



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGENS E
GESTÃO AMBIENTAL

LUCAS MANOEL DA SILVA

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DO RESERVATÓRIO DA UHE
TUCURUÍ**

Tucuruí-PA
2019

LUCAS MANOEL DA SILVA

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DO RESERVATÓRIO DA UHE
TUCURUÍ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior.
Coorientadora: Dra. Fernanda Pereira Gouveia.

Tucuruí-PA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

M266e Manoel da Silva, Lucas
ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DO
RESERVATÓRIO DA UHE TUCURUÍ / Lucas Manoel da
Silva. — 2019.
194 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior
Coorientação: Prof^a. Dra. Fernanda Pereira Gouveia
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Núcleo de
Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade
Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

1. Erodibilidade. 2. UHE-Tucuruí. 3. Inberbitzen. 4.
Solos Tropicais. I. Título.

CDD 627.8

LUCAS MANOEL DA SILVA

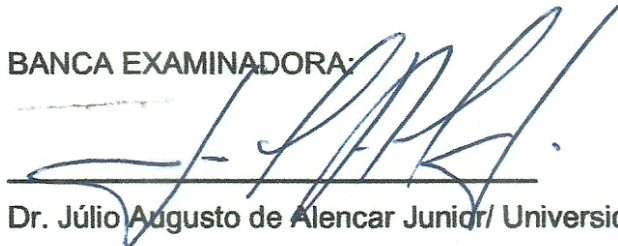
**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DO RESERVATÓRIO DA UHE
TUCURUI**

Exame de Defesa de Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior.
Coorientadora: Dra. Fernanda Pereira Gouveia.

Aprovada em 30 de Outubro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior / Universidade Federal do Pará – Orientador

Dr. Fernanda Pereira Gouveia / Universidade Federal do Pará - Coorientadora



Dr. Alan Cavalcanti da Cunha / Universidade Federal do Amapá – Avaliador

Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara / Universidade Federal do Pará – Avaliador

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Sr. Manoel Messias da Silva e a Sra. Jeselda Maria Schaedler da Silva, que com carinho, incentivo e auxílio árduo, me proporcionaram os meios de realização deste mestrado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por possibilitarem a realização do mestrado;

Ao Professor Dr. Júlio Alencar pela orientação da dissertação;

Ao grande professor Dr. Aarão Ferreira Lima Neto, ao MSc. Marcus Vinícios Pereira de Freitas e ao MSc. Rafael Silva do Nascimento que, mesmo não tendo relação direta com a pesquisa, me motivaram e apoiaram incansavelmente;

Ao professor Dr. Rômulo Angélica e ao Dr. Alan Albuquerque por sempre motivarem a realização deste trabalho e auxiliarem com seu grande conhecimento na grande área da mineralogia;

À professora Dra. Fernanda Gouveia, por sempre motivar a conclusão deste trabalho e possibilitar a utilização do Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Civil do campus Universitário Federal de Tucuruí;

À professora Dra. Karyme do Socorro de Souza Vilhena, que apoiou a realização desta pesquisa com os equipamentos do laboratório de química e com suas conselhos e instruções;

Ao Professor Dr. Marcelo Rassy Teixeira pelos conselhos e incentivos.

À Engenheira e Técnica Sra. Francirene Pereira Bonfim e ao graduando em engenharia civil Sr. Vinicius de Oliveira Costa, que sempre esteve disposta a ajudar esta pesquisa e possibilitou inúmeros momentos de felicidades;

Ao Técnico do Laboratório de Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica Sr. Rodimilson, que foi crucial para a construção do equipamento de Inderbitzen e do cavalete de nivelamento;

À colaboração do Professor Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara e da Sra. Giselle, por possibilitarem a utilização da casa de passagem, o que viabilizou a realização deste mestrado;

A todos os colaboradores do serviço de vigilância, pelas instruções, conselhos e sugestões sobre diferenças de características regionais, existentes e pelo incentivo e motivação para a conclusão desse trabalho, em especial ao Sr. Jackson, Sr. Lucio e ao Sr. Roni, por terem condutas ilibadas, e de grande humildade.

A todos os colegas que incentivaram e contribuíram com informações diretas ou indiretas sobre as características do Município de Tucuruí.

“Uma pessoa inteligente resolve
um problema, um sábio o previne.”
Albert Einstein

RESUMO

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí, além de ser a 5º maior hidrelétrica do mundo em capacidade de geração, promove energia à vários estados brasileiros, e, tendo um reservatório de 2.917 km², está fortemente sujeita a manifestação de processos erosivos. Diversos trabalhos relatam a ocorrência de feições erosivas nas proximidades do lago do seu reservatório, além de estar constantemente sujeita a ações erosivas laminares em suas áreas de drenagem. Neste trabalho Foram realizados levantamentos bibliográficos, verificações de campo e análises diretas e indiretas da erodibilidade de amostras dos principais solos do reservatório da UHE Tucuruí. As análises indiretas empregaram formulações semiempíricas baseadas em características físicas e geotécnicas dos solos, e as diretas testaram amostras indeformadas sob escoamento superficial, exposição de processos de imersão gradual e total em água, e sob intensos níveis de amolgamento para avaliações na metodologia Miniatura Compactada Tropical – M.C.T. Verificou-se que é possível notar uma sensível elevação da ocupação territorial do reservatório, favorecendo a exposição aos processos erosivos, e que as amostras classificadas pedologicamente como Argissolo e Latossolo Amarelo apresentaram médias taxas de erodibilidade, como 0,0392 e 0,0323 g/cm²/min./Pa e baixos níveis de desagregação, enquanto o Latossolo Vermelho apresentou baixa erodibilidade como 0,002 g/cm²/min./Pa, médios a altos níveis de desagregação e expansões, na metodologia M.C.T. Tais conclusões indicam que a atividade agrícola da área deve privilegiar culturas que mantenham a cobertura superficial das áreas dos primeiros solos e a prevenção de usos que possam desestruturar e amolgar o ultimo solo.

Palavras-chave: Erodibilidade, UHE-Tucuruí, Inberbitzen. Solos Tropicais.

ABSTRACT

The Tucuruí Hydroelectric Power Plant, besides being the 5th largest hydroelectric plant in the world in generating capacity, transfers electric power to several Brazilian states and, having a reservoir of 2,917 km², is strongly subject to erosion. Several studies report the occurrence of erosive features near the its reservoir, besides being constantly subjected to laminar erosive actions in its drainage areas. In this work we carried out bibliographical surveys, field checks and direct and indirect analyzes of the erodibility of samples of the main soils of the Tucuruí HPP reservoir. Indirect analyzes employed semiempirical formulations based on physical and geotechnical characteristics of the, and the direct ones tested undisturbed samples under runoff, exposure to gradual and total water immersion processes, and under intense sample remoulding levels for evaluations in the Tropical Compacted Miniature - M.C.T. It was possible to notice a significant increase in the reservoir territorial occupation, favoring the exposure to erosive processes, and that the samples classified as Pedisol as Ultisol and Yellow Latosol presented average erodibility rates, as 0.0392 and 0.0323 g / cm² / min / Pa and low levels of disaggregation, while Red Latosol presented low erodibility as 0.002 g / cm² / min / Pa, medium to high levels of disaggregation and expansions, in the MCT methodology. These conclusions indicate that the agricultural activity in the area must grow crops that maintain the surface coverage of the first soil areas, and the prevention of uses that may disrupt and damage the last soil.

