
		RD (%)	14,91	55,88	375%
		LL	50	57	114%
		IP	16	7	229%
		Atividade (T)	9,11	32,11	352%
		DMGU (mm)	2,55	0,32	773%
	IEA-G (%)	76,12	9,85	797%	
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	-0,85	-1,61	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	2,79	0,10	2790%	
	M.O. (dag/kg)	3,59	0,13	2762%	
	K _r	0,55	0,93	169%	
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)	Classificação	LA	NA ⁷	-	
	Pi _M /s (umidad. natural)	0,63	227,95	36183%	
	C (%) - Pastilhas	8,66	9,32	108%	
	I (%) -Pastilhas	2,34	16,2	692%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	Si (kPa)	202,7	62,1	326%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0006	0,0469	7817%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0006	0,0139	2317%	

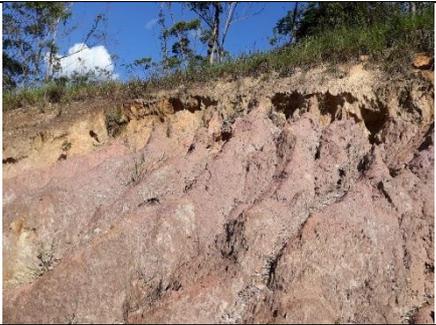
¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

➤ Mariana (MRN) com cobertura em Neossolo Regolítico Distrófico Típico

Este perfil exhibe comportamento diferenciado, por se tratar de um neossolo regolítico, em menor grau de evolução quando comparados aos latossolos, sendo que em sua composição são encontrados diversos minerais primários. Em sua porção inferior o processo erosivo se encontra avançado e acelerado, em direção ao topo do perfil, chegando a afetar o horizonte superior devido ao solapamento da base.

Os dois horizontes apresentam percentuais elevados de silte, com maior valor em MRNHS, o qual também apresenta maior teor de argila (Tabela 7.4). O maior teor de silte, em conjunto com a menor plasticidade, favorece a erosão também em MRNHS, situação que é verificada em campo pelo avanço das feições erosivas em sua direção. Mesmo com estas características, a amostra MRNHS apresenta agregados de grandes dimensões e boa estabilidade, fruto da interação conjunta entre as partículas finas e do maior conteúdo de matéria orgânica, situação que confere maior resistência a MRNHS quando comparado a MRNHI.

Tabela 7.4 – Contextualização Pós-ensaios – Mariana (MRN).

Propriedades		MRNH S	MRNH I	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	22,50	6,80	331%
		% Silte ¹	56,30	44,80	126%
		RD (%)	83,51	87,63	105%
		LL	51	28	182%
		IP	17	0	1700%
		e	1,415	0,615	230%
		DMG _U (mm)	2,04	0,46	443%
		IEA-G (%)	62,58	17,42	359%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	-1,15	-1,68	-	
	CTC _t (cmol _d /dm ³)	3,14	0,50	628%	
	M.O. (dag/kg)	2,26	0,13	1738%	
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)	Classificação	NA'	NA'	-	
	Pi _M /s (umidade natural)	3,48	178,90	5141%	
	C (%) - Pastilhas	11,94	3,01	397%	
	I (%) -Pastilhas	11,67	18,90	162%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	S _I (kPa)	168,2	66,8	252%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0121	0,0822	679%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0002	0,0380	19000 %	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

No horizonte inferior a plasticidade é inexistente (IP=0), que em conjunto com a fração silte e o baixo teor de M.O. (Tabela 7.4), são responsáveis pela baixa agregação, e por altas perdas de massa observadas pelo critério Pi_M/s (cerca de 5.000 % superior a MRNHS). O ensaio MCT convencional não foi suficiente para diferenciar o comportamento dos dois solos. Entretanto o método das pastilhas conseguiu verificar elevado percentual de inchamento para MRNHI, condição que favorece a erosão.

O solo MRNHS apresenta alta resistência *in situ* (S_I), fruto da agregação existente e da sucção atuante. Conforme visto na curva característica deste solo, onde o mesmo apresenta alta capacidade de retenção de água. Portanto, mesmo apresentando matriz microporosa MRNHS apresenta elevada porosidade que, em conjunto com as maiores sucções, conferem resistência ao material em condições não-saturadas. É fato que este solo não apresenta a distinção clara entre horizontes conforme observado para os latossolos, entretanto trata-se de solo pouco evoluído, com baixo grau de intemperismo, porém sua diferenciação entre os horizontes é nítida, principalmente pelos testes realizados no erosímetro, com baixas perdas de material.

➤ **Alegria (ALG) com cobertura em Neossolo Regolítico Distrófico Típico**

O talude em questão é conformado por uma camada superior que apesar de pequena espessura apresenta grande resistência, seguida de parcela inferior com ravinamento profundo, sendo o processo mais intenso na transição entre os dois horizontes. Assim como o talude Mariana (MRN), trata-se de um perfil de solo em menor grau de evolução, condição que é verificada por maiores concentrações de silte no horizonte superior (ALGHS), de íons cálcio e matéria orgânica, que em conjunto resultam em agregados de menores dimensões e estabilidade em água (Tabela 7.5).

Tabela 7.5 – Contextualização Pós-ensaios – Alegria (ALG).

Propriedades		ALGHS	ALGHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	26,8	5,6	479%
		% Silte ¹	36,3	42,5	117%
		RD (%)	71,24	74,40	104%
		LL	37	28	132%
		IP	15	6	250%
		Atividade (T)	3,54	24,82	701%
		DMGU (mm)	1,10	0,35	314%
		IEA-G (%)	62,58	17,42	359%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	-0,32	-1,25	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,13	0,07	186%	
	M.O. (dag/kg)	1,03	0,27	381%	
	K _r	1,34	2,32	173%	
MCT (convencional, pastilhas e critério PiM/s)	Classificação	LA'	NS'	-	
	PiM/s (umidade natural)	29,47	170,37	578%	
	C (%) - Pastilhas	9,38	3,73	251%	
	I (%) -Pastilhas	10,98	14,76	134%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	S _I (kPa)	180,2	62,9	286%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0012	0,0609	5075%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0001	0,0519	51900%	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

Apesar de agregados de menor estabilidade, foi possível verificar que o solos ALGHS apresenta maior resistência, principalmente pelos ensaio da metodologia MCT que ressaltam suas características lateríticas, com maior contração e menor expansão, confirmando a resistência a erosão observada em campo. A laterização é tão importante que o horizonte superior conseguiu resistir ao solapamento ocasionado pelo erosão do horizonte inferior (Tabela 7.5). Em contrapartida, o solo ALGHI apresenta altas perdas de massa, associadas ao inchamento verificado no método das pastilhas (14,76 %).

Por se tratar de um solo menos evoluído, os valores de resistência no solo ALGHS são menores (assim como na amostra MRNHS) quando comparados aos latossolos, entretanto a diferença de comportamento entre HS e HI neste perfil é nítida, sendo também confirmada nas perdas de material no erosímetro, por vezes superior em ALGHI, tanto em condição não-saturadas quanto saturadas.

➤ **Ouro Preto (PTO) com cobertura em Latossolo Vermelho Distrófico Típico.**

O talude é conformado por uma porção superior resistente a erosão seguida de horizonte subjacente em maior grau de degradação, o qual apresenta sulcos esparsos não muito desenvolvidos. O horizonte superior (PTOHS) possui maiores teores de argila, porém acompanhado de teores consideráveis de silte (20,2 %), o que também é responsável pelo aumento da relação de dispersão (Tabela 7.6), entretanto sua resistência é confirmada principalmente pela maior estabilidade dos agregados.

Tabela 7.6 – Contextualização Pós-ensaios – Ouro Peto (PTO).

Propriedades		PTOHS	PTOHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	45,2	13,4	337%
		% Silte ¹	20,2	32,2	159%
		RD (%)	43,65	72,49	166%
		LL	51	34	150%
		IP	20	12	167%
		Atividade (T)	5,04	5,59	111%
		DMG _U (mm)	3,28	1,09	301%
		IEA-G (%)	99,09	33,85	293%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	0,19	-0,58	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,48	0,19	253%	
	M.O. (dag/kg)	1,06	0,23	461%	
	K _r	1,48	2,92	197%	
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)	Classificação	LG'	NA'	-	
	Pi _M /s (umidade natural)	23,067	419,977	1821%	
	C (%) - Pastilhas	8,31	4,52	184%	
	I (%) -Pastilhas	1,68	17,45	1039%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	S _I (kPa)	220,6	86,2	256%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0014	0,0524	3743%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0001	0,0088	8800%	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

Os agregados do horizonte inferior (PTOHI) apresentaram maior diâmetro (1,09 mm) quando comparadas a outros horizontes inferiores, o que permite inferir acerca da

menor intensidade dos processos erosivos observados no campo. Neste contexto, as propriedades lateríticas são fundamentais na diferenciação de horizontes, sendo possível notar altas perdas de solo pelo critério $P_{iM/s}$ em PTOHI, o qual também apresenta elevado percentual de inchamento pelo método das pastilhas (17,45 %).

Os ensaios em campo determinaram maior S_U para PTOHS, ao passo que menores valores foram obtidos para PTOHI. Considerando a perda de massa determinada no erosímetro, os maiores valores foram encontrados para PTOHI, contudo verifica-se que em condições saturadas a perda diminui significativamente, provavelmente devido a sucção e distribuição de poros existente.

Portanto, é possível verificar que a variação dos atributos entre os horizontes é menor, principalmente, os índices relacionados a agregação, quando comparados aos outros latossolos. Desta forma pode-se dizer que os procedimentos executados retratam de forma similar as diferenças de comportamento observadas em campo.

➤ **Antônio Pereira (ATP) com cobertura em Latossolo Vermelho Acriférico Típico.**

Assim como no ponto anterior, este talude apresenta uma parcela superior resistente a erosão, com processo erosivo se iniciando na interseção entre os dois horizontes, porém em menor grau de degradação quando comparado as amostras (ITA, VAR e OBR). A primeira constatação é a discrepância entre os teores de partículas finas, principalmente de argila no horizonte superior (Tabela 7.7), entretanto a plasticidade de ATPHS é baixa ($IP = 9$), chegando a ser menor que o horizonte inferior. O menor IP em ATPHS, em conjunto com menores conteúdos de M.O. e íons cálcio, promove menor agregação, evidenciado pelo diâmetro dos agregados (2,18 mm).

Neste talude a condição lateríticas obtida pela metodologia MCT convencional não foi suficiente para distinção entre horizontes resistentes e erodíveis. Entretanto, o critério de erodibilidade ($P_{iM/s}$), para a umidade natural, permitiu determinar que a ATPHI está mais propenso a perdas de massa em condições de baixa umidade. Vale ressaltar que este solo apresentou baixo inchamento, o que pode estar relacionado ao seu índice de plasticidade e aos teores de íons cálcio que superaram ATPHS.

Tabela 7.7 – Contextualização Pós-ensaios – Antônio Pereira (ATP)

Propriedades		ATPHS	ATPHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	63,8	10	638%
		% Silte ¹	10	33	330%
		RD (%)	23,17	66,75	288%
		LL	30	28	107%
		IP	9	11	122%
		Atividade (T)	1,11	1,16	105%
		DMG _U (mm)	2,18	1,11	196%
		IEA-G (%)	78,42	33,33	235%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	1,28	0,27	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,12	0,15	125%	
	M.O. (dag/kg)	0,63	0,1	630%	
	K _r	0,24	1,35	563%	
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)	Classificação	LG'	LA'	-	
	Pi _M /s (umidade natural)	1,58	754,02	47723%	
	C (%) - Pastilhas	5,05	4,07	124%	
	I (%) -Pastilhas	1,16	5,17	446%	
Especiais (Resistência <i>in situ</i> , Erosímetro)	S _I (kPa)	230,8	101,4	228%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0028	0,0264	943%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0002	0,0064	3200%	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

A resistência *in situ* também possibilitou a diferenciação dos horizontes, destacando-se o valor 101,4 kPa para ATPHI, principalmente devido a maior agregação decorrente do aumento no diâmetro dos agregados. As perdas de massa obtidas no erosímetro também confirmaram o comportamento antagônico entre os dois solos, com maiores perdas em ATPHI.

A discrepância entre os dois horizontes é reduzida, principalmente pela questão da agregação, relacionada ao alto grau de intemperismo tanto de HS quanto HI, conforme pode ser verificado pelo coeficiente K_r.

➤ **Lavras Novas (LVN) com cobertura em Cambissolo Háplico Distrófico Típico.**

O perfil em questão é classificado como cambissolo, menos evoluído quando comparado aos latossolo, porém em maior grau de alteração se equiparado aos neossolos, sendo encontrado horizonte B incipiente. O horizonte superior apresenta uma estrutura coesa e muito resistente enquanto o inferior apresenta processo erosivo avançado já em processo de solapamento.

Por se tratar de um perfil menos evoluído a diferenciação entre os horizontes HS e HI é menor, porém LVNHS apresenta maiores conteúdo de argila, plasticidade e teores de matéria orgânica, além de agregados de maior diâmetro (3,09 mm) e alta estabilidade em água (Tabela 7.8). Em contrapartida, LVNHI apresenta todas as características de um solo altamente suscetível a erosão: maiores teores de silte, ausência de plasticidade, baixo índice de vazios, baixo teor de matéria orgânica, menor diâmetro e baixa estabilidade de agregados (43,97 %), atributos que confirmam o elevado potencial erosivo deste solo em campo.

Tabela 7.8 – Contextualização Pós-ensaios – Lavras Novas (LVN)

Propriedades		LVNHS	LVNHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	24	8,5	282%
		% Silte ¹	7,6	37,8	497%
		RD (%)	19,21	73,61	383%
		LL	53	0	5300%
		IP	34	0	3400%
		e	0,746	0,392	190%
		Atividade (T)	10,41	1,64	635%
		DMG _U (mm)	3,09	0,62	498%
	IEA-G (%)	95,37	43,97	217%	
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	-0,7	-1,09	-	
	Ca ⁺² (cmol/dm ³)	0,16	0,12	133%	
	M.O. (dag/kg)	0,85	0,13	654%	
	K _r	2,77	2,96	107%	
MCT (convencional, pastilhas e critério P _M /s)	Classificação	LA'	NA	-	
	P _M /s (umidade natural)	2,95	49,75	1686%	
	C (%) - Pastilhas	6,57	0	657%	
	I (%) -Pastilhas	6,06	9,66	159%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	S _I (kPa)	218	75,8	288%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0049	0,0546	1114%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0008	0,0547	6838%	

Novamente, as propriedades lateríticas auxiliam na distinção de comportamento, sendo mais evidente no horizonte superior LVNHS, o qual apresenta maior contração e ausência de inchamento. Os ensaios de campo verificaram a alta resistência *in situ* de LVNHS e os menores valores para LVNHI (Tabela 7.8). Os ensaios obtidos pelo erosímetro confirmaram o caráter antagônico observado em campo, com elevadas perdas de solo no horizonte inferior, confirmando sua alta suscetibilidade a erosão.

➤ Av. Maria Firmino (AMF) com cobertura em Latossolo Vermelho Eutrófico Típico.

Considerando os processos erosivos em latossolos, o talude em questão é o que apresenta a menor diferenciação entre horizontes. Os processos erosivos têm início em sua altura média se intensificando em direção a porção inferior, contudo este processo é intensificado pela inclinação e comprimento de rampa que concentram o fluxo de água em sua base.

Os ensaios de laboratórios seguem a mesma tendência do observado para os outros latossolos, onde os maiores percentuais de argila, índice de plasticidade, íons cálcio e M.O. atuam de forma conjunta para aumentar o diâmetro e a estabilidade de agregados no horizonte superior (Tabela 7.9). Entretanto a diferença entre os dois horizontes é menor se comparada a outros perfis de latossolos amostrados (ex: ITA e VAR), inclusive AMHI apresenta concentração expressiva de argila (35,6 %), com menores percentuais de silte e menor relação de dispersão.