Keywords: Erodibility, HPP-Tucuruí, Inberbitzen, Tropical soils.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos.....	2
Tabela 2 – Características dos domínios porosos do Distrito Federal.	19
Tabela 3 – Categorização espacial e temporal climática.	22
Tabela 4 – Medidas preventivas do controle de sedimentos e do assoreamento do reservatório	27
Tabela 5 – Medidas corretivas do controle de sedimento e do assoreamento do reservatório	28
Tabela 6 – Valores de K para solos de dois agrupamentos do estado de São Paulo.	35
Tabela 7 – Valores de erodibilidade de solos para distintos solos	35
Tabela 8 – Valores do fator C para diferentes condições de uso e manejo do solo..	38
Tabela 9 – Práticas conservacionistas e seus valores de fator P.....	38
Tabela 10 – Principais métodos indiretos para determinação da erodibilidade dos solos.....	40
Tabela 11 – Critério de Erodibilidade do solo de BASTOS (1999).....	42
Tabela 12 – Classes de erodibilidade do solo	42
Tabela 13 – Metodologias para avaliação indireta da erodibilidade de solos.....	43
Tabela 14 – Valores de referência para limites de consistência de solos coesivos ..	47
Tabela 15 – Limites de consistência dos Argilominerais conforme Mitchell e Soga (2005).....	48
Tabela 16 – Atividade dos Argilominerais e de combinações preparadas artificialmente	49
Tabela 17 – Níveis de erodibilidade dos grupos MCT quanto à erosão em seções de corte	52
Tabela 18 – Valores VA e CA, em função da superfície específica medida pelo azul de metileno e o Grau de Atividade do Argilo Mineral proposto por Fabbri (1994).	58
Tabela 19 – Tipos de avaliações da erodibilidade de solos em termos de aplicação.	59
Tabela 20 – Informações de aplicações de determinados testes de erosão.	61
Tabela 21 – Aplicação e modificações do ensaio de Inderbitzen	65
Tabela 22 – Coeficiente de rugosidade de Manning.	67
Tabela 23– Alguns valores de Erodibilidade do Inderbitzen encontrados em pesquisas.....	69
Tabela 24 – Coordenadas Geográficas do locais de amostragem.....	87

Tabela 25 – Limites de consistência das amostras analisadas.....	108
Tabela 26 – Massa Especifica dos Sólidos das amostras de cada solo	109
Tabela 27 – Teores de matéria orgânica dos solos analisados.....	110
Tabela 28 – Dados da adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha dos solos analisados.....	111
Tabela 29 – Descrição do comportamento das amostras na execução das pastilhas do Método Expedito das Pastilhas.	112
Tabela 30 – Fator K de erodibilidade determinado por formulações indiretas e o encontrado pelo equipamento de Inderbitzen	117
Tabela 31 – Matriz de Correlação dos modelos das formulações semi empíricas com os dados obtidos experimentalmente.....	118
Tabela 32– Informações das avaliações geotécnicas de erodibilidade.....	119
Tabela 33 – Análise da verificação das propriedades dos solos como LL, LP, IP, Massa especifica dos solos, Massa especifica seca natural, índice de vazios, Porosidade e o Teor de matéria orgânica significativamente diferentes, pelo método de Friedman	119
Tabela 34 – Avaliação da erodibilidade dos solos na classificação M.C.T.....	123
Tabela 35 – Verificações da erodibilidade dos solos pelos métodos investigativos empregados	125
Tabela 36 – Avaliação da erodibilidade e das tensões cisalhantes hidráulicas críticas encontradas na pesquisa e em outras que utilizaram o mesmo equipamento.....	126
Tabela 37 – Classificação pelo Sistema de Classificação Unificada-UCS	140
Tabela 38 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min e 10° de inclinação.....	164
Tabela 39 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min. e 20° de inclinação.....	165
Tabela 40 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min. e 30° de inclinação.....	166
Tabela 41 – Determinações teóricas e reais da altura da lâmina de escoamento. .	168
Tabela 42 – Massa Especifica e índice de vazios determinadas para o Argissolo..	169
Tabela 43 – Massa Especifica e índice de vazios determinadas para o Latossolo Amarelo.....	169
Tabela 44 – Massa Especifica e índice de vazios determinadas para o Latossolo Vermelho.....	170
Tabela 45 – Ensaio de Adsorção de Azul do Argissolo conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068,	

com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	171
Tabela 46 – Ensaio de Adsorção de Azul do Argissolo conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	172
Tabela 47 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Amarelo conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	173
Tabela 48 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Amarelo conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	174
Tabela 49 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Vermelho conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	175
Tabela 50 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Vermelho conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.	176
Tabela 51 – Dados do método expedito das pastilhas do Argissolo.	177
Tabela 52 – Dados do método expedito das pastilhas do Latossolo Amarelo.	178
Tabela 53 – Dados do método expedito das pastilhas do Latossolo Amarelo.	179
Tabela 54 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Argissolo.....	180
Tabela 55 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Latossolo Amarelo.....	181
Tabela 56 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Latossolo Vermelho.....	182

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Influência da erosão por efeito da chuva e por fluxo superficial.....	7
Figura 2 – Capacidade de infiltração de água no solo para um modelo hipotético de vertente com iguais níveis de erodibilidade.....	8
Figura 3 – Processos erosivos superficiais laminares.....	9
Figura 4 – Dinâmica da desenvolvimento da erosão interna.....	10
Figura 5 – Ocorrências de erosão interna	11
Figura 6 – Processos erosivos superficiais lineares.....	12
Figura 7 – Características da evolução do assoreamento de reservatórios.....	14
Figura 8 – Ciclo hidrológico e seus componentes.....	17
Figura 9 – Pontos de fuga de água do reservatório.	18
Figura 10 – Classificação de vertentes segundo a forma em perfil de acordo com Troeh.....	20
Figura 11 – Identificação das áreas que apresentam deslocamento de massa e erosões no reservatório da UHE Furnas porção Norte.	21
Figura 12 – Identificação das áreas que apresentam deslocamento de massa e erosões no reservatório da UHE Furnas porção Sul.	21
Figura 13 – Classificação climática com os critérios de Koppen (1936) do Brasil.....	24
Figura 14 – Processo de Implantação de usinas hidrelétricas	24
Figura 15 – Representação do Modelo de escoamento superficial.....	29
Figura 16 – Mapa do Fator R e classificação climática de Koppen.....	32
Figura 17 – Nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) para estimativa do fator KEUPS. Para converter os valores de K do nomograma do Sistema Inglês para o sistema Internacional de Unidade, basta dividir o valor de K deste nomograma por 7,59 conforme Pruski (2009).	34
Figura 18 – Índice da classificação da estrutura do solo do Nanograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971)	34
Figura 19 – Hierarquização dos solos de Mato Grosso, de acordo com a erodibilidade, conforme SEPLAN-MT.....	44
Figura 20 – Classificações de textura de identificação e avaliação da erodibilidade de solos.....	45
Figura 21 – Hierarquização da erodibilidade dos grupos do SUCS.	46
Figura 22 – Carta de plasticidade de Casa Grande.	47

Figura 23 – Regiões de distintas tendências de erodibilidade para solos Argilosos, conforme valores de plasticidade predominantes de acordo com Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).	48
Figura 24 – Diagrama de formação da assembleia dos solos.....	50
Figura 25 – Diagrama das estruturas de Caulinita, Ilita e Montmorilonita.	51
Figura 26 – Estrutura do Corante Azul de Metileno.....	52
Figura 27 – Influencia da Adsorção de Azul de metileno conforme Lautrin (1987) apud. Pejon (1992).	54
Figura 28 – Diagrama de atividade das argilas pelo método do Azul de metileno de Lautrin (1989) apud. Pejon (1992).....	55
Figura 29 – Avaliações da técnica de Adsorção de Azul de Metileno com métodos tradicionais de aferição da Capacidade de troca Catiônica e com a classificação MCT conforme Pejon (1992).	56
Figura 30 – Determinações dos Valores de Azul adsorvidos pelas misturas argilosas e a sua suas aferições térmicas e termogravimétrica.	57
Figura 31 – Carta para determinação do grau de atividade da fração argila dos solos	58
Figura 32 – Tipo de avaliação da erodibilidade dos solos em termo de aplicação.....	60
Figura 33 – Estação experimental de campo para a avaliação da erodibilidade de solos.....	61
Figura 34 – Canais de terra experimentais para a avaliação da erodibilidade de solos.....	62
Figura 35 – Equipamento de Inderbitzen em sua concepção original	63
Figura 36 – Equipamento de Inderbitzen utilizado na pesquisa Estabilidade de Taludes.	64
Figura 37 – Equipamento de Inderbitzen de Stephan (2010).	66
Figura 38 – Representação da Taxa de material erodido pela sua respectiva tenção hidráulica e o ajuste linear da tendência de erosão.	68
Figura 39 – Ensaio de Desagregação	71
Figura 40 – Equipamentos da execução do ensaio de Pinhole.....	72
Figura 41 – Processo de Geração de Energia Elétrica das casas de força da UHE Tucuruí.	73
Figura 42 – Distribuição dos principais elementos operacionais da UHE Tucuruí	74
Figura 43 – Localização do empreendimento UHE Tucuruí.....	75
Figura 44 – Regiões de integração do estado do Pará	76

Figura 45 – Mapa da Área de Preservação Ambiental – APA do Lago de Tucuruí...	77
Figura 46 – Mapas de classificações de erosão laminares, cenário de 2001.	79
Figura 47 – Mapa de classificação de erosão linear, cenário de 2001.....	80
Figura 48 – Variação das condições de cobertura de solo do reservatório da UHE Tucuruí.....	80
Figura 49 – Mapa pedológico de solos da área de Integração do lago de Tucuruí...83	
Figura 50 – Vistas aéreas da região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável – RDS Alcobaça, registradas por Barrata (2011).	84
Figura 51 – Manifestação de processos erosivos acelerados observados por Barrata (2011).....	84
Figura 52 – Caminhos utilizados nas visitas as distintas formações pedológicas.....	85
Figura 53 – Feições erosivas verificadas na região do Argissolo.....	86
Figura 54 – Feições erosivas verificadas na região do Latossolo Amarelo.....	86
Figura 55 – Feições erosivas verificadas na região do Latossolo Vermelho.....	87
Figura 56 – Locais de amostragem distintas formações pedológicas.	87
Figura 57 – Material para o transporte de amostras indeformadas.....	89
Figura 58 – Etapas da extração da amostra indeformada do Argissolo.....	90
Figura 59 – Amostras indeformadas coletadas e protegidas com papel filme prontas para o transporte.....	90
Figura 60 – Apresentação dos locais de coleta das amostras para caracterização. .91	
Figura 61 – Ensaio de adsorção de Azul de Metileno.	94
Figura 62 – Procedimento de reabsorção de água das pastilhas utilizadas.....	94
Figura 63 – Procedimento de registro das condições das pastilhas após reabsorção e de penetração com a agulha padrão.....	95
Figura 64 – Ensaio de desagregação da amostra do Argissolo por imersão Parcial, após um período de 30 minutos.....	96
Figura 65 – Projeto do equipamento de Inderbitzen	97
Figura 66 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.	98
Figura 67 – Sistema de cravação do cilindro biselado das amostras para o ensaio de Inderbitzen.....	100
Figura 68 – Processos de escavação para coleta das amostras	101
Figura 69 – Determinação da taxa de erosão da amostra.	102
Figura 70 – Equipamentos para a obtenção dos sedimentos.	102

Figura 71 – Determinação do Fator K com três determinações	103
Figura 72 – Fluxograma de Determinação da erodibilidade da pesquisa.....	104
Figura 73 – Distribuições granulométricas do Argissolo com e sem defloculante...	105
Figura 74 – Variação granulométrica do Argissolo.....	106
Figura 75 – Distribuições granulométricas do Latossolo Amarelo com e sem defloculante.....	106
Figura 76 – Variação granulométrica do Latossolo Amarelo.....	106
Figura 77 – Distribuições granulométricas do Latossolo Vermelho com e sem defloculante.....	107
Figura 78 – Variação granulométrica do Latossolo Vermelho.....	108
Figura 79 – Histogramas de frequência do índice de vazios dos três solos analisados, Software ESTATISTICA.....	109
Figura 80 – Mineralogia por Difração de Raios X dos solos.....	110
Figura 81 – Determinação do grupo da metodologia M.C.T. das amostras.....	112
Figura 82 – Ensaio de Desagregação das amostras.....	113
Figura 83 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Argissolo.....	114
Figura 84 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Latossolo Amarelo.....	115
Figura 85 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Latossolo Vermelho.....	115
Figura 86 – Análise discriminante da características de erosão por esforço cisalhante hidráulico das amostras de solo.....	116
Figura 87 – Classificação do Fator K de erodibilidade determinados por formulações indiretas e com o encontrado pelo equipamento de Inderbitzen.....	117
Figura 88 – Avaliação da não correlação ($p>0,05$) entre os grupos dos solos pelo método de Friedman, pela diferença da soma dos Ranks.....	120
Figura 89 – Classificação textorial de avaliação da erodibilidade de solos proposta por Araújo e Campus (2013).....	121
Figura 90 – Classificação das amostras na carta de plasticidade de Casa Grande.....	121
Figura 91 – Classificação das amostras nas regiões de distintas tendências de erodibilidade para solos Argilosos, conforme valores de plasticidade predominantes de acordo com Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).....	122
Figura 92 – Avaliação da atividade média dos argilominerais.....	123

Figura 93– Avaliações das níveis de erodibilidade dos solos da pesquisa e de outros autores. com a classificação de Manning (2000).....	126
Figura 94 – Classificação de solos MCT	141
Figura 95 – Classificação de Solos pelo Método Expedito das Pastilhas	142
Figura 96 – Principais etapas da construção do equipamento de Inderbitzen.	144
Figura 97 – Sistema do ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo método da Mancha.	146
Figura 98 – Ângulo de contato entre uma gota de líquido e uma superfície sólida.	157
Figura 99 – A redução da tensão superficial facilita a entrada do líquido nas frestas formadas entre as fibras do tecido, o que proporciona a umectação do material por capilaridade.	157
Figura 100 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.	158
Figura 101 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.	159
Figura 102 – Equipamento de Inderbitzen com os segmentos de análise da velocidade.	161
Figura 103 – Perfil de velocidade do escoamento em vazão de 6,0 l/min. e inclinação de 10 graus	163
Figura 104 – Perfil de velocidades médias parra cada inclinação.....	163
Figura 105 – Interface do software livre SisCcoH 1.0 de estudos hidráulicos.	167
Figura 106 – Análise da variação das alturas de escoamento Real e Teórica.	168
Figura 107 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Argissolo.....	183
Figura 108 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Latossolo Amarelo.....	184
Figura 109 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Latossolo Vermelho.....	185

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
SUMÁRIO	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos da Pesquisa	3
1.3 Organização da Dissertação	4
2. EROÇÃO HÍDRICA	5
2.1 Processos Erosivos	8
2.1.1 Erosão Superficial	9
2.1.2 Erosão Interna.....	9
2.1.3 Erosão em Sulcos, Ravinas e Voçorocas.....	11
2.1.4 Erosão em Esqueletização.....	12
2.1.5 Outras Formas de Erosão	12
2.2 Agentes Erosivos em Reservatórios de Barragens	13
2.2.1 Formação e implicação da erosão do reservatório nas barragens.....	13
2.2.2 Condicionantes hidrológicos e hidrogeológicos.....	16
2.2.3 Condicionantes geomorfológicos	19
2.2.4 Condicionantes Climáticas	22
2.2.5 Projeto hidrelétrico e sua vida útil.....	24
2.3 Tensão Cisalhante Hidráulica e Resistência dos Solos	28
2.4 Previsão da Perda de Solo por Erosão em Grandes Áreas	30
2.4.1 Erosividade da Chuva (R)	31
2.4.2 Erodibilidade do Solo (K).....	32
2.4.3 Fator Comprimento (L) E Declividade da Encosta (S).....	36
2.4.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C).....	37
2.4.5 Práticas Conservacionistas (P)	38
2.5 Erodibilidade dos Solos	39
2.5.1 DETERMINAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS.	39
2.5.1.1 Análise do Fator K de Erodibilidade com Formulações Simi-Empíricas.	40
2.5.1.2 Avaliações Geotecnicas de Erodibilidade.....	42