Tabela 7.9 – Contextualização Pós-ensaios – Av. Maria Firmino (AMF).

Propriedades		AMFHS	AMFHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	70,6	35,6	198%
		% Silte ¹	10,3	13,3	129%
		RD (%)	36,09	46,05	128%
		LL	59	55	107%
		IP	25	16	156%
		Atividade (T)	2,52	5,19	206%
		DMG _U (mm)	3,05	1,54	198%
		IEA-G (%)	93,56	46,25	202%
Químicas (Análises TFSA, FRX)	Δ pH	0,84	0,42	-	
	Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	1	1,23	123%	
	M.O. (dag/kg)	0,13	0,4	308%	
	K _r	1,88	3,53	188%	
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _{M/s})	Classificação	LG'	NA'	-	
	Pi _{M/s} (umidade natural)	24,23	87,79	362%	
	C (%) - Pastilhas	12,87	10,08	128%	
	I (%) -Pastilhas	8,9	11,45	129%	
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)	Si (kPa)	187,6	78,1	240%	
	K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0103	0,0322	313%	
	K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0011	0,0121	1100%	

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

As propriedades lateríticas se destacam em AMFHS , enquanto que no horizonte inferior a ausência das mesmas é responsável por maiores perdas de solo e inchamento diametral. A menor diferenciação também é confirmada pelas perdas de massa obtidas no erosímetro, entretanto AMFHI apresenta perda de massa em algumas vezes superior ao obtido para AMFHS.

Adicionalmente, verifica-se que o processo erosivo tem início justamente no contato entre os horizontes, mais uma vez relacionada à distribuição de poros e a sucção atuante, conforme visto para o talude ITA, porém em menor intensidade. Portanto, os resultados dos procedimentos realizados em laboratório e em campo confirmam que a menor diferenciação das propriedades intrínsecas se relaciona a menor intensidade dos processos erosivos observados em campo

➤ **Av. Congonhas (CNG) com cobertura em Latossolo Vermelho Distrófico Cambissólico.**

Trata-se de um perfil de latossolo, conformado por horizonte superior de coloração avermelhada resistente aos processos erosivos, seguido de porção inferior a qual apresenta processo erosivo avançado com processo de ravinamento profundo. O horizonte superior (CNGHS) apresenta elevados percentuais de argila (75,2 %), maior plasticidade e maiores conteúdos de M.O. e íons cálcio, que em conjunto aumentam a agregação e a estabilidade frente a ação hídrica (Tabela 7.10), confirmando o caráter resistente de campo.

Em contrapartida, CNGHI apresenta os atributos relacionados a maior suscetibilidade a erosão, principalmente os maiores teores de silte, levando a agregados de menor estabilidade em água (25,69 %). Adicionalmente, as propriedades lateríticas conseguem definir de forma nítida o comportamento antagônico, onde CNGHS apresenta menores perdas de massa, maior contração e menor inchamento quando comparada à CNGHI. Os ensaios em campo confirmam a maior resistência *in situ* no horizonte Superior, acompanhado pelas menores perdas no erosímetro. O solo CNGHI, apresentou maiores perdas no erosímetro para a condição seca, entretanto ao se analisar a condição saturada, ocorre um decréscimo significativo nas perdas de material, levando a crer que a erosão em campo é mais intensa sob condições não-saturadas.

Tabela 7.10 – Contextualização Pós-ensaios – Av. Congonhas (CNG)

Propriedades		CNGHS	CNGHI	Δv	
	Físicas	% Argila ¹	72,5	15,5	468%
		% Silte ¹	7,6	37,8	497%
		RD (%)	19,21	73,61	383%
		LL	57	49	116%
		IP	24	13	185%
		e	1,152	0,888	130%
		Atividade (T)	1,32	4,83	366%
		DMG _U (mm)	3,15	0,84	375%
	IEA-G (%)	96,33	25,69	375%	
Químicas (Análises TFSA, FRX)		Ca ⁺² (cmol _c /dm ³)	0,27	0,06	450%
		M.O. (dag/kg)	0,53	0,10	530%
		K _r	0,92	1,87	203%
MCT (convencional, pastilhas e critério Pi _M /s)		Classificação	LG'	NS'	-
		Pi _M /s (umidade natural)	28,67	126,45	441%
		C (%) - Pastilhas	9,03	7,09	127%
		I (%) - Pastilhas	1,9	12,8	674%
Especiais (Resistência in situ, Erosímetro)		S _I (kPa)	239,1	103,3	231%
		K _{Dry} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0017	0,046	2706%
		K _{Sat} (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,0017	0,0022	129%

¹Granulometria determinada com uso de aditivo defloculante.

7.2. PROCEDIMENTO PARA INVESTIGAÇÃO DA ERODIBILIDADE EM TALUDES DE CORTE

Nos Capítulos 5 e 6 foram apresentadas os principais atributos dos solos resistentes e suscetíveis aos processos erosivos, contemplando propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas. Complementando os resultados, na seção anterior foi investigada a correspondência dos resultados obtidos ao comportamento dos solos em campo, de modo que os resultados se mostram satisfatórios na identificação do comportamento antagônico dos solos, ressaltando que a discrepância dos parâmetros obtidos se associou a intensidade dos processos erosivos observados *in situ*.

Considerando estas informações, nesta seção foi formulado um procedimento para investigação da erodibilidade em taludes de corte, principalmente daqueles dotados de baixa cobertura vegetal e muito próximos as vias de circulação, onde os danos potenciais seriam mais elevados. Entretanto, não existe consenso acerca de critério único para a estimativa da erodibilidade, devido às diferentes tipologias de solos e às

condições ambientais existentes. Portanto, torna-se viável estabelecer um procedimento para investigação, considerando as observações de campo na maior resistência ou suscetibilidade aos processos erosivos. Para tal, o procedimento de investigação da erodibilidade é proposto conforme descrito a seguir:

- Investigação das condições *in situ*: verificar os potenciais problemas oriundos (ou que poderão surgir) da exposição do talude de corte, bem como do perfil de solo que o caracteriza;
- Avaliação direta da erodibilidade: Utilizar os procedimentos diretos de laboratório e campo na estimativa da resistência ou suscetibilidade dos solos aos processos erosivos, os quais serão considerados como metodologia principal;
- Avaliação indireta da erodibilidade: Utilizar os ensaios de laboratório mais relevantes na estimativa da resistência ou suscetibilidade dos solos à erosão, sendo considerados como metodologia complementar, ou no caso da impossibilidade da avaliação de forma direta.

➤ **Investigação das condições *in situ***

As observações de campo devem contemplar a altura, inclinação e extensão dos cortes nos taludes, além da distância que se encontram das vias de circulação, no intuito de hierarquizar locais preferenciais para a estimativa da erodibilidade e, posteriormente, para a execução de soluções que minimizem problemas futuros. Neste contexto, é interessante uma avaliação acerca da intensidade da cobertura vegetal, uma vez que a mesma exerce papel fundamental na proteção superficial e resistência do solo ao processo erosivo, visto que grande parte dos problemas de erosão se associam à taludes desprovidos ou com baixa cobertura vegetal.

A descrição pedológica do perfil exposto é de grande importância, visto a diferença de comportamento entre os diversos horizontes que compõe os diferentes tipos de solos. Informações como a macroestrutura, espessura e transição entre horizontes auxiliam na compreensão dos processos erosivos que podem atuar sob estas condições. Conforme foi visto neste estudo, a exposição de horizonte B em latossolos pode se relacionar a solos de baixo potencial erosivo, enquanto no horizonte C existe maior potencial para a degradação, podendo levar a ruptura do talude.

A análise da natureza e da intensidade dos processos erosivos também se torna igualmente importante na estimativa da erodibilidade. Como por exemplo: o processo de selagem superficial que se associa a resistência à erosão, principalmente nos latossolo. Em contrapartida, as feições erosivas apresentam maior incidência no horizonte C, com maior intensidade na interface entre os horizontes, visto a alteração das propriedades relacionadas a sucção e a distribuição de poros.

Embora não tenham sido avaliados neste estudo, sugere-se ainda que se considere a insolação, o efeito da direção dos ventos e forma do talude (côncavo, linear ou convexo) tanto no plano horizontal como vertical. Vale ressaltar que os procedimentos aqui descritos são baseados em observações para taludes de corte, sendo que a extensão do proposto para outras abordagens necessita de análise preliminar a fim de verificar a adequação a realidade dos problemas encontrados no campo.

➤ **Avaliação direta da erodibilidade**

Para a avaliação direta da erodibilidade é sugerido o uso do erosímetro para a determinação das perdas de solo nas condições não saturadas, a partir de amostras indeformadas coletadas em campo. Em conjunto com este ensaio sugere-se o uso do mini vane test sempre que possível, utilizado na determinação da resistência “*in situ*”, sendo que estes dois ensaios constituem a metodologia principal para investigação da erodibilidade em taludes de corte.

Considerando as perdas de solo determinadas pelo erosímetro, optou-se por trabalhar apenas com as determinadas para a condição não saturada (seca ao ar por 72 horas), pois em muitos horizontes foi observado que as maiores perdas de material ocorrem sob esta condição, associando-se as repentinas pressões na fase gasosa que podem levar a ruptura dos elos entre os agregados, geralmente associadas as primeiras chuvas após grandes períodos de estiagem, processo comum em solos de maior potencial erosivo. Desta forma, foi elaborado o seguinte classificação quanto à erodibilidade:

- $K_{Dry} \leq 0,01 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ – Baixa Erodibilidade (BE)
- $0,01 < K_{Dry} < 0,02 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ – Média Erodibilidade (ME)
- $K_{Dry} \geq 0,02 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ – Alta Erodibilidade (AE)

A baixa erodibilidade foi definida de acordo com os resultados obtidos para os horizontes superiores (HS) dotados de maior agregação e estabilidade em relação a ação hídrica (ITAHS, VARHS e OBRHS por exemplo) e a alta erodibilidade definida de acordo com os resultados dos horizontes inferiores (HI) de maior perda de material (ITAH I e VARHI por exemplo). Conforme visto na seção anterior alguns taludes exibiram menor discrepância entre seus horizontes e foram estas amostras que configuraram a faixa média de erodibilidade.

A resistência “*in situ*” (S_I) apresentou boa correlação com a suscetibilidade à erosão, conforme a análise de variância (ANOVA) do Capítulo 5, permitindo distinguir solos resistentes daqueles erodíveis. No entanto, existe uma diferenciação conforme o tipo de horizonte amostrado, sendo que nos horizontes B latossólicos (Bw) foram obtidos maiores S_I (geralmente acima de 200 kPa) seguido das camadas superiores dos neossolo (MRNHS e ALGHS) com valores compreendidos entre 150 e 200 kPa. Complementando os resultados, os solos erodíveis tiveram seus valores médios inferiores a 120 kPa. Sendo assim é proposta a seguinte classificação, considerando um faixa de transição entre solos de alta a baixa erodibilidade:

- $S_I \geq 200$ kPa – Baixa Erodibilidade (BE)
- $120 < S_I < 200$ kPa – Média Erodibilidade (ME)
- $S_I \leq 120$ kPa – Alta Erodibilidade (AE)

É importante destacar que os valores de S_I que compõe o critério acima se tratam de valores médios, visto que medidas individuais podem apresentar desvio acentuado da média. Neste procedimento é sugerido ao menos dez repetições para o cálculo da resistência média

➤ **Avaliação indireta da erodibilidade**

A avaliação indireta da erodibilidade considerou os principais atributos que permitiram distinguir os solos resistentes daqueles suscetíveis aos processos erosivos. Nesta avaliação também foi considerada a discrepância dos resultados de um mesmo horizonte e as condições observadas em campo, de maneira a definir solos de baixa e alta

erodibilidade, bem como a faixa de transição entre os mesmos. No procedimento de investigação aqui descrito, a avaliação indireta é utilizada como método complementar na investigação da erodibilidade ou devido a impossibilidade da execução dos procedimentos diretos descritos no item anterior.

Em um primeiro momento, torna-se interessante a associação da erodibilidade às características geotécnicas dos solos (granulometria e plasticidade), principalmente pela facilidade e simplicidade em suas determinações, além de estarem relacionadas a outras propriedades como a resistência ao cisalhamento e a estabilidade de agregados.

Conforme verificado no Capítulo 5 os solos resistentes a erosão apresentam maiores percentuais da fração argila, enquanto os erodíveis exibem maiores teores de silte. Em conjunto com a fração fina se associam as propriedades plásticas, representadas pelo índice de plasticidade (IP), de modo que os solos que resistem a erosão apresentam maiores valores para este atributo, reflexo dos maiores conteúdos de argila, da natureza do argilomineral, grau de intemperismo, capacidade de troca catiônica dentre outros. Vale ressaltar que para a determinação da distribuição de partículas deve ser feito o uso de aditivo defloculante. Desta forma, o seguinte critério foi formulado:

- $IP \geq 20$ e Teor de Argila $\geq 55\%$ – Baixa Erodibilidade (BE)
- $10 < IP < 20$ – Média Erodibilidade (ME)
- $IP \leq 10$ e Teor de Silte $\geq 30\%$ – Alta Erodibilidade (AE)

O maior conteúdo de finos não se relaciona diretamente ao maior índice de plasticidade, visto que em grande parte se deve a natureza do argilomineral. Contudo, a maior fração argila se associa a maior agregação e permeabilidade, propriedades diretamente relacionadas a resistência aos processos erosivos.

Os resultados indicaram forte associação entre a erosão e os índices relacionados ao diâmetro e a estabilidade de agregados, de maneira que estes atributos foram selecionados para a estimativa da erodibilidade. Conforme explicado nas seções anteriores, optou-se por trabalhar com o diâmetro médio geométrico via úmida e o índice de estabilidade de agregados (DMG_U e IEA-G), visto que o diâmetro médio

ponderado (DMP) é indicado apenas em situações onde ocorre a distribuição simétrica dos agregados. Deste modo, foi elaborado o seguinte critério:

- $DMG_U \geq 1,80 \text{ mm}$ e/ou $IEA-G \geq 70,0 \%$ – Baixa Erodibilidade (BE)
- $1,00 < DMG_U < 1,80 \text{ mm}$ e $30,0\% < IEA-G < 70,0\%$ – Média Erodibilidade (ME)
- $DMG_U \leq 1,00$ e $IEA-G \leq 30,0 \%$ – Alta Erodibilidade (AE)

Solos que apresentam agregados de maiores dimensões são propensos a maior estabilidade em água, principalmente pelos maiores conteúdos de argila, matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio que aumentam a cimentação entre as partículas. Em contrapartida, os maiores teores de silte são responsáveis pela instabilidade dos solos erodíveis frente a ação hídrica.

Em conjunto com a caracterização geotécnica e a estabilidade dos agregados, também verifica-se forte correlação das propriedades lateríticas com a ocorrência dos processos erosivos. Os resultados demonstraram que solos de comportamento lateríticos tendem a resistir enquanto que os de comportamento não lateríticos são mais propensos a erosão. Desta forma a classificação MCT também pode ser utilizada na distinção de solos quanto à erodibilidade:

- Baixa Erodibilidade (BE): LG' e LA
- Em transição ou potencialmente erodíveis: LA' e NA'
- Alta Erodibilidade (AE): NS' e NA

Os solos de comportamento lateríticos argilosos (LG') e as areia de comportamento laterítico (LA) exibem resistência aos processos erosivos, ao passo que solos onde as propriedades lateríticas são ausentes, associados a maiores teores de silte e areia fina são mais suscetíveis a erosão. Neste contexto, os solos classificados por LA' e NA' apresentaram comportamentos tanto de solos erodíveis quanto resistentes, o que pode qualificá-los como solos potencialmente erodíveis, sendo necessárias informações adicionais para a estimativa de seu comportamento.