2.5.1.3	Análise da Erodibilidade com Sistemas de Classificações.....	44
2.5.2	DETERMINAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS.....	59
2.5.2.1	Ensaio de Inderbitzen.....	62
2.5.2.2	Ensaio de Desagregação - Slaking Test	70
2.5.2.3	Pinhole Test	72
3.	ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ	73
3.1	Características do Empreendimento	73
3.2	Características Geopolíticas da Região Lago da UHE Tucuruí.....	75
3.3	Características da Área de Drenagem do Lago da UHE Tucuruí.	77
3.4	Características Geomorfológicas e Pedológicas do Lago da UHE Tucuruí.....	81
3.5	Características Fisiográficas dos Solos.....	83
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	88
4.1	Atividades de Campo	88
4.1.1	Determinação dos locais de amostragem	88
4.1.2	Amostragem	89
4.2	Ensaio de Laboratório.....	90
4.2.1	COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	90
4.2.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	91
4.2.3	ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA.....	92
4.2.4	CLASSIFICAÇÃO MCT PELO MÉTODO DAS EXPEDITO DAS PASTILHAS NOGAMI E VILLIBOR (1994).....	94
4.2.5	ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO	95
4.2.6	ENSAIO DE INDERBITZEN	96
4.3	Métodos de Análise dos Dados	104
5.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	104
5.1	Caracterização das Amostras	104
5.1.1	GRANULOMETRIA CONJUNTA COM SEDIMENTAÇÃO.....	105
5.1.2	LIMITE DE CONSISTÊNCIA	108
5.1.3	ÍNDICES FÍSICOS	109
5.1.4	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.	110
5.1.5	MINERALOGIA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS - X.....	110
5.1.6	ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA.....	111
5.2	Método Expedito das Pastilhas.....	111

5.3 Ensaio de Desagregação	112
5.4 Ensaio de Inderbitzen	114
5.5 Análise Indireta da Erodibilidade	116
5.6 Análise da Erodibilidade de Maneira Direta	126
6. CONCLUSÕES DA PESQUISA	127
6.1 Avaliação indireta DA erodibilidade	127
6.2 Avaliação direta erodibilidade.....	128
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
ANEXOS	139
Anexo I	139
Anexo II	141
Anexo III	143
Anexo IV.....	145
Anexo V	150
Anexo VI.....	151
Anexo VII.....	152
Anexo VIII.....	153
Anexo IX.....	154
Anexo X.....	155
APÊNDICES	156
Apêndice I	156
Apêndice II	161
Apêndice III	167
Apêndice IV.....	169
Apêndice V.....	171
Apêndice VI.....	177
Apêndice VII.....	180
Apêndice VIII.....	183

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das populações em escala mundial e a mudança de seus padrões de consumo têm acarretado o aumento do consumo de água, energia e alimentos no planeta, e, segundo Chen *et al.* (2015), atualmente, a água represada e empregada como mecanismo de infraestrutura é tida como uma ferramenta de promoção de desenvolvimento econômico.

O Brasil apresenta em 2019 uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável com a maioria de suas fontes hidráulicas, sendo aproximadamente 63,7% de origem Hidrelétrica, 9,2% Eólica, 9% Biomassa, 8,1% 5,4% Petróleo, 2% Carvão mineral, 1,3% Fotovoltaica e 1,2% Nuclear (ANEEL, 2019).

As Hidrelétricas podem ser a fio d'água ou possuírem reservatório e dessa maneira terem uma maior autonomia hídrica anual, mas também maiores danos socioambientais com áreas alagadas. Contudo, segundo ANEEL (2010) o assoreamento é um risco aos reservatórios que deve ser considerado nos projetos hidrelétricos.

Em regiões de clima tropical a erosão hídrica é a que tem maior influência na modificação do meio ambiente, desencadeando processos erosivos de natureza lenta ou acelerada (GUERRA *et al.*, 2012). Tal fenômeno acarreta grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais, sendo que os primeiros materiais removidos são geralmente de camadas superficiais, e podem tanto reduzir a fertilidade como prejudicar a trafegabilidade em vias não pavimentadas, e posteriormente, serem conduzidos para cursos de d'água, contribuindo para o seu assoreamento. Segundo Zachar (1982) pode-se classificar a erosão conforme os seus fatores e agentes ativos e estabelecer o ambiente de atuação conforme a Tabela 1.

Em reservatórios de barragens a identificação da formação de feições erosivas dificilmente ocorre no período de sua construção ou logo após a conclusão e podem comprometer a sua capacidade de reservamento, com o assoreamento do reservatório (ANEEL, 2000), o desprendimento de materiais de (THAPA *et al.*, 2017), e também podem causar danos ao meio ambiente (CASTILHO, 2016) e (FEARNSIDE, 2015).

Tabela 1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos.

Fator	Termo
1. Água	erosão hídrica
1.1 Chuva	erosão pluvial
1.2 Fluxo superficial	erosão laminar
1.3 Fluxo concentrado	erosão linear (sulco, ravina e voçoroca)
1.4 Rio	erosão fluvial
1.5 Lago, reservatório	erosão lacustrina ou limica
1.6 Mar	erosão marinha
2. Geleira	erosão glacial
3. Neve	erosão nival
4. Vento	erosão eólica
5. Terra, detritos	erosão soligênica
6. Organismos	erosão organogênica
6.1 Plantas	erosão fitogênica
6.2 Animais	erosão zoogênica
6.3 Homem	erosão antropogênica

Fonte: Zachar (1982).

Conforme ANEEL (2000) estima-se uma vida útil do reservatório da UHE Tucuruí de aproximadamente 1.000 anos, contudo, estudos hidrossedimentológicos realizadas pela ELETRONORTE (1988) *apud* Fearnside (2015), e apontados no relatório da Comissão Mundial de Barragens – CMB (2000) sugerem uma vida útil de 400 anos para o reservatório, sendo feita tal estimativa adotando dados de produção sedimentológica das campanhas de 1982 e feita recomendando a realização de estudos do cenário hidrossedimentológico, considerando suas áreas de drenagem correspondentes.

A propriedade dos solos que descreve a sua facilidade ou dificuldade de desprendimento das partículas sob ação das chuvas é definida como erodibilidade, na qual em bacias de drenagens de qualquer reservatório, é o fator de maior influência na estimativa da perda de material por erosão independentemente do modelo de cálculo empregado (PRUSKI, 2009). Tal propriedade possui sua determinação de modo qualitativo, avaliando-se o desempenho do material a um tipo de condição, ou de modo quantitativo, determinando-se a razão de material que pode ser desprendido por acréscimos de solicitação hidráulica de escoamento.

De acordo com Carvalho *et al.* (2017) a erodibilidade dos solos de reservatórios pode ser avaliada com estudos geotécnicos, analisando-se o seu comportamento em condições simuladas e controladas como, por exemplo, a desagregabilidade com imersão parcial ou total, a desestruturação interna hidráulica com aplicações de distintos gradientes hidráulicos, a dispersividade em água com determinações granulométricas com e sem o uso de defloculante como agente

dispersor, a taxa de material erodido por unidade de área e de carga hidráulica em fluxo solicitante, entre outros métodos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A erodibilidade de solos pode ser estimada por métodos indiretos com base nas características físico-químicas e mineralógicas do solo, ou, obtida por métodos diretos, com ensaios “in situ” ou de laboratório em amostras indeformadas de solo. Dados topográficos, pluviométricos e geológicos também são utilizados conjuntamente. As análises em laboratório possibilitam a avaliação de propriedades específicas como a suscetibilidade a erosão laminar de solos em condições simuladas e controladas, diferentemente do que acontece em campo, no qual, raramente é possível isolar e estudar um único parâmetro de forma controlada, contudo, ainda vantajoso pela possibilidade do entendimento de características específicas sem influências adicionais (GUERRA, 2012).

Dessa maneira cabe a necessidade de realização da análise da erodibilidade em distintos solos brasileiros, e, em especial, nos da região amazônica, cujas informações ainda são incipientes. Além disso, o estudo da erodibilidade dos solos em áreas de reservatório de usinas hidrelétricas é de extrema importância, pois as mesmas estão continuamente sujeitas à ação de erosões aceleradas em suas ilhas e bordas. O entendimento desta característica dos solos é indispensável para a boa gestão das áreas do lago, da capacidade de armazenamento, da segurança do empreendimento e da vida útil do reservatório.

Neste contexto serão desenvolvidos estudos predominantemente geotécnicos sobre a erodibilidade dos solos do lago do reservatório da UHE Tucuruí, e será avaliado a susceptibilidade à erosão laminar dos principais solos que o compõem de maneira direta com a execução do ensaio de Inderbitzen, e de maneira indireta analisando por exemplo as características físico e químicas, granulometria e a presença de elementos potencialmente dissolúveis.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

OBJETIVO GERAL

Analisar a erodibilidade dos solos do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí.

OBJETIVOS Específicos

- Analisar métodos diretos de avaliação da erodibilidade de solos e avaliar suas aplicações em conjunto os métodos indiretos;
- Analisar métodos indiretos de avaliação da erodibilidade de solos, seus níveis de dispersão e suas proximidade aos métodos diretos;
- Avaliar a erodibilidade dos solos do entorno do reservatório da UHE Tucuruí.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 8 capítulos:

- Neste primeiro capítulo foi apresentada a introdução da pesquisa detalhando a importância do estudo para o meio técnico, científico e para a sociedade civil com considerações iniciais, justificativas, objetivos e a própria organização do trabalho;
- No segundo capítulo expõe-se a revisão bibliográfica, subsidiando o entendimento de aspectos relacionados ao estudo da erodibilidade de solos no contexto de barragens, em suas definições técnicas, problemáticas de estudo, meios de estimativas, parâmetros e formulações empregadas para grandes áreas e as suas técnicas de determinação indireta e direta;
- No terceiro e quarto capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o provimento desta pesquisa, como os dados do reservatório da UHE Tucuruí, necessários para o delineamento das áreas de estudo, as atividades de campo, de laboratório e os métodos de análise de dados que foram empregados;
- No quinto capítulo é apresentado os resultados e discussões dos dados encontrados no desenvolvimento da pesquisa;
- No sexto capítulo é apresentado as conclusões obtidas neste trabalho e a proposição para a realização de trabalhos futuros;
- Em posterior aos capítulos elencados são expostos as Referências Bibliográficas consultadas e os Anexos e Apêndices.

2. EROSIÃO HÍDRICA

A erosão é um fenômeno natural que ocorre na natureza, sendo induzida normalmente por fatores climáticos no qual ocorre o transporte e depósito de partículas de solo, e, conforme Lepsch (2016), pode ser chamada de erosão geológica ou erosão natural, tendo como característica a remoção de material de maneira lenta na maior parte do planeta e compensada diversas vezes pelos contínuos processos de desenvolvimento dos solos.

Castilho *et al.* (2016) destacam que um dos principais fatores que dificultam o estudo da erosão é a falta de padronização de metodologias, e que o fato de possuir diferentes pronúncias em cada país amplia ainda mais essa dificuldade da comunicação e troca de experiências, sendo, por exemplo, pronunciada como “Voçoroca” no Brasil, “Cárcava” na Espanha, “Ravina” na França, “Lavaka” em Madagascar, “Wad” em Árabe, “Donga” na África do Sul, “Barranco” na Argentina e “Gully” e “Ravine” em países de língua Inglesa.

Conforme Lal (1994) diversos países sofrem com problemas devido a erosão acelerada promovida por intervenções antrópicas, e estima-se que as áreas afetadas chegam a ser cerca de 27% na África, 26% na Europa, 19% na Oceania, 18% na América do Sul, 12% na América do Norte e 3% na Ásia.

A erosão está presente em estudos das mais diversas áreas do conhecimento, tais como nas ciências agrárias, engenharia civil e ambiental, geografia e Geotecnia. Contudo, cada área trata deste fenômeno de modo próprio seja por características intrínsecas ao fenômeno estudado ou pelo seu direcionamento de estudo. Conforme Bastos (1999) o estudo da erosão obteve ao longo dos anos distintos enfoques conforme a área, ciência e objetivo da investigação, podendo ser classificados como:

- Agrônomo: Possui como foco central a determinação de índices de erosão e modelos para estimativas e avaliações quantitativas de materiais erodidos por unidade de tempo, podendo-se classificá-los em empíricos, como a Equação Universal da Perda de Solos (EUPS), modelos baseados em processos como o *Water Erosion Prediction Project – WEPP* e outros que ainda estão em desenvolvimento, e têm como foco principal reduzir a necessidade do conhecimento empírico das etapas e considerações de cálculo.

- Hidráulica de Canais: Tem como objetivo analisar a capacidade de canais hidráulicos suportarem determinadas taxas de escoamento e a determinação de taxas que expressem o comportamento “in situ” empregando-se os ensaios de Canais Hidráulicos, Jato Submerso cilindro rotatório e outros que ainda estão em desenvolvimento.
- Geologia de Engenharia: Tem como tema central a previsão da erodibilidade de solos direcionada ao mapeamento geotécnico e à compreensão dos fenômenos influenciadores e formadores dos relevos, encostas e dos matérias que encontram-se na superfície terrestre.
- Geotécnico com aplicação de conceitos da mecânica dos Solos, para o estudo da erosão de solos analisando as propriedades físicas dos solos, correlacionando-as com os seus índices físicos e desenvolvendo-se correlações para a determinação direta e indireta das taxas de erosão e buscando estabelecer bases para a criação e avaliação de métodos matemáticos do estudo da erosão.

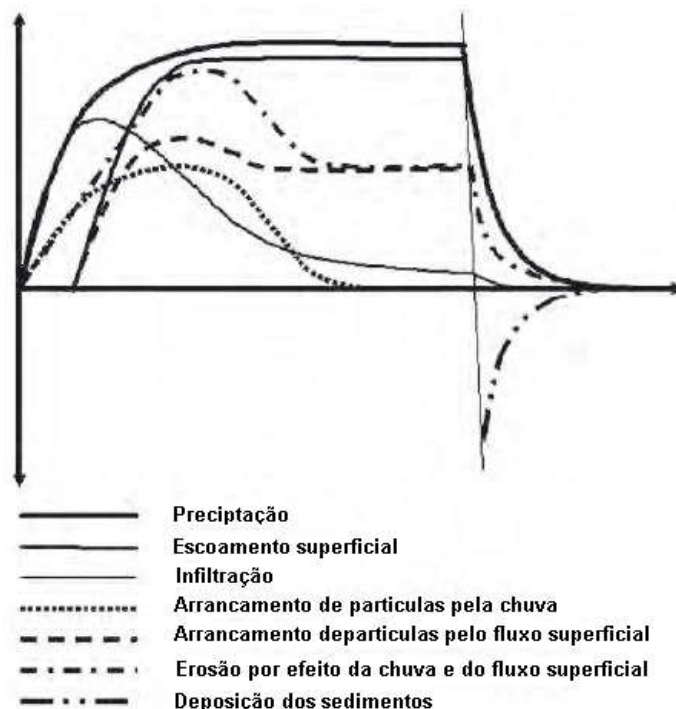
A erosão hídrica é regida por diferentes fatores, que podem ser separados em fatores externos, como o potencial de erosividade da chuva, condições de infiltração e escoamento superficial, declividade e o comprimento da encosta ou talude, e fatores internos, como o gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo (CARVALHO *et al.* 2006).

A erodibilidade dos solos é influenciada tanto pelo tipo de granulometria, composição química e mineralógica do solo, como pelas suas características de estado físico como estrutura, permeabilidade, compactidade e outras (CARVALHO *et al.*, 2006). A fração grossa do solo permite o engrenamento dos grãos, além de possuir um maior peso para ser transportada; já a fração fina do solo contribui significativamente com a coesão (CARVALHO *et al.*, 2006), porém, facilmente transportada e em determinados casos podem se tornar instáveis na presença de água (GUERRA *et al.*, 2012).

Carvalho *et al.* (2006) expõe que os principais agentes erosivos hídricos atuantes podem ser descritos como a erosão por efeito da chuva e do fluxo superficial, sendo ainda que após o início das estações chuvosas o solo tende a aumentar o valor de sua umidade natural, e, conseqüentemente, saturar mais

rapidamente, tendo como principal agente atuante apenas o fluxo superficial conforme a Figura 1.

Figura 1 – Influência da erosão por efeito da chuva e por fluxo superficial.



Fonte: Carvalho *et al.* (2006).