Como forma de resolver a limitação da metodologia MCT, têm-se o critério de erodibilidade baseado na perda de massa por imersão modificada (P_{iM}) e do coeficiente de sorção (s), o qual se mostrou promissor na identificação de solos potencialmente erodíveis. Portanto, nesta abordagem será considerado o critério proposto por Pejon (1992), da seguinte forma:

- $P_{iM}/s \leq 40$ – Baixa Erodibilidade (BE)
- $P_{iM}/s > 40$ – Alta Erodibilidade (AE)

Para o critério P_{iM}/s não foi estipulado qual a melhor condição para a realização do ensaio, visto que, independente dos teores de umidade iniciais, foi possível determinar a diferença de comportamento entre os solos resistentes e aqueles potencialmente erodíveis. Entretanto, destaca-se que as maiores perdas são obtidas para as condições não saturadas, associadas a baixos teores de umidade inicial, visto que a saturação acelerada e maior probabilidade da pressão na fase ar podem superar a coesão e o atrito entre os agregados.

No intuito de sistematizar os critérios adotados descritos anteriormente foi elaborado o fluxograma da Figura 7.1, com destaque para a avaliação da erodibilidade por meio do erosímetro (definida aqui como metodologia de investigação principal), sendo a mesma complementada pela avaliação da resistência in situ obtida pelo mini vane test (S_I). Vale ressaltar que é recomendável, sempre que possível a execução dos procedimentos indiretos ou em caso onde ocorra a impossibilidade da execução dos procedimentos de avaliação direta.

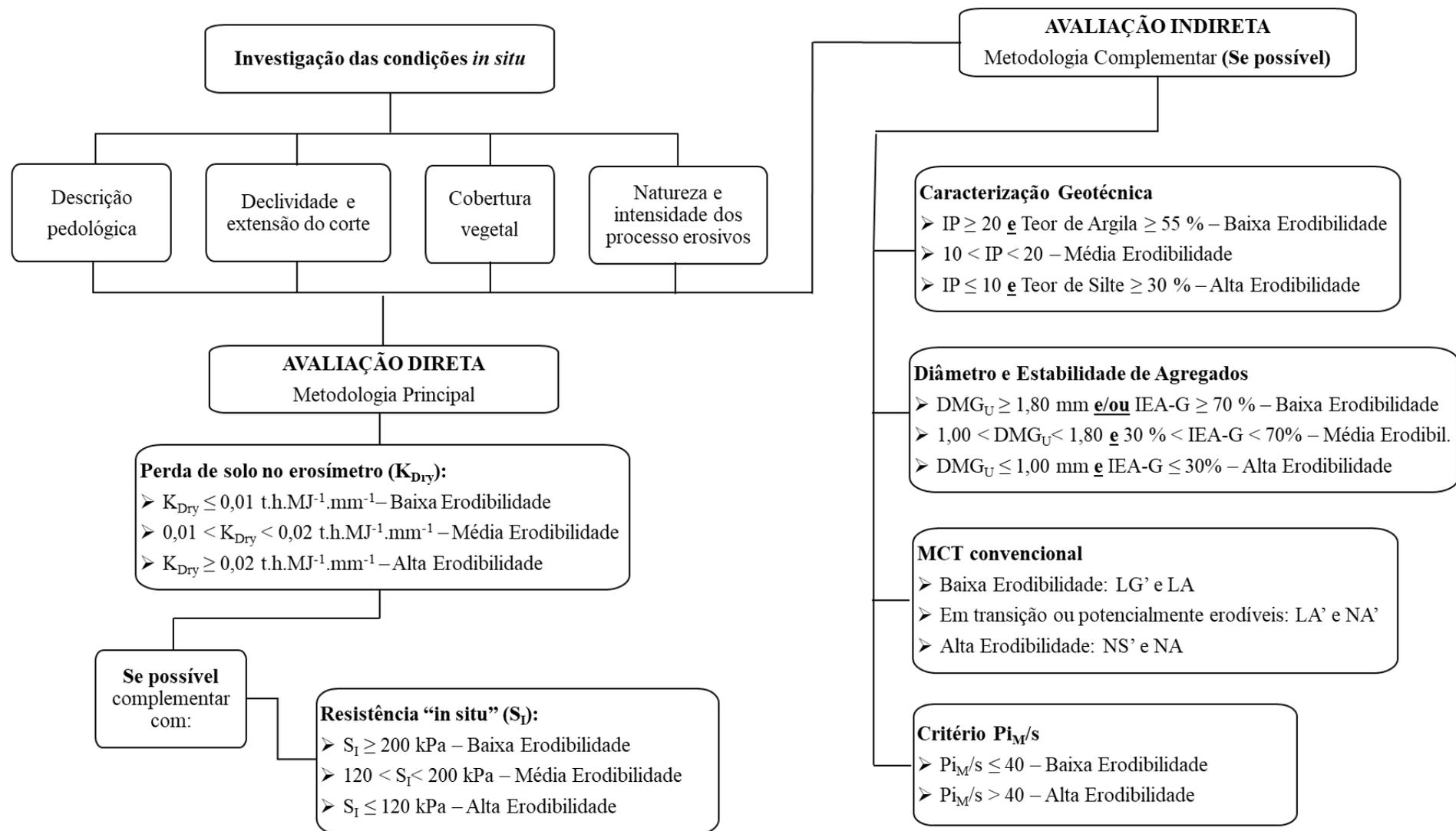


Figura 7.1 – Procedimento proposto para investigação da erodibilidade de solos em taludes de corte.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

8.1. CONCLUSÕES

A erodibilidade se relaciona à diversos atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos, contribuindo para que a mesma seja a propriedade mais complexa que regula o processo erosivo. Além disso, a erodibilidade também é influenciada por aspectos de natureza externa como o clima, a cobertura vegetal, a qualidade do ar e da água de chuva e a geomorfologia local. Adicionalmente, também deve-se considerar o uso do solo em questão, de maneira que abordagem agrícola é diferente dos estudos realizados para determinação potencial erosivo em taludes de corte, principalmente pelas modificações estruturais devido ao tráfego de máquinas e insumos utilizados.

Considerando a abordagem em taludes de corte, torna-se importante a contextualização geológica, pedológica e ambiental do mesmo, uma vez que a associação destes fatores será responsável pela formação de diferentes tipos de solos. Conforme verificado, o comportamento dos latossolos, em relação à erosão, é diferente do observado para os neossolos e cambissolos abordados no estudo, principalmente no horizonte B latossólicos (Bw). Entretanto, observou-se que os horizontes erodíveis correspondiam ao horizonte C, sendo que o processo erosivo era mais intenso na transição de horizontes, confirmando que o processo de intemperismo e pedogênese contribuem enormemente para a evolução dos solos, se relacionando diretamente com a resistência ou suscetibilidade aos processos erosivos.

Os resultados demonstraram influência das propriedades físicas, como a distribuição de partículas na suscetibilidade aos processos erosivos. Em resumo, maiores percentuais de argila são responsáveis por maiores resistências, principalmente pelos processos de agregação e cimentação dos grãos. Em contrapartida os horizontes erodíveis (HI) apresentam conteúdos elevados da fração silte, se relacionando às maiores perdas de solo. Vale ressaltar que, em alguns casos, observou-se a influência da fração areia fina na resistência à erosão, principalmente quando associada ao comportamento laterítico.

Em conjunto com a distribuição granulométrica encontram-se as propriedades plásticas, representadas principalmente pelo índice de plasticidade (IP), de maneira que maiores valores se relacionam à conservação frente à ação erosiva.

Ainda tratando das propriedades físicas, destacaram-se os resultados relacionados à estabilidade de agregados, confirmando que a resistência à erosão se relaciona a agregados de maior diâmetro e a maior estabilidade após o peneiramento úmido. Basicamente os agregados dos horizontes superiores (resistentes à erosão), mantêm os maiores diâmetros mesmo após a submersão em água, em contrapartida, nos horizontes inferiores (solos erodíveis) o contato entre os grãos e os eventuais pacotes de argila existentes são desfeitos pela interação com a água

Os resultados da estabilidade de agregados, bem como a resistência dos solos aos processos erosivos apresentam relação com a sucção mátrica e a distribuição de poros. Em resumo, a presença e estabilidade dos agregados nos horizontes superiores (HS) gera os macroporos que correspondem a volume maiores a serem ocupados pela fase gasosa e, portanto, a pressão na fase ar se torna pequena. Em contrapartida, nos horizontes erodíveis (HI) existe pouca agregação, impossibilitando a presença de macroporos. Nestes solos as partículas estão relativamente livres se comparadas às que compõe os agregados dos horizontes superiores (HS) e os poros são menores, possibilitando a compressão da fase ar e ampliação da pressão positiva atuante, resultando em rupturas e na liberação de partículas, dando início ao processo erosivo.

A distribuição de poros interfere no comportamento dos solos durante o umedecimento, situação que se relaciona ao início da precipitação. Em solos com distribuição de poros bimodal (como nos latossolos), a água é drenada rapidamente pelos macroporos, sendo encaminhada aos meso e, posteriormente, para os microporos, diminuindo assim a ação do escoamento superficial. Em solos de matriz majoritariamente microporosa, condição dos horizontes inferiores, observa-se a diminuição abrupta da sucção com a saturação, o que os torna extremamente suscetíveis a erosão quando em contato com a água.

Os ensaios químicos obtidos para a fração terra fina seca ao ar e a fluorescência de raios x confirmaram que os solos em maior grau de intemperismo estão menos suscetíveis a

erosão. É possível verificar o efeito do teor de matéria orgânica e dos íons cálcio (Ca^{+2}) na maior estabilidade de agregados. Por meio dos coeficientes K_i , K_r e K_e foi possível verificar que aumento nos óxidos de ferro e alumínio se relaciona ao aumento na resistência à erosão, principalmente na cimentação e formação de agregados mais estáveis que resistem as intempéries.

A metodologia MCT também demonstrou relevância na investigação da erodibilidade, onde os solos classificados por LG' e LA apresentaram resistência aos processos erosivos, caráter confirmado pelas baixas perdas de massa após a submersão em água. Em contrapartida, solos NS' e NA apresentaram alta suscetibilidade a erosão com perdas de massa elevada, associando-se ao comportamento de solos erodíveis. Estes resultados confirmam que a resistência à erosão se associa às propriedades lateríticas, enquanto sua ausência se relaciona ao início do processo erosivo. As classificações LA' e NA' apresentaram comportamento ambíguo associado tanto a solos resistentes quanto erodíveis, situação que torna os solos deste grupo como potencialmente erodíveis, necessitando de maiores informações acerca de seu comportamento.

O método expedito das pastilhas MCT também apresentou resultados relevantes na estimativa da erodibilidade, demonstrando que os solos resistentes à erosão apresentam maiores contrações, ao passo que solos erodíveis exibem maior inchamento quando em contato com a água. Além disso, os testes qualitativos feitos com as esferas em água permitem estimar o potencial de desagregação.

Adicionalmente, o critério de erodibilidade MCT ($P_{iM/s}$) apresentou excelente aplicação às amostras estudadas, demonstrando que o valor crítico definido por Pejon (1992) permite distinguir com clareza os solos resistentes (HS) daqueles potencialmente erodíveis, tanto para a condição de umidade natural quanto para a condição seca ao ar por 72 horas. Entretanto, também torna-se interessante avaliar o comportamento destes solos em condições saturadas.

A resistência “*in situ*” (S_I) se mostrou promissora na estimativa da erodibilidade, principalmente pela diferença entre os horizontes superiores (HS) e inferiores (HI). Por meio da Análise de Variância (ANOVA) foi possível confirmar que os horizontes B

latossólicos (Bw) possuem maiores resistências (geralmente acima de 200 kPa), enquanto que os solos erodíveis exibiram resistências menores (inferiores a 100 kPa ou próxima a este valor). Os horizontes superiores dos neossolos apresentaram resistência menores quando comparados aos horizontes latossólicos, devido ao menor grau de intemperismo e evolução, porém seus valores superam a S_I encontrada para os solos erodíveis.

A resistência “*in situ*” se associa a diversas outras propriedades dos solos também relacionadas a erodibilidade, como: os conteúdos de argila e silte, índice de plasticidade, matéria orgânica, CTC, diâmetro e índice de estabilidade. Esta associação com outras propriedades dos solos transforma S_I em um parâmetro promissor na estimativa da erodibilidade. Entretanto, são necessários mais estudos acerca da influência do grau de saturação e da sucção atuante nos valores de S_I , incluindo a extrapolação destas análises para outros horizontes.

No intuito de determinar as perdas de solos de forma mais rápida e considerando a estrutura e arranjo dos agregados *in situ*, foi desenvolvido o erosímetro para estimativa do potencial erosivo de solos a partir de amostras indeformadas. Nos testes preliminares o equipamento se mostrou promissor para distinção de comportamento entre as amostras ITHA e ITAHS, resultado que foi confirmado posteriormente para as demais amostras. Ao final, foi possível verificar a correlação entre os resultados do erosímetro e as principais propriedades do solo, demonstrando que os mesmos atributos que interferem no processo erosivo se relacionam as perdas de material obtidas, podendo presumir que o equipamento representa de forma semelhante o destacamento de partículas observados em campo.

Ainda foi possível verificar que a saturação inicial interfere nas perdas de solo, sendo que algumas amostras de horizontes erodíveis, em condições saturadas, apresentaram redução nas perdas de solo, ao passo que em baixos teores de umidade estas amostras apresentaram perdas de material elevadas, resultado da perda de sucção abrupta com a saturação e a maior probabilidade da pressão na fase ar superar a coesão entre os agregados e partículas do solo.

As perdas de massa obtidas no erosímetro foram correlacionadas com metodologias indiretas, consagradas na literatura, de estimativa do fator K, demonstrando que estas superestimam a erodibilidade principalmente para solos de granulometria homogênea. Adicionalmente, observa-se que a associação dos métodos indiretos representa melhor o processo erosivo para as condições não-saturadas em baixos teores de umidade, provavelmente em detrimento da perda de sucção com a saturação, conforme explicitado anteriormente.

A contextualização após os ensaios de campo e laboratório se mostrou interessante, pois permitiu verificar a sensibilidade dos procedimentos em relação ao comportamento dos solos *in situ*. Por meio deste procedimento foi possível verificar que a intensidade na discrepância dos resultados encontrados se relaciona com a diferença de comportamento dos solos em campo, ou seja, quanto maior a diferença de comportamento em campo mais diferiram os parâmetros de laboratório. Estas observações se tornaram evidentes quando analisados os percentuais de silte e argila, IP, matéria orgânica (M.O.), metodologia MCT, S_1 e as perdas de massa obtidas no erosímetro.

Além disso, a contextualização pós ensaio foi importante para definição do procedimento de investigação da erodibilidade proposto, onde é possível definir os solos de alta e baixa erodibilidade, além de uma faixa de transição, classificada como de média erodibilidade. Na formulação deste procedimento, foram considerados os resultados mais relevantes na distinção dos dois horizontes em um mesmo talude, ressaltando a importância das observações de campo e da classificação morfológica e pedológica para avaliação da erodibilidade em taludes de corte. Vale ressaltar que o procedimento proposto foi centrado nas determinações diretas de perdas de solo obtidas por meio do erosímetro, podendo ser complementado pela avaliação da resistência *in situ* com uso do mini vane test, consistindo na metodologia principal de investigação. Adicionalmente é proposta uma metodologia indireta que deve ser executada sempre que possível, em conjunto com a abordagem direta ou no caso da impossibilidade de uso do erosímetro.