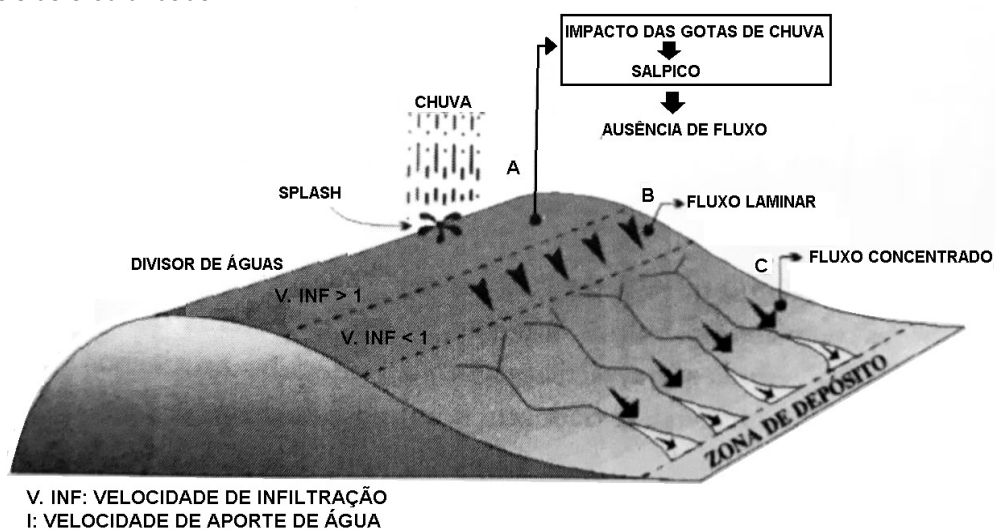
Stephan (2010) destaca as grandes contribuições dos modelos empíricos, como por exemplo o da USLE para a obtenção das estimativas quantitativas de material erodido, contudo, advertindo também que emprego de tais metodologias deve ser realizado com cautela, e, preferencialmente, com dados das características de solos locais e empregando conjuntamente técnicas adicionais para um melhor entendimento do potencial de desenvolvimento dos processos erosivos.

As feições erosivas encontradas em campo são complexas e possuem muitas vezes mais de um único processo erosivo em desenvolvimento, os quais podem conduzir ao surgimento de novos processos ou apagar marcas de outros. Contudo, a sua compreensão possibilita o estabelecimento de bases para o mapeamento da abrangência, gravidade e o estudo de medidas corretivas e preventivas mais eficazes (CARVALHO *et al.*, 2006).

2.1 PROCESSOS EROSIVOS

Guerra *et al.* (2012) destaca que na erosão pluvial ocorrem simultâneos processos erosivos em detrimento das condicionantes de infiltração e escoamento da chuva, sendo que sobre as encostas existem áreas onde a infiltração é superior à precipitação (A) e onde a precipitação é superior à infiltração, mas o escoamento é Laminar (B) e onde, posteriormente, o fluxo torna-se concentrado (C) como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Capacidade de infiltração de água no solo para um modelo hipotético de vertente com iguais níveis de erodibilidade.



Fonte: Guerra *et al.* (2012).

De acordo com Carvalho *et al.* (2006), Guerra *et al.* (2012) e Stephan (2010), em solos desprovidos de cobertura a dinâmica do desenvolvimento dos processos erosivos pluviais é marcada por importantes etapas como o “**Splash**”, ou Sapicalmento, momento em que a gota de água da chuva toca o solo, desagregando-o e podendo em alguns casos contribuir para a formação de crostas ou apenas para desestruturar as partículas que estiverem aglomeradas em grumos, e a etapa de “**Runoff**”, sendo o instante posterior à saturação do solo, no qual forma-se o escoamento superficial tido como inicialmente como “**Rill**”, Laminar ou de lençol, no qual o tipo de escoamento ainda é laminar, e na medida que formam-se pequenas cavidades, o escoamento passa a ser denominado “**Interill**” ou Linear, sendo ainda que tais cavidades tenderão adiante a evoluir para Sulcos, com

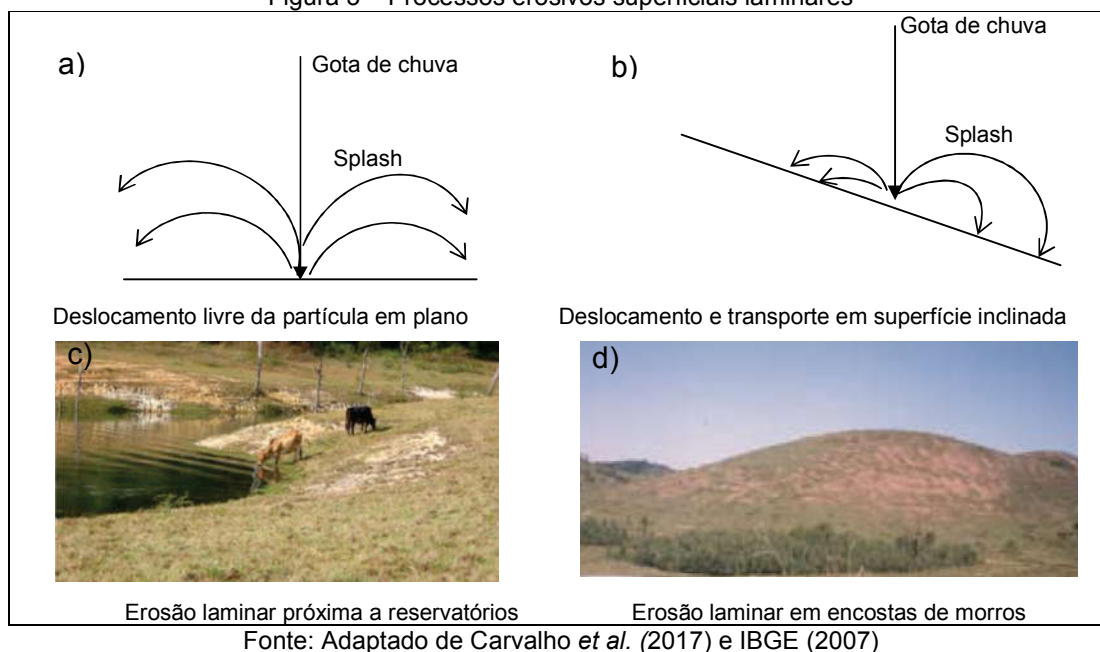
profundidades que transformam o escoamento em turbulento e poderão dar início ao processo de Ravinamento, e, mais tardiamente, ao de Voçorocamento.

Cada etapa do processo erosivo pluvial possibilita o desenvolvimento de erosão específicas, como a erosão superficial, interna, em sulcos, ravinas e voçorocas, em esqueletização e outras.

2.1.1 Erosão Superficial

A erosão superficial inicia com o desgaste promovido pelo impactos das gotas da chuva “*splash*”, nos primeiros instantes, como mostram as Figura 3a e Figura 3b. Posteriormente, após a infiltração do solo ser inferior à taxa de precipitação, inicia-se o escoamento superficial de modo laminar, tendendo a transportar as partículas desagregadas na etapa anterior e também a promover tensões cisalhantes sobre a sua superfície, que adiante também removerão as partículas superficiais como visto nas Figura 3c e Figura 3d.

Figura 3 – Processos erosivos superficiais laminares



2.1.2 Erosão Interna

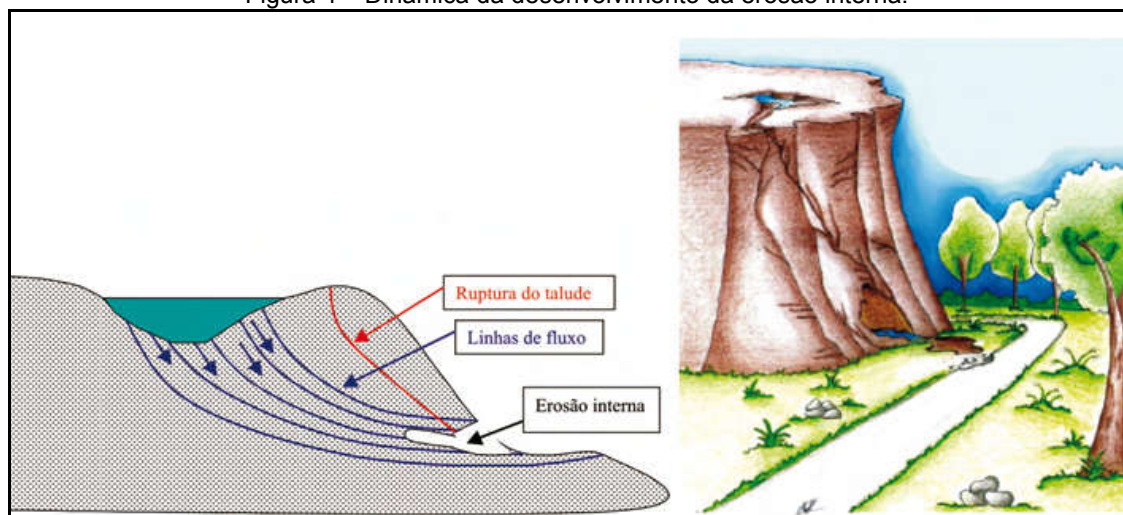
A erosão interna conhecida como “Piping”, desenvolve-se quando ocorre o carreamento das partículas do interior do solo, através da circulação fluxo hidráulico subsuperficial, sendo que na medida em que tal carreamento é desenvolvido,

maiores serão os caminhos e fluxos de água, além de menores as capacidades resistentes das camadas do solo como o mostram a Figura 4 e Figura 5.

O surgimento da erosão interna pode ocorrer nas seguintes situações segundo Carvalho *et al.* (2006):

- Quando a força de percolação ultrapassa a capacidade resistente, resultando em uma ruptura hidráulica, que se desenvolve em locais de descarga hidráulica, onde o gradiente atinge o valor crítico e promove condições de liquefação, abrindo orifícios e possibilitando o aumento do fluxo hidráulico e o transporte de material;
- Quando o gradiente hidráulico ultrapassa o crítico do solo, como em situações de rebaixamento do nível d'água, como em Voçorocas ou na implantação de bacias de infiltração a montante de Ravinas ou Voçorocas;
- Quando a fração grossa do solo não consegue ser filtro da fina, possibilitando a sua perda, ocorrendo posteriormente, o descalçamento e deslocamento da grossa, formando tubos por onde o fluxo hidráulico tende a se intensificar.

Figura 4 – Dinâmica da desenvolvimento da erosão interna.



Fonte: Carvalho *et al.* (2006)

Figura 5 – Ocorrências de erosão interna



Fonte: Adaptado Augustinho e Aranha (2006); Carvalho *et al.* (2006)

2.1.3 Erosão em Sulcos, Ravinas e Voçorocas

A etapa posterior ao desenvolvimento da erosão superficial é normalmente o estabelecimento de sulcos, que conduzirão o escoamento superficial para um determinado caminho, promovendo o seu afundamento ou união com outros e intensificando-se nestas regiões denominadas ravinas, da qual possuirá uma solicitação hidráulica em sua parte superior laminar e no seu interior linear.

De acordo com Carvalho *et al.* (2006) existem vários modos de classificar e diferenciar os sulcos das ravinas e voçorocas e que baseiam-se em critérios geométricos, geomecânicos, de fluxo ou devido á forma linear ou não linear da erosão, entretanto, conforme Couto (2015), emprega-se no meio geotécnico as referidas expressões quando atingirem profundidades de 0 a 10 cm, de 10 à 50 cm e superior a 50 cm, respectivamente. Ainda sobre a definição de Voçoroca, Guerra *et al.* (2012) expressam que em alguns casos emprega-se o termo voçoroca quando a erosão, independentemente de sua profundidade, atinge o nível do lençol freático, mas, ressalta ainda que, como em determinadas localidades o nível freático é variável conforme a sazonalidade das estações anuais, o melhor parâmetro classificatório seria uma profundidade pré-estabelecida.

Carvalho *et al.* (2017) destaca que a formação dos sulcos e ravinas potencializa o poder erosivo do fluxo superficial e que em termos visuais, tais tipos de erosões são muito impactantes e que o volume de material erodido por unidade de área da erosão é muito superior ao da laminar, o que pode conduzir a formação de voçorocas rapidamente, contudo, em termos de volume total de material erodido,

a erosão laminar é raramente ultrapassada devido ao tamanho da área afetada como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Processos erosivos superficiais lineares



Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2006) e (2017).

2.1.4 Erosão em Esqueletização

A erosão em esqueletização é um processo de remoção das partículas, ou compostos, e elementos químicos pela sua solubilização, promovendo a degradação física do solo, aumentando sua porosidade e, conseqüentemente, podendo, adiante, comprometer a sua estabilidade e também a redução de sua fertilidade. Conforme Carvalho *et al.* (2006), este fenômeno é pouco estudado no Brasil e sua contribuição é de grande importância para a formação de voçorocas.

O desencadeamento do processo de esqueletização é promovido quando o solo tem determinada tendência a ser solubilizado e está sujeito a um fluxo hidráulico em meio não saturado, promovendo o aumento dos poros e o estabelecimento de uma crosta na face do talude pela deposição do material carreado. Essa crosta contribui para a redução da infiltração de água, contudo, também dificulta a diminuição da umidade do solo no interior do maciço ou talude, o também contribui para o surgimento da erosão interna.

2.1.5 Outras Formas de Erosão

De acordo com Carvalho *et al.* (2006), existem vários tipos de erosões sendo complexo o seu completo mapeamento, porém, alguns modos adicionais de erosões que possuem como característica a formação de feições que distinguem-se das anteriores e também são desencadeadas em condições particulares dos solos, sendo destacadas como:

- Erosão em Pedestal: Tem como principal característica a formação de pedestais ou colunas promovidas quando o solo erodível é protegido da erosão em *splash* como por pedras (grânulos e seixos de minerais variados) ou raízes de árvores. Sua ocorrência é identificada em no interior de ravinas e voçorocas e em zonas mosqueada ou de transição entre o solo laterítica e saprolítico devido à existência de elementos isolados de maior resistência;
- Erosão em Pináculo: Formam-se pináculos quando o solo é removido por transportado ou dissolvido e o seu poder erosivo diminui na medida da profundidade. Suas características químicas e físicas não são claramente definidas, contudo, sua ocorrência é frequentemente identificada em ambientes onde existem irregularidades como sódio excessivo (completa deflocação).
- Erosão da Fertilidade: Desenvolve-se a redução da fertilidade do solo através da perda dos nutrientes das plantas por diluição na água precipitada, sem ocorrer qualquer perda física do solo.

2.2 AGENTES EROSIVOS EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

A erosão em reservatório de barragens possui diversos efeitos negativos que, dependendo das suas características de profundidade e comprimento, podem resultar em seu assoreamento. As principais condicionantes naturais que influenciam na formação dos seus processos erosivos são o clima, topografia, morfologia, cobertura vegetal e os atributos físico-químicos, que influem na geomecânica do solo. Carvalho *et al.* (2017) aponta que fatores antrópicos como uso, manejo e o tipo de cultura podem influenciar no favorecimento de erosões, uma vez que o solo pode ficar mais ou menos exposto às intempéries, contudo, existem também medidas que podem ser implementadas para prevenir ou corrigir a formação de erosões.

2.2.1 Formação e implicação da erosão do reservatório nas barragens

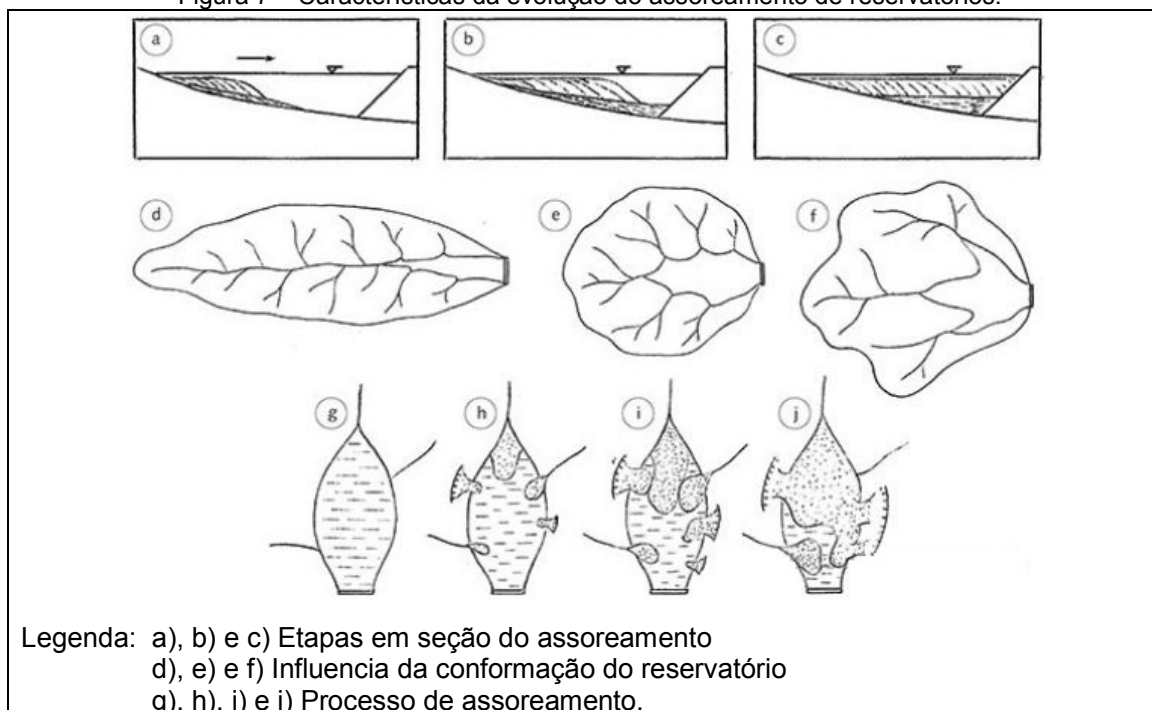
A erosão do reservatório propicia a elevação da carga de sedimentos do lago represado e, conseqüentemente, contribui para o seu assoreamento, que pode ser pela contribuição principal do rio a ser barrado, dos tributários que afluem diretamente no reservatório e das encostas como interflúvios. A deposição do sedimento é favorecida quando ocorre a redução da velocidade do rio principal ou