Os procedimentos adotados, bem como os resultados obtidos em campo e laboratório demonstraram, em um primeiro momento, que a abordagem da erodibilidade em taludes

de corte deve ser diferente da realizada para fim agrícolas, em função das diferentes características estruturais entre as duas situações. A partir do estudo em taludes de corte da região do Quadrilátero Ferrífero, verificou-se que alguns ensaios são mais relevantes na estimativa da erodibilidade, como a distribuição de partículas, índice de plasticidade, estabilidade de agregados e a metodologia MCT, além de demonstrar o potencial do erosímetro desenvolvido e da resistência “*in situ*” a partir do mini Vane Test (S_1). Portanto, as abordagens e os instrumentos utilizados neste estudo podem se traduzir em um diagnóstico rápido, a partir da identificação dos problemas *in situ*, sendo possível hierarquizar decisões e medidas de controle para a minimização de problemas futuros ocasionados pela erosão.

8.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões complementares a esta pesquisa citam-se as seguintes proposições:

- Extrapolação da metodologia e das observações realizadas a solos de outras regiões;
- Quantificar área superficial específica dos solos estudados por meio de técnicas avançadas, como adsorção física de vapor de nitrogênio, por exemplo;
- Aplicar o critério de erodibilidade MCT (P_{iM}/s) considerando amostras previamente saturados por período mínimo de 24 horas;
- Realizar os ensaios de resistência não-drenada *in situ* em condições próximas a saturação;
- Avaliar a correspondências das cargas hidráulicas utilizadas no erosímetro a chuvas de máxima intensidade em campo;
- Avaliar as perdas de solo no erosímetro considerando menores intervalos de tempo na execução do ensaio (por exemplo: 4, 8, 10, 15 e 30 minutos);
- Verificar a aplicabilidade de um amostrador tripartido para a retirada de amostras indeformadas e sua posterior inserção no erosímetro desenvolvido;
- Avaliar a associação dos diversos graus de saturação e, conseqüentemente, da sucção atuante, nas perdas de massa obtidas pelo erosímetro;
- Aumentar o número de ensaios no erosímetro para cada amostra para posterior análise de variância (ANOVA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDI KOUPAI, J.; FATAHIZADEH, M.; MOSADDEGHI, M. R. *Effect of pore water on pH mechanical properties of clay soil*. Bull of Eng Geol Environ. 2019.

ABNT. *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento*. NBR 9604. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 13 p. 2016a.

ABNT. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. NBR 6457. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 12 p. 2016b.

ABNT. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. NBR 6458. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 14 p. 2016c.

ABNT. *Rochas e Solos*. NBR 6502. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 18 p. 1995.

ABNT. *Solo – Análise Granulométrica*. NBR 7181. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 16 p. 2016d.

ABNT. *Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS*. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 5 p. 1996.

ABNT. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. NBR 6459. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 9 p. 2016e.

ABNT. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. NBR 7180. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 7 p. 2016f.

ABNT. *Solo – Solos argilosos dispersivos – identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test)*. NBR 14114. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 8p. 1998.

AGUIAR, V. G. *Bacia hidrográfica do Córrego Granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana*. Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Construção Civil, Goiânia - GO, Dissertação de Mestrado. 95 p. 2009.

ALCÂNTARA, M. A. T. *Estudo da erodibilidade de alguns solos do estado de São Paulo*. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. Dissertação de Mestrado. 129 p. 1997.

ALKHARABSHEH, M. M.; ALEXANDRIDIS, T. K.; BILAS, G.; MISOPOLINOS, N. SILLEOS, N. *Impacto of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS*. *Procedia Environmental Science*, v. 19, 912-921 p. 2013.

ALKIMIN, F. F.; MARSHAK, S. *Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Cráton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. In: *Precambrian Research*, 90:29-58. 1998.

ALMEIDA, A. V. D. L.; CORRÊA, M. M.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; ANTORO, K. R.; ANTONINO, A. C. D. *Atributos físicos, macro e micromorfológicos de neossolos regolíticos no agreste meridional de Pernambuco*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39: 1235-1246 p. 2015.

ALMEIDA, J. G. R. *Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO*. Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia - GO, Dissertação de Mestrado. 135 p. 2014.

AMPONTUAH, E. O.; ROBINSON, J. S.; NORTCLIFF, S. *Assessment of soil particle redistribution on two contrasting cultivated hillslopes*. *Geoderma* 132: 324-343. 2006.

ANGULO-MARTÍNEZ, M., BERGUERIA, S., NAVAS, A., MACHÍN, J. *Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain*. *Geomorphology* 175-176, 38 – 44 p. 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials D5298 – 16. *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. Philadelphia. 6 p. 2016.

BACELLAR, L. A. P. *Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, Tese de Doutorado, 240 p. 2000.

BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R. V.; PAZ-FERREIRO, J. *Proporção e tamanho de sedimentos e teor de carbono orgânico na enxurrada e no solo para dois cultivos e duas formas de semeadura*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, 1701 – 1710 p. 2010.

BASTOS, C. A. B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre – RS, Tese de Doutorado, 303 p. 1999.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y.; MILITITSKY, J. *Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas*. *Teoria e prática na engenharia Civil*, 2: 9 -18p. 2001.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; CORREA, M. M.; COSTA, L. M. *Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes*

características hidrofóbicas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa -MG v. 29, 21-31 p. 2005.

BENNETT, H. H. *Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate American soils, with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties*. Soil Sci., v. 21, 349 -375 p. 1926.

BERNATEK-JAKIEL, A.; POESEN, J. *Subsurface erosion by soil piping: significance and reserach needs*. Earth-Science Reviews, v. 185, 1107-1128 p. 2018.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 5ª edição, São Paulo - SP. Editora Ícone, 355 p. 2005.

BJERRUM, L. *Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others)*. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow;111-59. 1973.

BONDER, B. H. *Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campians obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. Dissertação de Mestardo. 152 p. 2008.

BOUYOUCOS, G. J. *The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion*. J. Am. Soc. Agron., v. 27, 738 – 741 p. 1935.

BOWEN, N. L. *The evolution of igneous rocks*. New Jersey, Princeton University Press. 1928. Não Paginado

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. D.; REINERT, D. J. *Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um nitossolo vermelho distrófico*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, 379-386 p. 2007.

BRASIL. Ministério dos transportes, Portos e Aviação Civil. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Método de ensaio DNER-ME 256 – Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Estabelece o método para determinar a perda de massa por imersão em água, de corpos de prova compactados em laboratório, com equipamento miniatura*. Brasília, DNER, 6p. 1994 a.

BRASIL. Ministério dos transportes, Portos e Aviação Civil. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Método de ensaio DNER-ME 258 – Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. Brasília, DNER, 14 p. 1994 b.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Paper 3. Colorado State univ., Fort Collins, CO, USA. 1964.

BRYAN, R. B. *Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope*. Geomorphology, v. 32, 385 – 415 p. 2000.

BRYAN, R. B. *The development, use and efficiency of indices of soil erodibility*. Geoderma, v. 2, 5 – 26 p. 1968.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (Org.); SALES, M. M. (Org.); SOUZA, N. M. (Org.); MELO, M. T. S. (Org.). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília. FINATEC. 464 p. 2006.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *Erosão: origens, soluções e responsabilidade*. In: V Conferência Brasileira de Encostas – COBRAE. 16 p. 2009.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LIMA, M. C. & MORTARI, D. *Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas*. 7º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia - GO. 2001.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA, F. C.; BARRETO, P. N. M.; PÉREZ, A. C.; GUIMARÃES, R. C.; OLIVEIRA, R. B. *Aspectos químico-mineralógicos e as propriedades e comportamento dos solos expansivos*. In: II GeoBASE 2019 – II Seminário Geotécnico Bahia/Sergipe. 1- 10 p. 2019.

CAMAPUM DE CARVALHO, J; GITIRANA, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). São Paulo. 805 p. 2015.

CÂNDIDO, B. M. *Erosão hídrica e qualidade do solo em sistemas florestais no leste do Mato Grosso do Sul*. Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Lavras – MG, 94 p. 2014.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. *Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*. Water Resources Research v. 24, n. 5, p. 755-769. 1988.

CARVALHO FILHO, A. *Solos e ambientes do quadrilátero ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros*. Universidade federal de Lavras, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Lavras – MG, Tese de Doutorado, 258 p. 2008.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. *Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais*. Pesq. Agropec. Brasileira, Brasília, v. 45, n. 8, 903 -916 p. 2010.

CASSOL, E. A.; SILVA, T. S.; ELTZ, F. L. F.; LEVIEN, R. *Soil erodibility under natural rainfall condition as the K fator of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical ultisol*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 42:e0170262. 2018.

CASTILHO, C.; GÓMEZ, J. A. *A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches*. Earth-Science Reviews, v. 160, 300 -319 p. 2016.

CHEN, T.; SEDIGHI, M.; JIVKOV, A. SEETHARAM, S. C. *Unsaturated hydraulic conductivity of compacte bentonite: revisito of microstructure effects*. L. ZHAN et al. (Eds): ICEG 2018, ESSE, 544-550 p. 2019.

CHEN, X.; ZHAO, Y.; MI, H.; MO, B. *Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiemnts by volume replacment method*. *Catena*, v. 136, 135 - 140 p. 2016.

CHOO, H.; PARK, K.; WON, J.; BURNS S. E. *Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion*. *Soil and Tillage Research* v. 184, 1 -10 p. 2018.

CHORLEY, R. J. *The geomorphic significance of somo Oxford soils*. *Am. J. Sci.*, v. 257, 503 -515 p. 1959.

COSTA, A. T. *Registro histórico de contaminação por metais pesados associado à exploração aurífera na bacia do ribeirão do Carmo: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais*. Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e recursos Naturais, Ouro Preto -MG, Tese de Doutorado, 257 p. 2007.

COSTA, T. A. Q. *Caracterização geológico-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas minas da Vale*. Universidade federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 212 p. 2009.

COUTO, B. O. C. *Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos*. Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia/NUGEO, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 110 p. 2015.

COUTO, B. O. C.; GOMES, R. C. *Application of MCT methodology to determine soil erodibility in road cutting slopes in Qudrilátero Ferrífero Region*. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 43 (1), 191-198 p. 2020.

CRUZ, S. I. C. *Caracterização e utilização de solos dispersivos nos aterros compactados da barragem de sobradinho*. Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestardo. 229 p. 2008.

DENARDIN, J. E. *Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo, Tese de Doutorado, 119 p. 1990.

DENG, Y.; CAI, C.; XIA, D.; DING, S.; CHEN, J.; WANG, T. *Soil Atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of Southern China*. *Solid Earth*, 2017 (8): 499-513. 2017.

- DI STEAFANO, C.; FERRO, V.; PALMERI, V.; PAMPALONE, V. *Measuring rill erosion using structure from motion: A plot experimente*. Catena, v. 156, 383 - 392 p. 2017.
- DOLINAR, B. *Predicting the normalized, undrained shear strength of saturated fine-grained soils using plasticity-value corrections*. Applied Clay Science 47 (3-4): 428-432. 2010.
- DORR, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. 641-A, 110 p. 1969.
- DORR, J. V. N.; BARBOSA, A. L. M. *Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil*. U. S. Geol. Survey Prof. Pap. 341 ©, 110 p. 1963.
- DURNER, W. *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resour. Res., 30(2): 211-223. 1994.
- EKWUE E J. *Organic matter effects on soil shear strength properties*. Soil Tillage Res.16: 289–297. 1990.
- EL-SWAIFY, S. A., DANGLER, E. W. *Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hidrological parameters*. National Conference on Soil Erosion, West Lafayette. Proceedings. Ankeny, 105 -110 p. 1977.
- ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. *Perdas de solo e água em entressulcos em um argissolo vermelho-amarelo submetido a quatro padrões de chuva*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, 485-493 p. 2001.
- FÁCIO, J. A. *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília – DF, Dissertação de Mestrado. 122 p. 1991.
- FAO – Food and Agriculture Organization. *Status of the world's sil resources – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, 244 p. 2015.
- FARIAS, W. M. *Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação no comportamento hidromecânico de solos do Planalto Central*. Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília – DF. Tese de Doutorado. 284 p. 2012.
- FARINA F.; ALBERT, C; MARTÍNEZ DOPICO, C.; AGUILAR GIL, C.; MOREIRA, H.; HIPPERT, J. P.; CUTTS, K. ALKMIM, F. F.; LANA, C. *The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero ferrífero (Brasil): Current models and open questions*. Journal ou South American Earth Sciences, v. 68, 4 – 21 p. 2016.

- FERNANDES, J. A. *Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS*. Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria – RS, Dissertação de Mestrado. 129 p. 2011.
- FERNANDES, L. P. *Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria – RS*. Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria – RS, Dissertação de Mestrado. 150 p. 2015
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. *Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, 515-524 p. 1999.
- FORTES, R. M.; NOGAMI, J. S. *Método expedito de identificação do grupo MCT de solos tropicais utilizando-se anéis de PVC rígido*. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, São Paulo - SP, v. 591-604 p. 1991.
- FOSTER, G. R.; McCOOL, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. *Conversion of the soil loss equation to SI metric units*. Journal of Soil Water and Conservation, v. 36, n. 6, 355-359 p. 1981.
- FRAGASSI, P. F. M. *Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)*. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Viçosa – MG, Tese de Doutorado. 136 p. 2001.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. *Stress state variables for unsaturated soils*. Journal of Geot. Div. ASCE., Vol. 103 GT5, p. 447-466. 1977.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons Editor. Hoboken, New Jersey. 2012.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. *Equations for the soil-water characteristic curve*. Can. Geotech. J., 31: 521-532. 1994
- FU, Y.; GUNG-LU, L.; TENG-HUI, Z.; BAI-QIAO, L.; TENG, Z. *Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action*. Catena 150: 154-160. 2017.
- GODOY, H. *Identificação e classificação geotécnica de latossolos do estado de São Paulo pelo método expedito das pastilhas*. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo – SP, Tese de Doutorado, 132 p. 1997.
- GODOY, H.; BERNUCCI, L. L. B. *Desenvolvimento de procedimento visual-táctil para o reconhecimento geotécnico de campo dos solos das bacias hidrográficas do Aguapeí e Peixe no estado de São Paulo*. Relatório Final de Pós-doutorado apresentado a Fapesp e Relatório final de auxílio a pesquisa. São Paulo - SP, 97 p. 2000.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. L. B. *O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: um recurso didático*. Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Natal – RN, 145-156 p. 2002.

GOLDICH, G. G. *A study in rock weathering*. J. Geol., v. 46, 17-58 p. 1938.

GROHMANN, F. *Análise de agregados de solos*. Bragantia, v. 19, n. 13, 201-213 p. 1960.

HAO, H. WANG, J. GUO, Z.; HUA, L. *Water erosion process and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow*. Catena, v. 173, 494 -504 p. 2019.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. Editora Beca, São Paulo – SP. 228 -235 p. 2012.

HAVAEE, S.; MOSADDEGHI M.R.; AYOUBI, S. *In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of Central Iran*. Geoderma 237:137–148. 2015.

HEIDEMANN, M. *Estudo dos solos de uma encosta instável em São José – SC: Intemperismo e Comportamento Geotécnico*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre – RS, Tese de Doutorado, 299 p. 2015

HEMMAT, A.; AGHILINATEGH, N.; SADEGHI, M. *Shear strength of repacked remolded samples of a calcareous soil as affected by long-term incorporation of three organic manures in central Iran*. Biosyst Eng: 107, 251–261. 2010.

HOLZ, D. J.; WILLIARD, K. W. J.; EDWARDS, P. J.; SCHOONOVER, J. E. *Soil erosion in humid regions: a review*. Universities Council on Water Resources. Journal of Contemporary Water Research & Education 154: 48-59 p. 2015.

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

IORI, P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, R. B. *Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em área de preservação permanente*. Bioscience Journal, Uberlândia - MG v. 28, 185 -195 p. 2012.

IWASA, O. Y.; PRANDINI, F. L. *Prevenção e correção de fenômenos erosivos: as boçorocas, exemplo da necessidade de diagnose*. Geologia Ciência-Técnica, CEPEGE, Universidade de São Paulo, v. 7, 23-53 p. 1982

JACKSON, M. L. *Weathering of primary and secondary minerals in soils*. International Congresso f Soil Science, Adelaide. Transactions Adelaide, v. 4, 281 -192 p. 1968.

JONES, D. *Development of performance-based test for nontraditional road additives*. Journal of the Transportation Research Board, n. 1989, v. 2, 142 – 153 p. 2007.

JONES, D.; VENTURA, D.; VAN WAMELEN, J. *Fit-for-purpose certification of non traditional road additives*. 24^o Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, 154 – 168 p. 2005.

JONG VAN LIER, Q. *Física do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Viçosa - MG, 298 p. 2010.

JONG VAN LIER, Q.; ALBUQUERQUE, J. A. *Novo método para calcular o diâmetro médio de agregados de solo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa -MG v. 21, 699-705 p. 1997.

KARIM, MD Z. *Characterizing soil erosion potential using electrical resistivity imaging*. Bangladesh University of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Master of Science Thesis. 107 p. 2016.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; KIRKSEN, C. *Elements of soil physics*. Amsterdam, Elsevier. 228p. 1983.

LAFAYETTE, K. P. V. *Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE*. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil. Recife – PE. Tese de Doutorado. 391 p. 2006.

LAL, R. (org.). *Soil erosion research methods*. 2^a edição, 340 p. 1994.

LE BISSONNAIS, Y. *Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility: 1. Theory and methodology*. European Journal of Soil Science v. 47: 425-437 p. 1996.

LE BISSONNAIS, Y.; PRIETO, I.; ROUMNET, C.; NESPOULOUS, J.; METAYER, J.; HUON, S.; VILLATORO, M.; STOKES, A. *Soil aggregate stability in mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics*. International Journal on Plant- Soil Relationships. 1 – 14 p. 2017.

LEMOS, C. F. *Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen*. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Curitiba – PR, Dissertação de Mestrado. 97 p. 2002.

LEPSCH, I. F. *19 Lições de Pedologia*. São Paulo. Oficina de Textos. 455 p. 2011.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; SOUZA, A.; COSTA, N. R.; MONTANARI, R. *Influencia de atributos químicos na erodibilidade e tolerância de perda de solo na bacia hidrográfica do baixo São José dos Dourados*. Revista Geociências, UNESP, São Paulo, v. 35, n. 1, 63-76 p. 2016.

LIMA, J. M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. *Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 14: 85-90 p. 1990.

LIMA, M. C. *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília – DF, Tese de Doutorado. 364 p. 2003.

LIMA, P. M. P.; ANDRADE, H. *Erodibilidade entressulcos e atributos do solo com B textural e B latossólico do sul de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, 463-474 p. 2001.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; CAROLINO de SÁ, M. A. Adequação de métodos indiretos para a estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, 447 – 456 p. 1997a.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, D. F. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, 457 – 465 p. 1997b.

MARQUES, T. M. D. *Uso de gramíneas em consórcio com leguminosas para recuperação de voçorocas*. Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Ecologia de Biomas Tropicais, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 83 p. 2011.

MARTIN, S. G.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FONSECA, S. *Erodibilidade do solo nos tabuleiros costeiros*. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 41, n.3, 322-327 p. 2011.

MARTINS, A. P. S. *Estudo da influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico de dois solos tropicais do município de ouro Preto – MG*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Rio de Janeiro- RJ, Dissertação de Mestrado, 336 p. 2005.

MATHEUS, I. C. *Proposta de metodologia para dimensionamento da espessura de núcleos argilosos em barragens baseada em ensaios pinhole*. Universidade de Brasília, Departamento de engenharia Civil e Ambiental, Brasília – DF, Dissertação de Mestrado. 183 p. 2006.

MEIRELLES, J. M. F. *Erosão de taludes de estradas*. Jornadas Luso-brasileiras de Engenharia Civil, 2., Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP. Anais... Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP, 204 – 211 p. 1967.

MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. *Química e mineralogia do solo – Parte 1: Conceitos Básicos*. 1ª edição – 2ª reimpressão. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 333 – 480 p. 2016 a.

MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. *Química e mineralogia do solo – Parte 2: Aplicações*. 1ª edição – 2ª reimpressão. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 381 – 447 p. 2016 b.

- MENEZES, M. B. M. *Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudo de erodibilidade*. Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP. Dissertação de Mestrado. 139 p. 2010.
- MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. *Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudo de erodibilidade*. *Geociências*, v. 29, n. 2, 211-228 p. 2010.
- MESSIAS, M. C. T. B.; LEITE, M. G. P.; MEIRA-NETO, J. A. A.; KOZOVITS, A. R. *Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. *Acta Botânica Brasílica*, n. 26, v.1, 230 – 242 p. 2012.
- MIDDLETON, H. E. *Properties of soils which influence soil erosion*. U. S. Dept. Agr., Tech. Bull., v, 178, 16 p. 1930.
- MORGAN, R. P. C. *Soil erosion and conservation*. Blackwell Publishing. 3^o Edition. 316 p. 2005.
- MOTA, N. O. *Caracterização geotécnica e dos processos erosivos na cidade de Campo Grande – MS*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília – DF, Dissertação de Mestrado. 203 p. 2001.
- MOURA, E; SANT'ANA, W. C.; BERNUCCI, L. B. *M-MCV simplificado – Cálculo do coeficiente c' – uma abordagem didática*. 37^a Reunião Anual de Pavimentação, Goiânia – GO. 2006.
- NADAL-ROMERO, E.; VERACHTERT, E.; MAES R.; POESEN, J.; *Quantitative assessment of the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test*. *Geomorphology*, v. 135, 66 – 79 p. 2011.
- NASCIEMNTO, U.; CASTRO, E. *Defesa de taludes contra a erosão. Critérios de seleção de solos*. *Geotecnia Lisboa*, v. 20, 17 – 33 p. 1976.
- NOGAMI, J. S. COZZOLINO, V. M. N. *A identificação de solos tropicais: dificuldades e proposta de um método preliminar*. *Anais da 20^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Fortaleza – CE*, 117-134 p. 1985.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações. ABMS. Foz do Iguaçu - PR, 1293-1300 p. 1994.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Cap. 7: Erosão na faixa marginal*. Editora Villibor, São Paulo – SP, 169 – 196 p. 1995.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 19, 196 – 199 p. 1979.

NUNES, F. S. *Contribuição à estratigrafia e geocronologia U-Pb de zircões detríticos da Formação Moeda (Grupo Caraça, Supergrupo Minas) na Serra do Caraça, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Universidade federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e recursos Naturais, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 136 p. 2016.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. *Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, 2839-2845 p. 2008.

OSTOVARI, Y.; GHORBANI-DASHTAKI, S.; KUMAR, L.; SHABANI, F. *Soil erodibility and its prediction in semi-arid regions*. Achieves of Agronomy and Soil Science 65 (12): 1688-1703 P. 2019.

PAES, B. S. T. *Avaliação Geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos residuais quanto ao potencial de erodibilidade*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da universidade Federal de Viçosa. Viçosa –MG. Dissertação de Mestrado. 131 p. 2017.

PAGANIN NETO, M. *Estudo da influência do nível d'água nas análises de estabilidade dos taludes da cava da Mina do Andrade*. Universidade federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 248 p. 2016.

PARSONS, A. W. *The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material*. L. R. 750. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory. 1976.

PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. *Recursos minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolviemnto de Minas Gerais (CODEMGE). 2018. Disponível em: <http://www.codemge.com.br>. Acesso em: 18 de junho de 2019.

PEJON, O. J. *Mapeamento geotécnico regional da falha de Piracicaba: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. Universidade de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, São Carlos – SP, Tese de Doutorado, 241 p. 1992

PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 15 ed. Piracicaba: ESALQ, 451 p. 2009.

PITALDI, E.; D'AMICO, M.; STANCHI, S.; CATONI, M.; FREPPAZ, M.; BONIFACIO, E. *Humus forms affect soil susceptibility to water erosion in Western Italian Alps*. Applied Soil Ecology 123: 478-483 P. 2018.

PRUSKI, F. F. *Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. Editora UFV, Viçosa, 279 p. 2009.

PUDASAINI, M.; SHRESTHA, S.; RILEY, S. *Application of Water Erosion Prediction Project (WEPP) to estimate soil erosion from single storm rainfall events from*

construction sites. 3rd Australian New Zealand Soils Conference, University of Sydney, Australia. 1 – 7 p. 2004.

RANGE, H.; HORAK, E. *Erosion of compacted wearing course grades relating material grading, plasticity and compaction to erosion potential*. 24^o Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, 169 – 179 p. 2005.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processo e aplicações*. 2^a edição, Barueri – SP: Manole. 500 p. 2012.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A. McCOOL, D. K.; YODER, D. C.. *Predicting soil erosion by water: guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington: US Gov. Print Office 404 p. Agricultural Handbook 703.1997

RESENDE, M.; SANTANA, D. P. *Uso das relações k_i e k_r na estimativa da mineralogia para classificação de latossolos*. Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação da aptidão agrícola, 3., Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, Embrapa- SNLCS/SBCS, 225 – 232 p. 1988.

RIBEIRO, D. T. *Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem*. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 123 p. 2003.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. *Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG)*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, 297 – 303. 2002.

ROLOFF, G. ; DENARDIN, J. E. *Estimativa simplificada da erodibilidade do solo*. Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 10., Florianópolis – SC, Resumos. 150 – 151 p. 1994.

ROSSI, D. Q. *Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Universidade federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e recursos Naturais, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 129 p. 2014.

RYZAK, M., BIEGANOWSKI, A. POLAKOWSKI, C. *Effect of soil moisture content on the splash phenomenon reproducibility*. PLoS One 1, 1- 15 p. 2015.

SANTOS, E. F. *Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP, Dissertação de Mestrado, 145 p. 2006.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; NÓBREGA, J. C. A.; NETO, C. A. L. *Distribuição de poros e sua relação com atributos físico-hídricos em solos de cerrado e cerrado/caatinga*. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis –SC. 1- 4p. 2013.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5ª edição. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos Brasília – DF. 590 p. 2018.

SANTOS, P. S. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2ª Edição, Vol. 1. Editora Edgard Blüncher Ltda, São Paulo, Brasil. 92 – 124 p. 1989.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição de coleta de solo no campo*. 5ª edição. Viçosa – MG, SBCS/EMBRAPA/CNPS, 100 p. 2005.

SANTOS, R. M. M. *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões do município de Goiânia*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília – DF, Dissertação de Mestrado. 120 p. 1997.

SEKI, K. *SWRC Fit – A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4: 407-437.

SHAHABINEJAD, N.; MAHMOODABADI, M.; JATALIAN, A.; CHAVOSHI, E. *In situ field measurement of wind erosion and threshold velocity in relation to soil properties in arid and semiarid environments*. Environmental Earth Sciences 78:501-522. 2019.

SHAN, H.; SHEN, J. KILGORE, R. KERENYI, K. *Scour in cohesive soils*. U. S. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration. 100 p. 2015.

SHEN, H.; ZHENG, F.; WEN, L.; LU, J.; JIANG, Y. *An experimental study of rill erosion and morphology*. Geomorphology, v. 231, 193 – 201 p. 2015.

SHERARD, J. L.; DUNNINGAN, L.; DECKER, R. S. STEELE, F. *Pinhole test for identifying dispersive soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 102, 69-85 p. 1976.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, 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. 1811-1820 p. 2009.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SANTOS, G. R.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MENEZES, M. D.; LEITE, F. P. *Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no vale do Rio Doce, região Centro-Leste do estado de Minas-Gerais*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, 1029-1039 p. 2010.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. *Proposição de modelos para a estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros*. Pes. Agropec. Bras. Brasília-DF, v. 12, 2287 – 2298 p. 1999.

SILVA, T. O.; NETO, S. L. S. D.; FERRAZ, R. L. PITANGA, H. N. PAES, B. S. T. *Suscetibilidade à erodibilidade de solos residuais com base em correlações de propriedades geotécnicas físico-mecânicas*. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. V. 42. 188-195 p. 2019.

SKEMPTON, A. W. *The colloidal activity of clays*. Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. I. 57-61p. 1953.

SOANE, B.D. *The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects*. Soil Tillage Res. 16, 179–201. 1990.

SOTO, M. A.; KIANG, C. H. *Permeabilidade relativa em zona vadosa com porosidade bimodal: um estudo em solos brasileiros*. Águas Subterrâneas, 27(2): 93-103 p. 2013.

SOUZA, D. V. M. *Estudo geoquímico-mineral das formações ferríferas bandadas do sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Universidade federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e recursos Naturais, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 109 p. 2016

STEPHAN, A. M. *Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen*. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Viçosa – MG, Tese de Doutorado. 192 p. 2010.

TAPAHUASCO, G. M. C. *Comportamento dos parâmetros de rugosidade em descontinuidades rochosas do sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto (MG)*. Universidade federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Ouro Preto – MG, Dissertação de Mestrado, 108 p. 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. *Manual de Métodos de Análise de Solo, 3ª Edição revisada e ampliada*. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Sol Brasília/DF. 577 p. 2017.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. *Decifrando a Terra – Capítulo 4: Intemperismo e formação de solos*. São Paulo: Oficina de Textos. 139 -166 p. 2000.

VAEZI, A. R.; ESLAMI, S. F.; KEESSTRA, S. *Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls*. Catena 167: 385-398. 2018.

VAEZI, A.R.; SADEGHI, S.H.R. *Evaluating the RUSLE model and developing an empirical equation for estimating soil erodibility factor in a semi-arid region*. Spanish Journal of Agricultural Research 9 (3): 912-923. 2011.

VAN GENUCHTEN. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898. 1980.

VARAJÃO, C. A. C. *A questão da evolução das superfícies de erosão do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais*. Revista Brasileira de Geociências. V. 21, n. 2. 138-145 p. 1991.

VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JUNIOR, H. A. *Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (¹⁰Be) e da Pedogênese*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, 1409-1425 p. 2009.

VERTAMATTI, E; ARAÚJO, F. A. R. *Critério para previsão do potencial erosivo de solos tropicais*. Reunião Anual de Pavimentação, 24., Belém – PA. Anais... Rio de Janeiro-RJ:ABPv, v. 1, 328 -348 p. 1990.

VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L. *Classificação de Solos Tropicais de Granulação Fina e Grossa*. Revista Pavimentação ABPv, v. 43, 17 – 37 p. 2017.

VINCI, A.; BRIGANTE, R.; TODISCO, F.; MANNOCCHI, F.; RADIOCIONI, F. *Measuring rill erosion by laser scanning*. Catena, v. 124, 97 – 108 p. 2015.

VOZNESENSKY, A. S.; ARTSRUUI, A. B. *A laboratory method for determining the anti-erosion resistance of soils*. Soil Fertilizers, v. 10, 289 (abstract). 1940.

WANG, B.; ZHENG, F.; ROMKENS, M. J. M.; DARBOUX, F. *Soil erodibility for water erosion: a perspective and chinese experiences*. Geomorphology, v. 187, 1- 10 p. 2013.

WILSON, G. V.; WELLS, R.; KUHNLE, R.; FOX, G.;NIEBER, J. *Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes*. Earth Surface Processes Landforms, v. 43, 45 -63 p. 2017.

WIRTZ, S.; SEEGER, M.; RIES, J. B. Filed experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. Catena v. 91. 21-34 p. 2012.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROS, B. V. *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. J. Soil and Water Conservation, Ankey, v. 26, 189 – 193 p. 1971.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. *Relation of soil properties to its erodibility*. Soil Science Society of Americ. Proceedings, Madison, v. 33, n. 1, 131-137 p. 1969.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Rainfall energy and its relationships to soil loss*. Trans. Am. Geophys. Union, Washington, v. 39, 285-191 p. 1958.

WU, B.; WANG, Z.; ZHANG, Q.; SHEN, N. LIU, J. *Response of soil detachment rate by raindrop affected sediment-laden sheet flow to sediment load and hydraulic parameters within a detachment-limited sheet erosion system on steep slopes on Loess Plateau, China*. Soil & Tillage Research v. 185. 9-16 p. 2019.

YE, L.; TAN, W.; FANG, L. JI, L.; DENG, H. *Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau China: I. spatial variability*. Soil & Tillage Research, v. 179: 71-81 p. 2018.

YODER, R. E. *A direct method of aggregate analysis of soils, and a study of the physical nature of erosion losses.* J. Am. Soc. Agron., v. 28, 227 -351 p. 1936.

ZACHAR, D. Soil erosion. Forest Research Institute, Zvolen Czechoslovakia. 548 p 1982.

ZHANG, H. Y.; LI, M.; WELLS, R. R.; LIU, Q. J. Effect of soil water content on soil detachment capacity for coarse- and fine-grained soils. Soil Science Society of American Journal 83: 697-706 p. 2019.

ZHANG, P.; YAO, W.; TANG, H.; WEI, G.; WANG L. *Laboratory investigations of rill dynamics on soils of the Loess Plateau of China.* Geomorphology, v. 293, 201 – 210 p. 2017.

APÊNDICE

APÊNDICE A

**QUADRO RESUMO COM AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE CADA
HORIZONTE AMOSTRADO**

Tabela A.1 – Resumo das principais características dos horizontes amostrados.

Talude	Classificação Pedológica	Identificação da Amostra	Horizonte Amostrado	Cor Sistema Munsell (seco)	Textura	Estrutura			Porosidade		Presença de raízes
						Tipo	Tamanho	Grau	Tamanho	Densidade	
1 - ITA	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico	ITAHS	Bw1	2,5YR 6/6	Argilo-siltosa	Blocos subangulares	Pequeno	Moderado	Pequena	Média	Comum
		ITAHI	C2	2,5YR 5/8	Franco argilosa	Blocos subangulares	Médio	Fraco	- ¹	-	-
2 - VAR	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico	VARHS	Bw	2,5YR 5/8	Franco argilosa	Blocos subangulares	Pequeno	Fraco	Pequena	Baixa	Poucas
		VARHI	C2	2,5YR 7/6	Argilo-siltosa	Blocos angulares	Médio	Fraco	Pequena	Baixa	-
3 - OBR	LATOSSOLO VERMELHO Acriférrico típico	OBRHS	Bw2	2,5YR 4/8	Franco arenosa	Blocos subangulares	Muito Grande	Moderado	Pequena	Baixa	Poucas
		OBRHI	C1	2,5YR 4/8	Argilo-arenosa	-	-	-	Muito Pequena	Baixa	-
4 - MRN	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico	MRNHS	A	7,5YR 5/8	Argilo-siltosa	Blocos angulares	Pequeno	Fraco	Pequena	Baixa	Poucas
		MRNHI	C1+ Saproilito	10YR 8/4	Argilo-siltosa	-	-	-	Pequena	Baixa	-
5 - ALG	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico	ALGHS	A	7,5YR 7/8	Franco arenosa	Blocos subangulares	Médio	Moderado	Pequena	Baixa	Comum
		ALGHI	C2+ Saproilito	2,5YR 7/8	Argilo-siltosa	Blocos angulares	Pequeno	Fraco	Médio	Médio	-

¹ ausência da propriedade pelos procedimentos utilizados na descrição pedológica.

Tabela A.1 – Resumo das principais características dos horizontes amostrados (continuação).

Talude	Classificação Pedológica	Identificação da Amostra	Horizonte Amostrado	Cor Sistema Munsell (seco)	Textura	Estrutura			Porosidade		Presença de raízes
						Tipo	Tamanho	Grau	Tamanho	Densidade	
6 - PTO	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico	PTOHS	Bw2	2,5YR 4/8	Argilo-arenosa	Blocos subangulares	Médio	Forte	Pequena	Baixa	Média
		PTOHI	C1	2,5YR 5/6	Argila	- ¹	-	-	Muito Pequena	Baixa	-
7 - ATP	LATOSSOLO VERMELHO Acriférico típico	ATPHS	Bw3	10R 3/6	Franco arenosa	Blocos angulares	Médio	Forte	Pequena	Baixa	-
		ATPHI	C1	5YR 4/6	Argilo-arenosa	Blocos angulares	Médio	Moderado	Muito Pequena	Baixa	-
8 - LVN	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico Típico	LVNHS	Bi	7,5YR 8/4	Franco arenosa	Blocos subangulares	Médio	Fraco	Pequena	Baixa	Comum
		LVNHI	C2	7,5YR 8/1	Franco arenosa	Maciça	Médio	Fraco	Pequena	Baixa	-
9 - AMF	LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	AMFHS	Bw2	2,5YR 4/8	Argila	Blocos subangulares	Grande	Fraco	Pequena	Baixa	Rara
		AMFHI	C	2,5Y 5/8	Argilo-arenosa	Blocos subangulares	Pequeno	Fraco	Pequena	Média	-
10 - CNG	LATOSSOLO VERMELHO distrófico cambissólico	CNGHS	Bw	2,5Y 3/6	Argilo-arenosa	Blocos subangulares	Médio	Fraco	Muito Pequena	Baixa	Poucas
		CNGHI	C + Saprolito	2,5Y 7/6	Argilo-arenosa	-	-	-	Muito Pequena	Baixa	-

¹ ausência da propriedade pelos procedimentos utilizados na descrição pedológica.

APÊNDICE B

IMAGENS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) PARA OS HORIZONTES ESTUDADOS

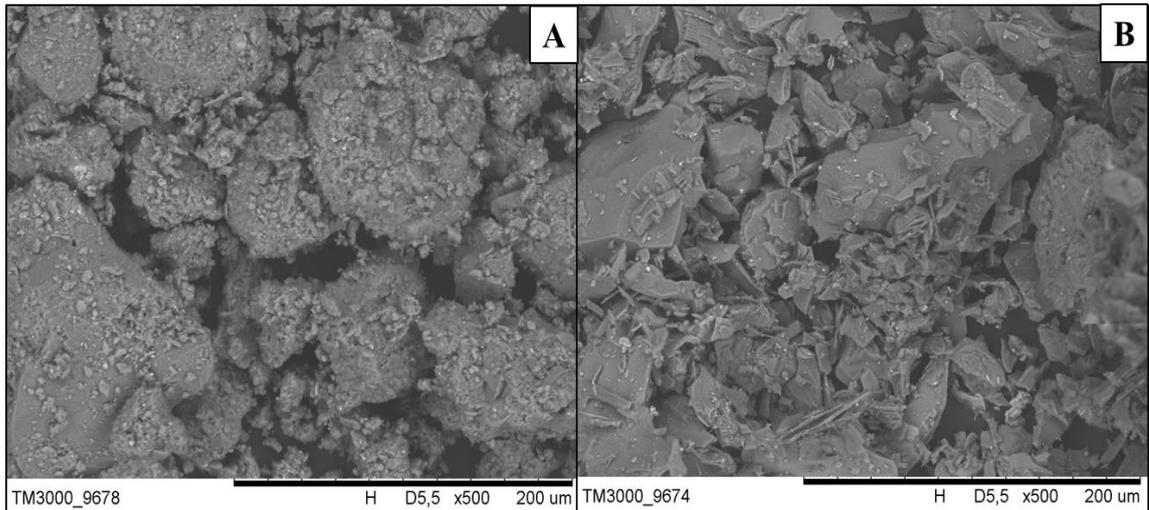


Figura B.1 – Ensaio de MEV para o solo ITA (500x). A) ITAHS e B) ITAHI.

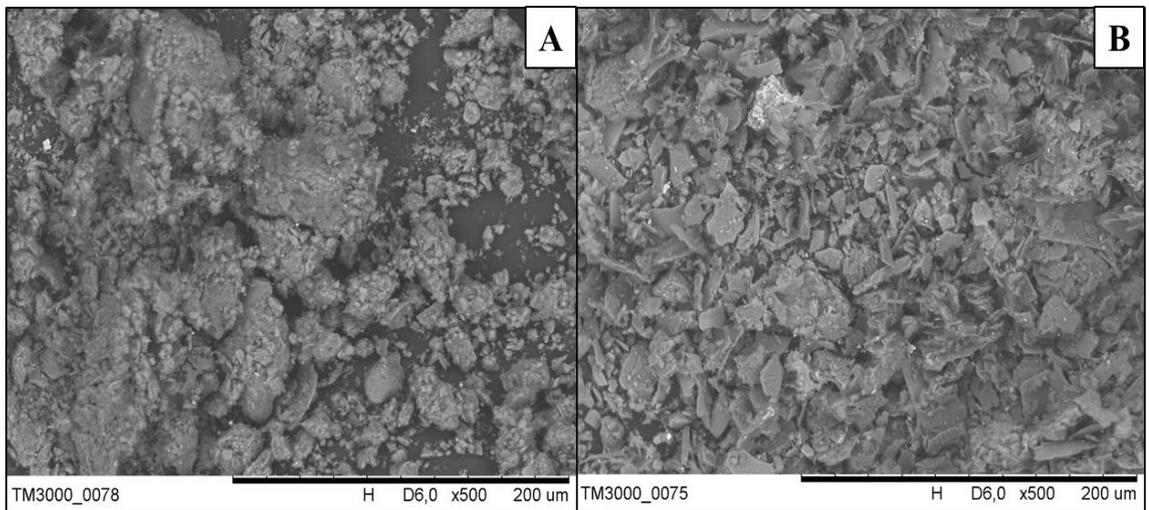


Figura B.2 – Ensaio de MEV para o solo VAR (500x). A) VARHS e B) VARHI.

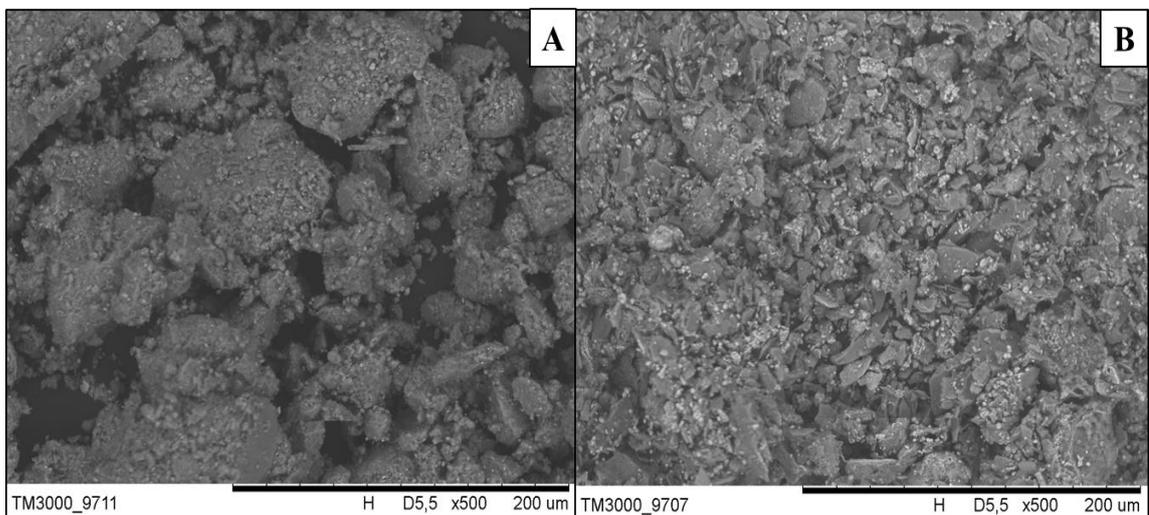


Figura B.3 – Ensaio de MEV para o solo OBR (500x). A) OBRHS e B) OBRHI.

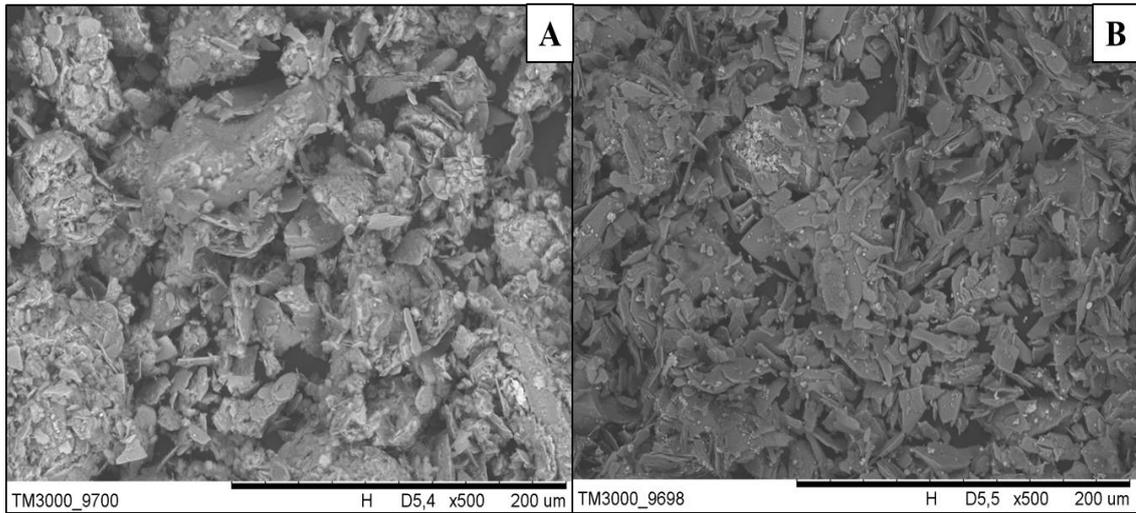


Figura B.4 – Ensaio de MEV para o solo MRN (500x). A) MRNHS e B) MRNHI.

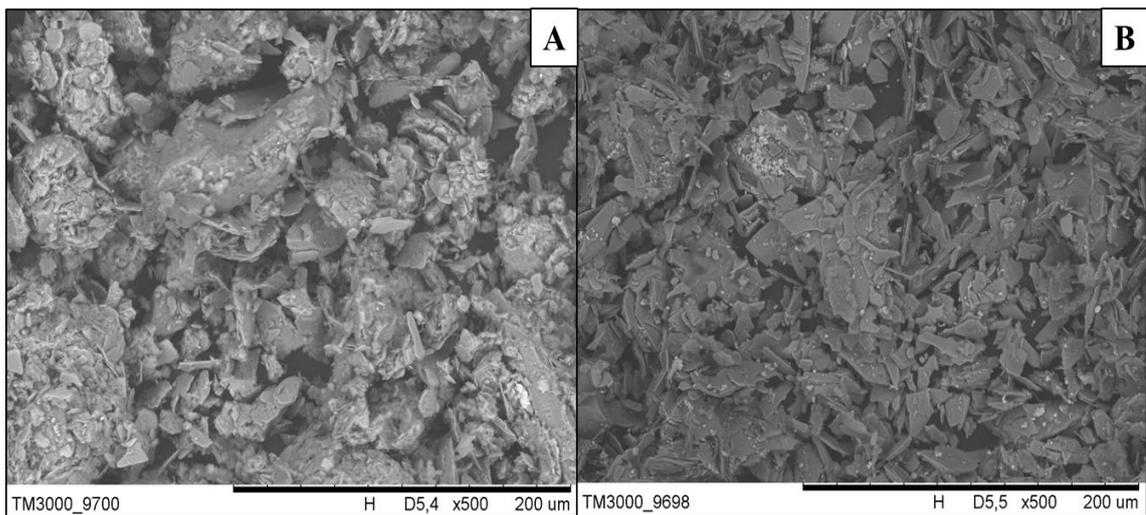


Figura B.5 – Ensaio de MEV para o solo ALG (1.000x). A) ALGHS e B) ALGHI.

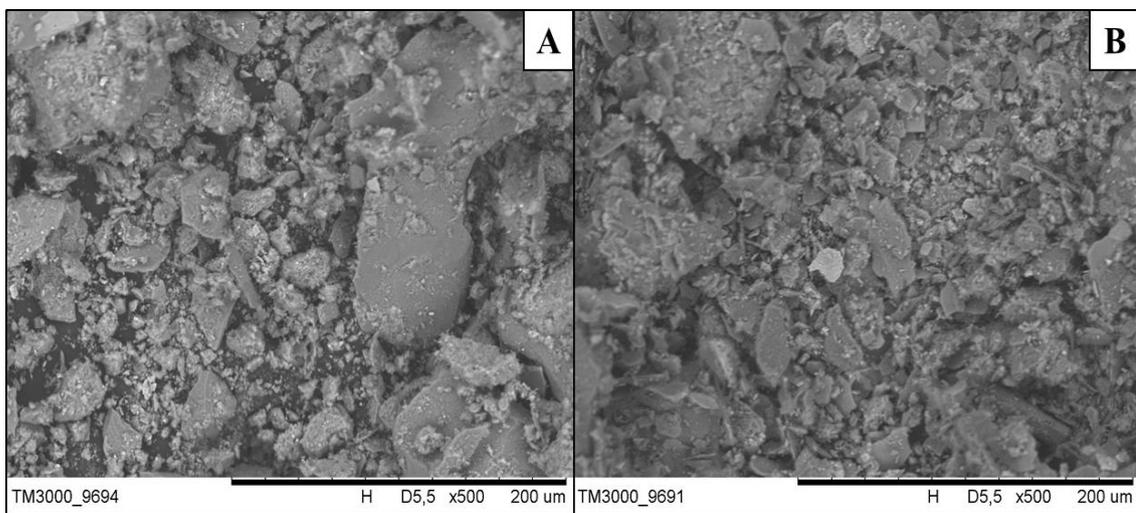


Figura B.6 – Ensaio de MEV para o solo PTO (500x). A) PTOHS e B) PTOHI.

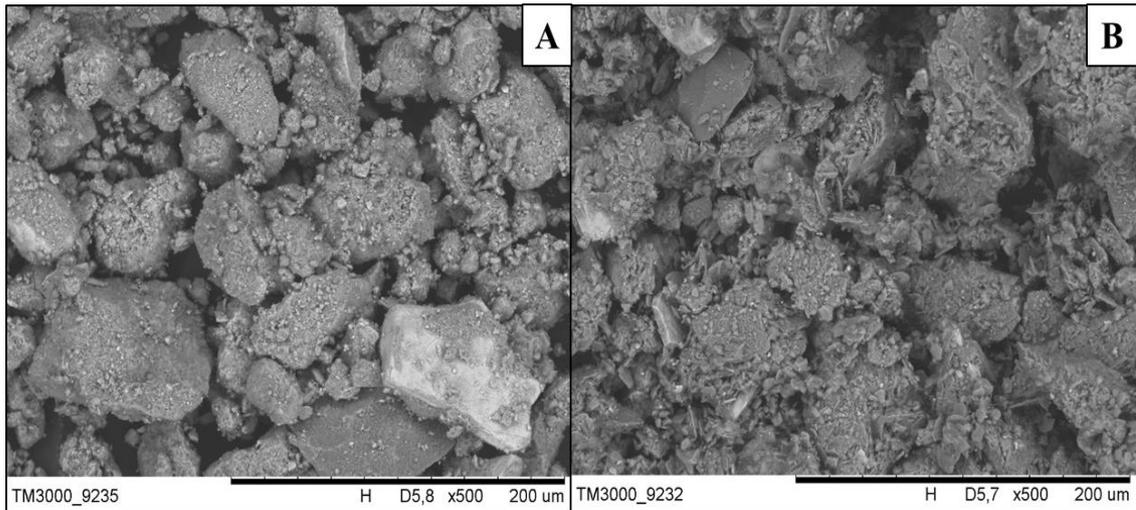


Figura B.7 – Ensaio de MEV para o solo ATP (500x). A) ATPHS e B) ATPHI.

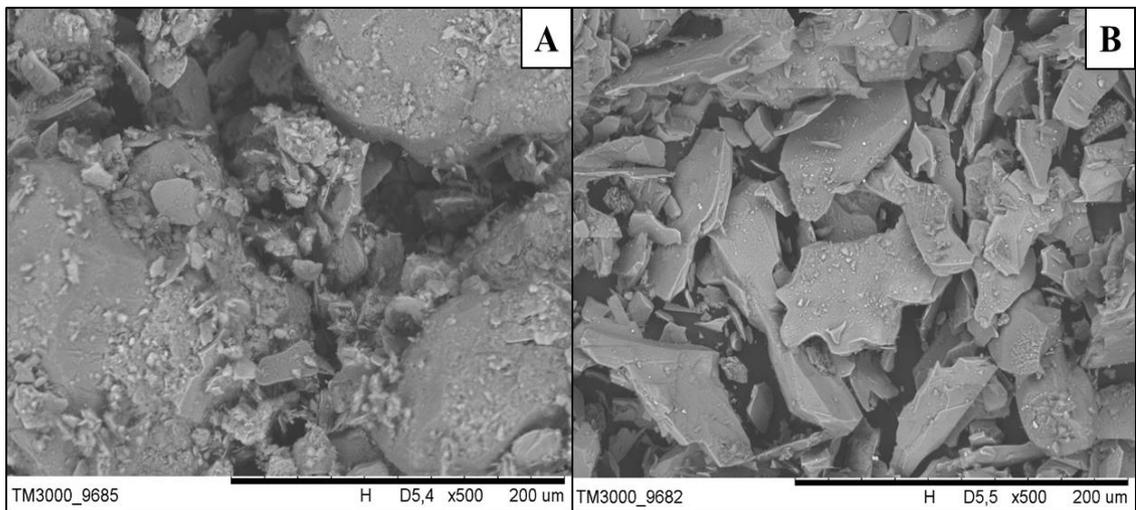


Figura B.8 – Ensaio de MEV para o solo LVN (500x). A) LVNHS e B) LVNHI.

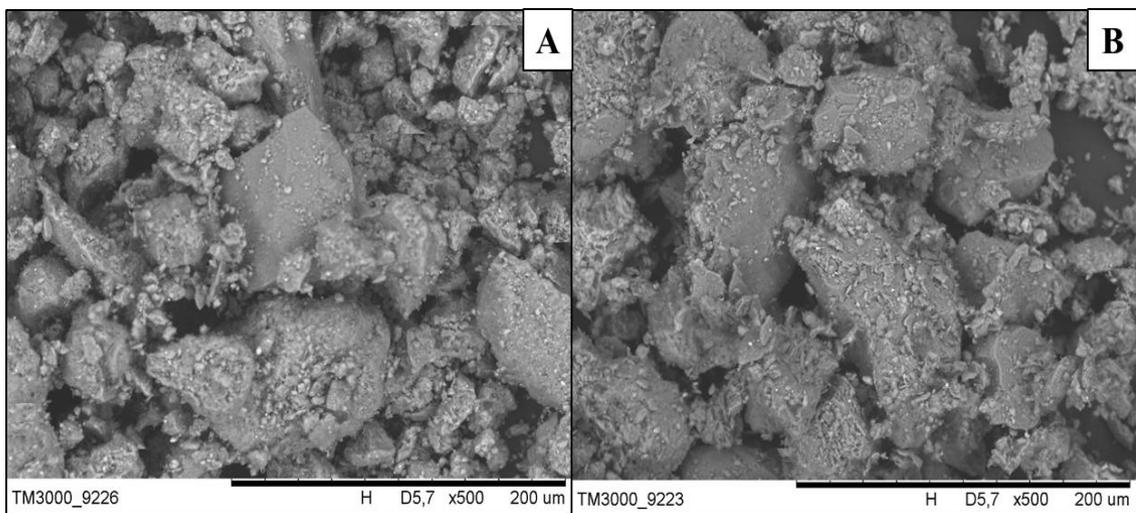


Figura B.9 – Ensaio de MEV para o solo AMF (500x). A) AMFHS e B) AMFHI.

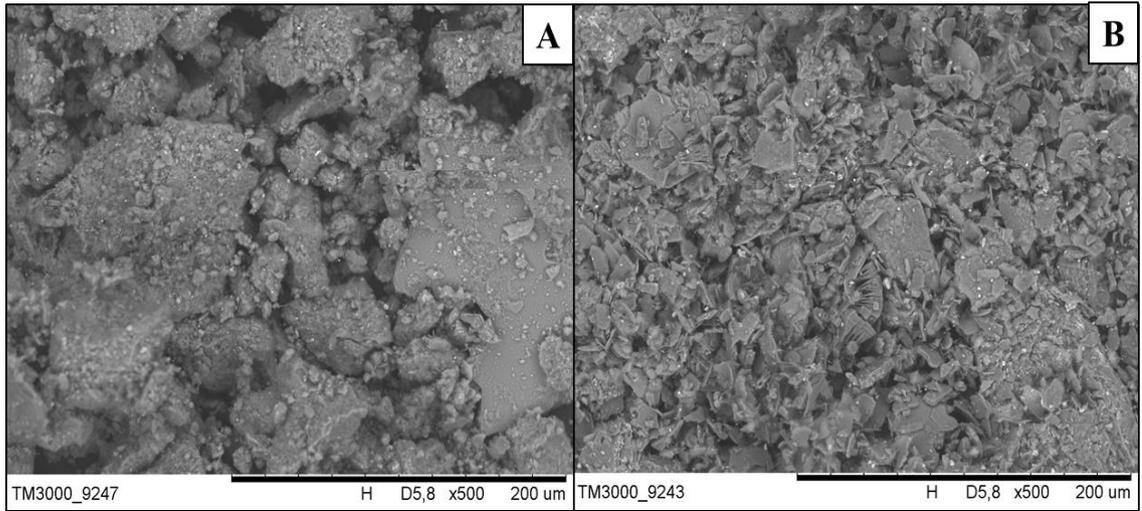


Figura B.10 – Ensaio de MEV para o solo CNG (500x). A) CNGHS e B) CNGHI.

APÊNDICE C

GRÁFICOS DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA RESISTÊNCIA “*IN SITU*” (S_i)

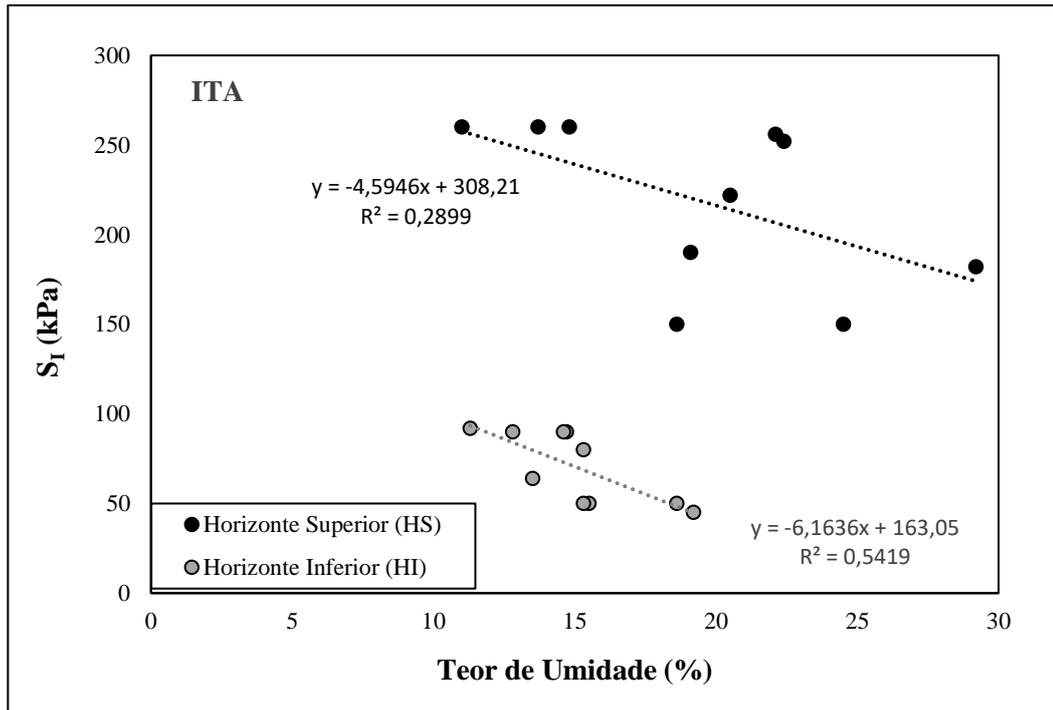


Figura C.1 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I)–Talude ITA.

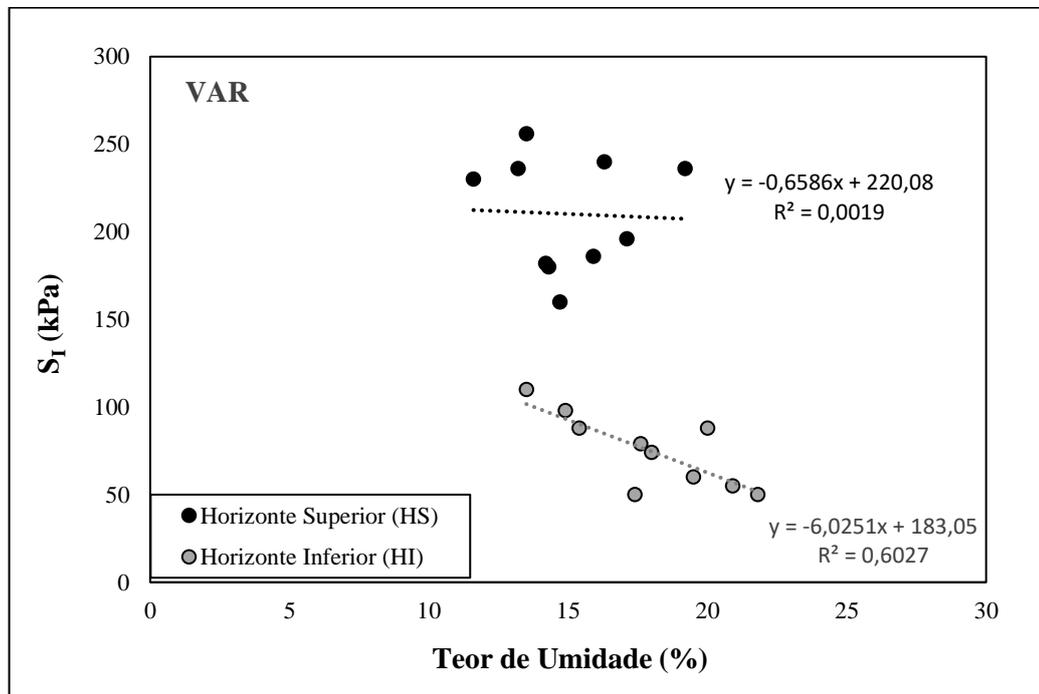


Figura C.2 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude VAR.

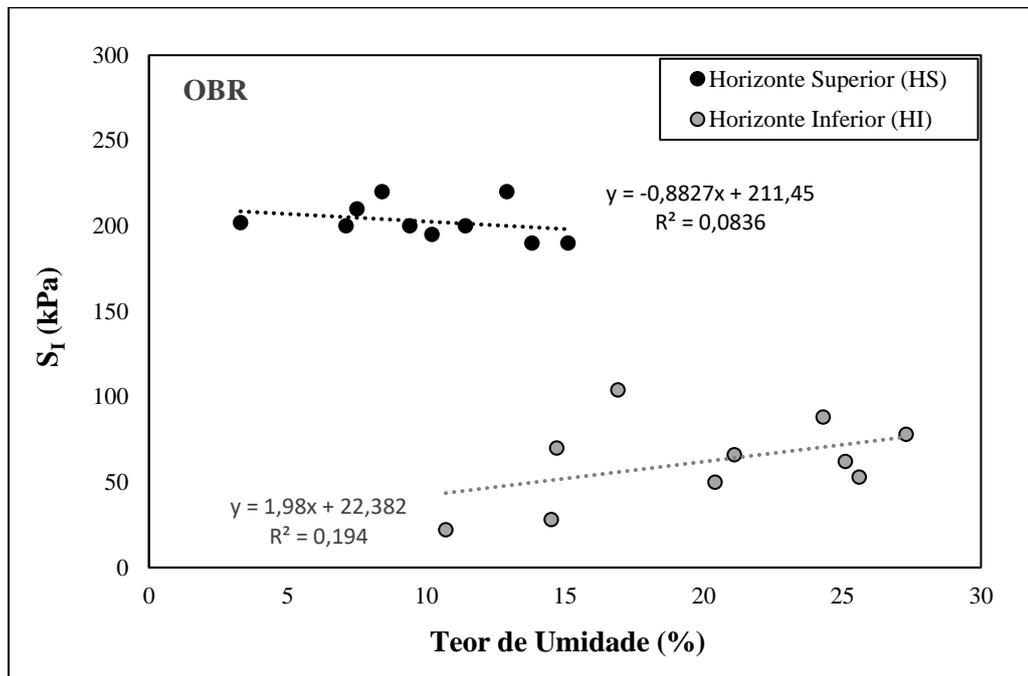


Figura C.3 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I)–Talude OBR.

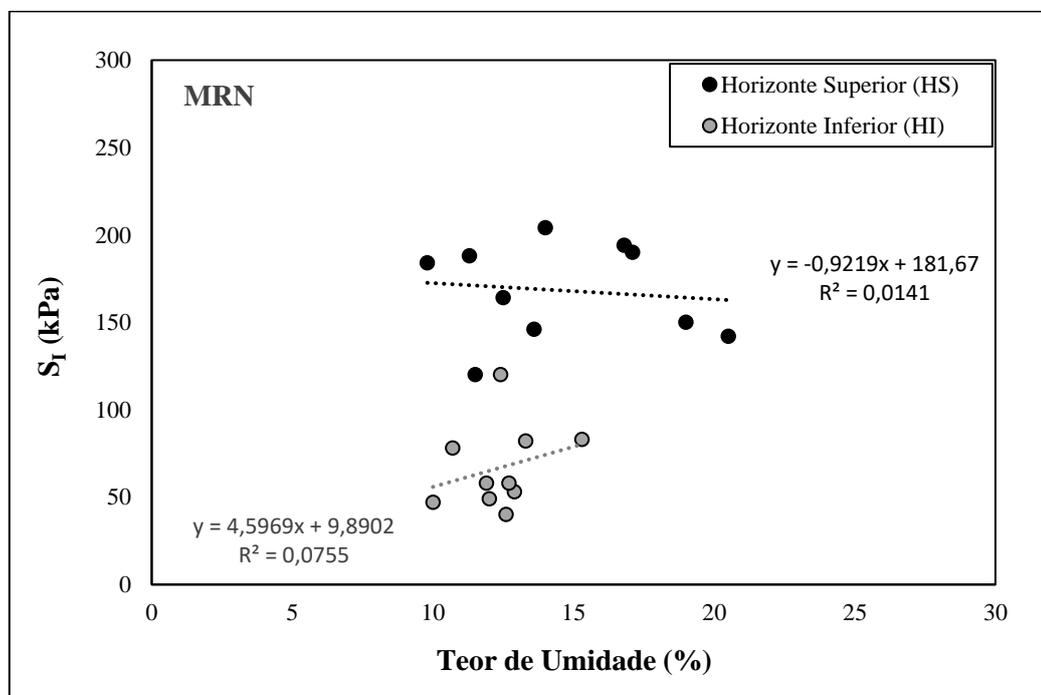


Figura C.4 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude MRN.

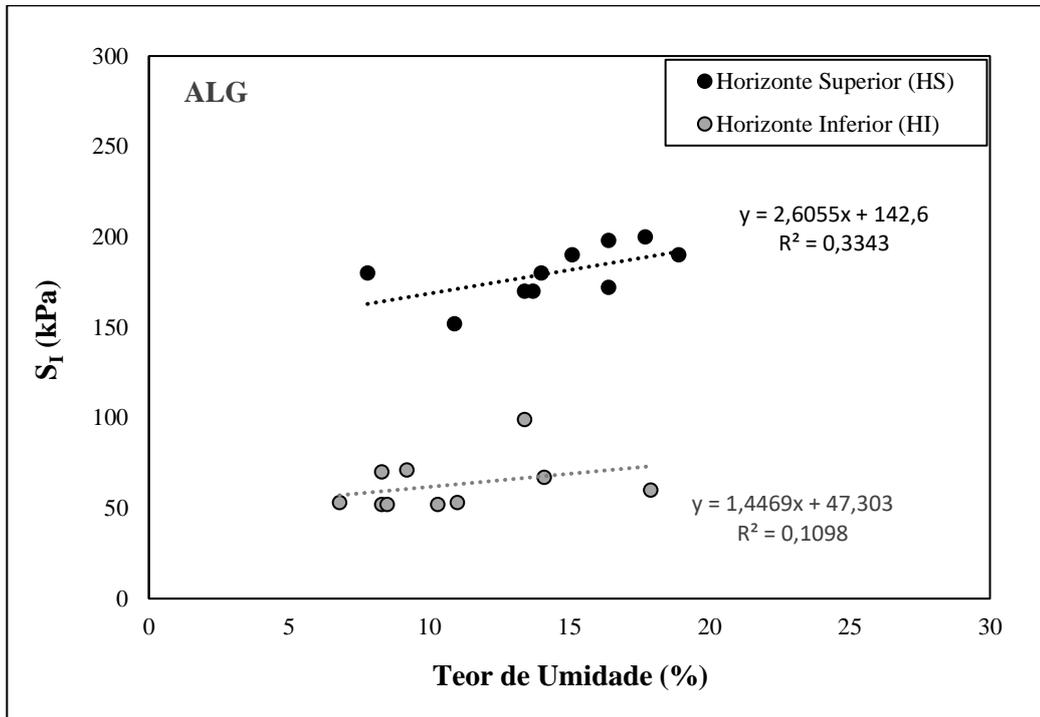


Figura C.5 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude ALG.

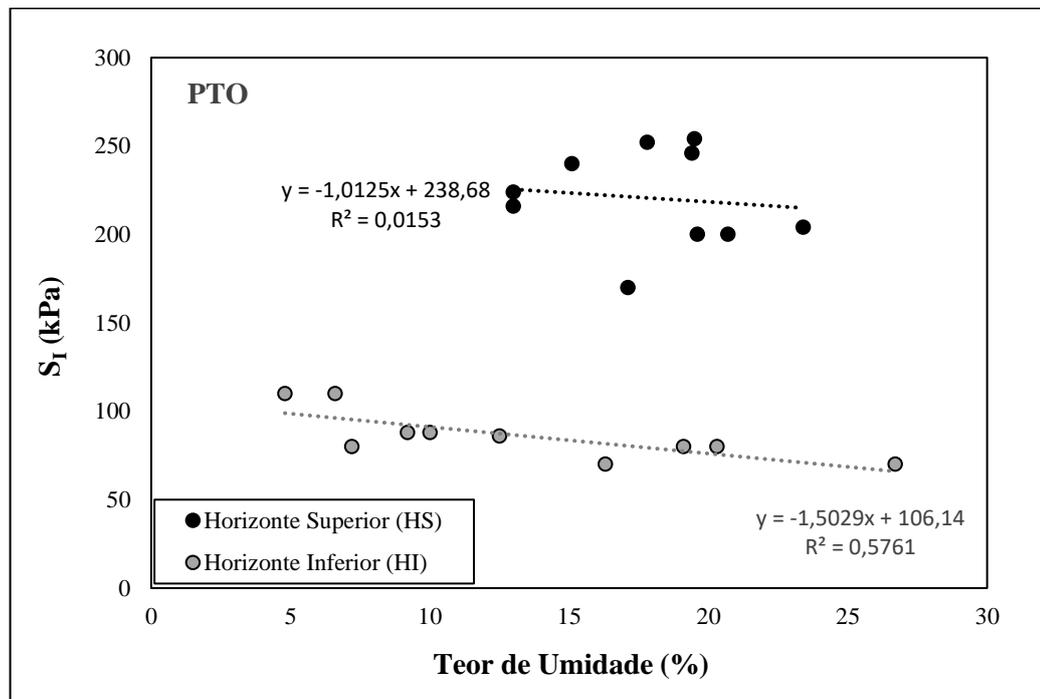
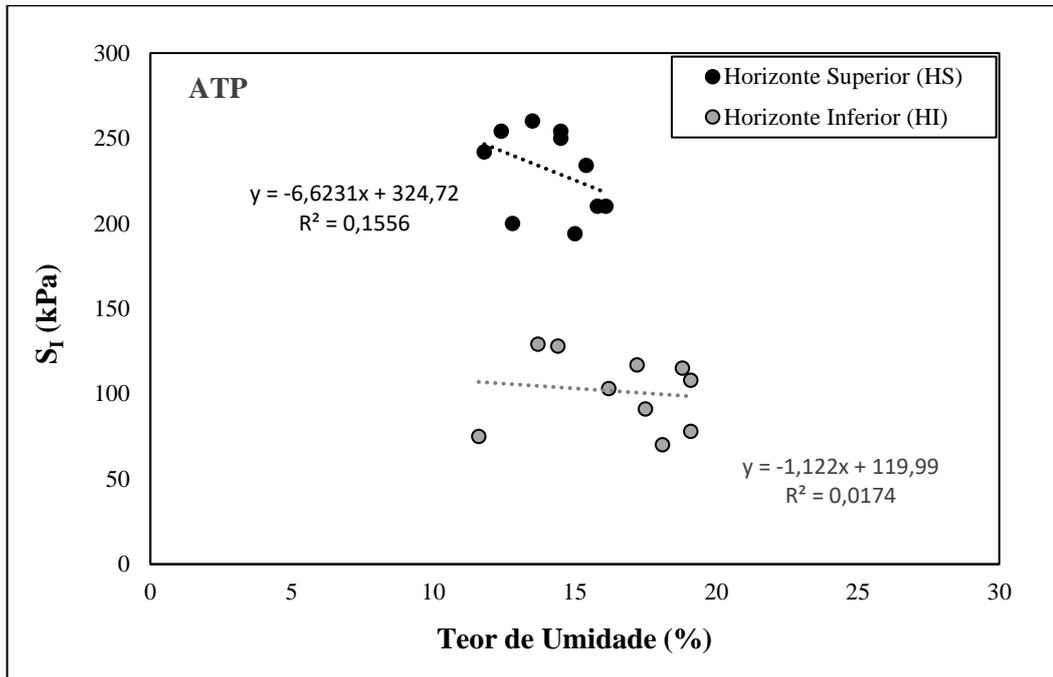


Figura C.6 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude PTO.



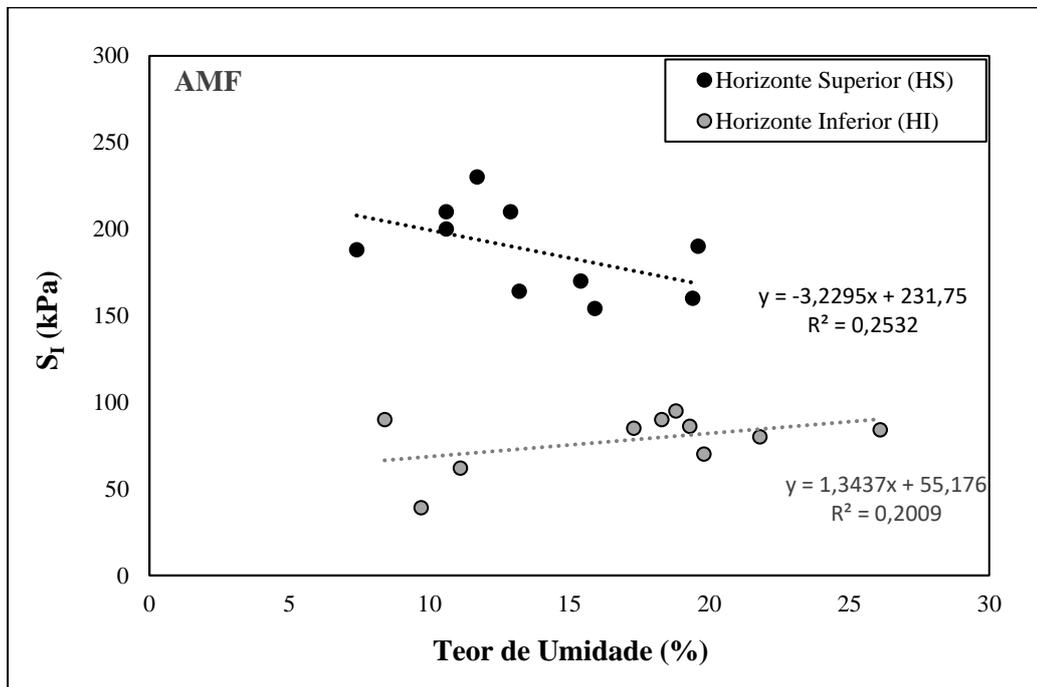


Figura C.9 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I) –Talude AMF.

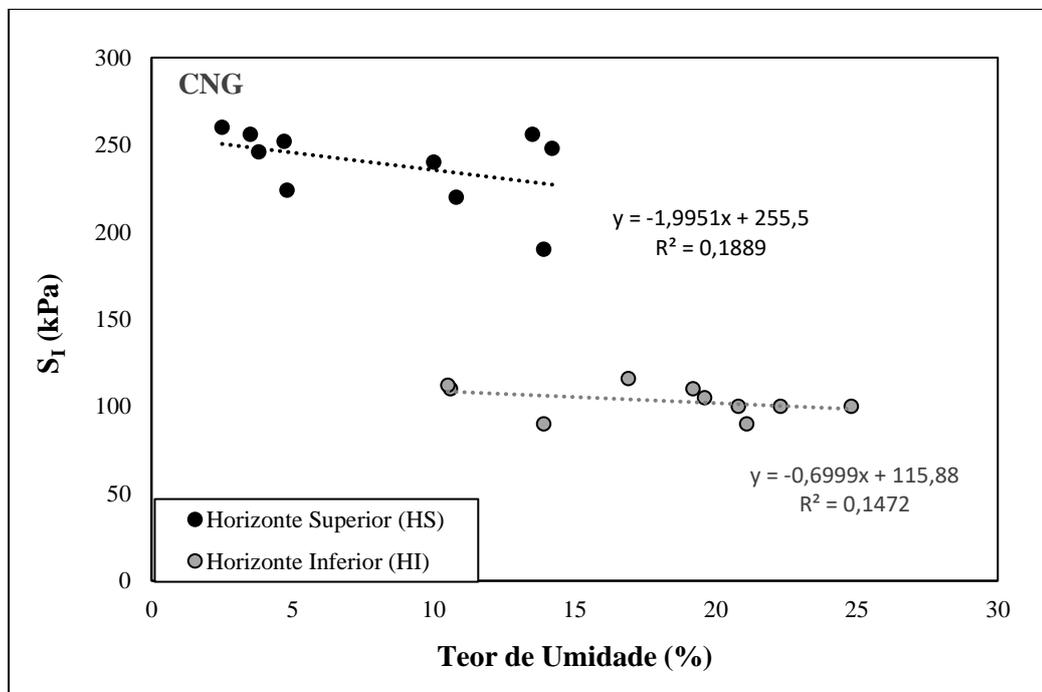


Figura C.10 – Influência da umidade na resistência “*in situ*” (S_I)–Talude CNG.