tributário, como no alargamento de sua calha ou na redução de seu gradiente hidráulico, e sendo mais intensa quanto maior for tal redução e comum a toda extremidade de montante do reservatório (Costa, 2018).

De acordo com Costa (2018) devido ao maior peso das partículas grossas, estas tendem a se depositar nos instantes iniciais do curso do rio, possibilitando o comprometimento da trafegabilidade e mais adiante, a sua fração fina, sendo que quanto maior for tal deposição, maior será o avanço das partículas grossas como mostram as Figuras de Figura 7a. até Figura 7c.

A conformação da bacia hidrográfica influencia significativamente na dinâmica da sedimentação do reservatório, sendo preferível reservatórios mais longos como o modelo de com um rio principal, com afluentes curtos de pouca competência conforme a Figura 7d. Um modelo espraiado tenderá a produzir um maior volume de sedimentos, mais distribuídos e com menor poder danoso conforme a Figura 7e. De outra maneira, quando se tem a sua combinação de conformações pode-se potencializar o poder de transporte e de assoreamento como ilustrado na Figura 7f, tendo uma progressão de acordo com as Figuras Figura 7g até Figura 7j Costa (2018).

Figura 7 – Características da evolução do assoreamento de reservatórios.



Fonte: Costa (2018).

As consequências do desencadeamento de fenômenos erosivos em reservatórios dependem do seu local de formação, volume, velocidade e ambiente de deposição. O local da formação da erosão é um fator determinante, pois quanto mais distante do barramento e da borda do reservatório for o processo erosivo, menos danoso será o sedimento, acarretando apenas em prejuízos sócio ambientais isolados, mas ainda contribuindo para a redução do volume de água do reservatório como apresentado Figura 7.

Na ocorrência de fenômenos erosivos no barramento do reservatório, medidas corretivas devem ser implementadas de modo imediato. Dependendo do tamanho e da acessibilidade do local, tais medidas podem ser desde a recomposição e compactação do solo erodido com compactador dinâmico tipo sapo, até a limpeza do local e a recomposição das camadas afetadas com a compactação estática por prensagem com a concha do trator tipo escavadeira.

Na construção de barragens de terra, as primeiras chuvas são as mais críticas, pois os taludes ainda não estão completamente protegidos com vegetação e os solos possuem baixa fertilidade por não possuírem matéria orgânica, tornando-se necessário o emprego inicial de geomantas ou de espécies de com alta velocidade de crescimento como ervas daninhas e, paralelamente, espécies forrageiras de capim ou gramas.

Na ocorrência de pontos alívio de hidráulico como minas de água nas ombreiras ou no vale a jusante do barramento, realiza-se o seu monitoramento, implementando-se uma caixa medidora de vazão, registrando-se o seu volume e turbidez, verificando-se também, constantemente, a sua feição e as áreas próximas, lendo-se os leitores piezométricos do barramento e, caso identificada alguma possibilidade de aumento do risco do rompimento da barragem, sua correção é realizada de modo imediato ou mitigada com o emprego de material drenante, como camadas de areia, ou ainda, construindo-se uma berma de equilíbrio.

O volume do material erodido em conjunto com sua velocidade de manifestação, pode potencializar seus danos e comprometer a segurança do próprio barramento e/ou dos municípios à sua jusante, como no caso de deslocamentos de grandes quantidades de massa em curtos períodos de tempo, desencadeando grandes ondas, tal como o ocorrido em Vajont em 1963, em que segundo SORIA (2013) o deslizamento de uma encosta a montante do barramento mobilizou aproximadamente 240 milhões de m³ de solo e rocha em um único instante,

causando a formação de uma onda de aproximadamente 40 m de altura do nível do reservatório, evoluindo para uma altura de 70m e ultrapassando a cota máxima da barragem, devastando a cidade de Longarone situada a 1,5 km e vitimando cerca de 2000 pessoas durante o período noturno.

O ambiente de deposição pode comprometer diversos fatores de utilização do reservatório, como por exemplo:

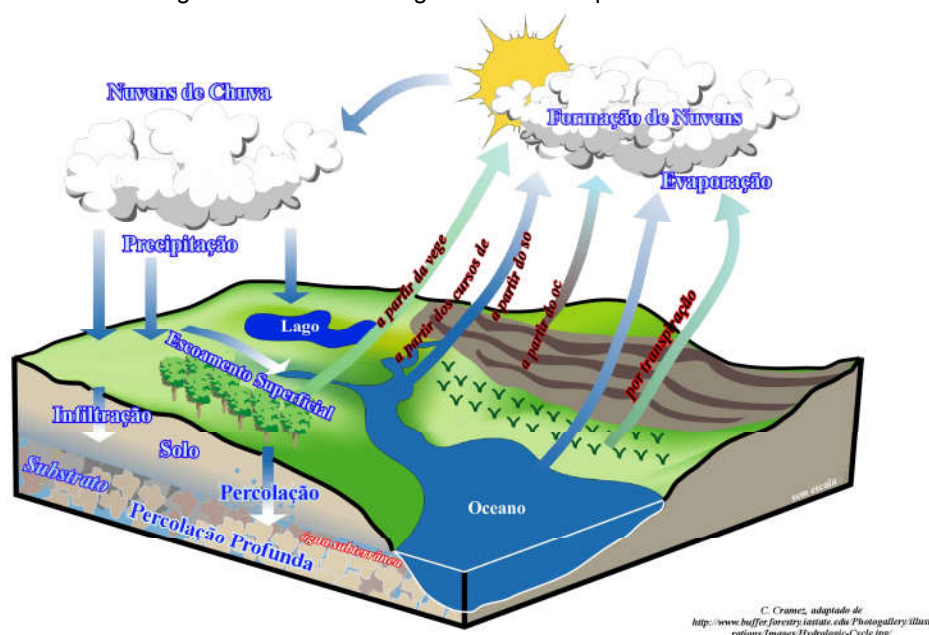
- No alto delta ou em afluentes contribuintes: Prejudicando a sua trafegabilidade;
- Nos bordos, portos e cais de atracamento: Comprometendo as atividades de agricultores, pescadores e comerciantes locais;
- Na base do barramento: aumentando esforços estruturais e quando atingindo os locais de adução de usinas hidrelétricas podendo danificar os rotores de geração elétrica.

2.2.2 Condicionantes hidrológicos e hidrogeológicos.

O ciclo hidrológico é determinante na modificação do relevo e, sendo composto pelas fases de precipitação, infiltração, escoamento superficial e evaporação, possui grande variabilidade de ocorrência de suas fases e intensidades em uma mesma bacia hidrográfica, contudo, em âmbito global tal ciclo é determinado como fechado.

Na precipitação, a água é condensada na atmosfera até o momento que o peso de suas partículas consegue vencer o empuxo do ar, distribuindo-se na crosta terrestre em forma de chuva, da qual, uma parcela é retida nas vegetações e outra atinge a superfície terrestre, infiltrando no solo, escoando superficialmente e evaporando novamente para a atmosfera como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Ciclo hidrológico e seus componentes

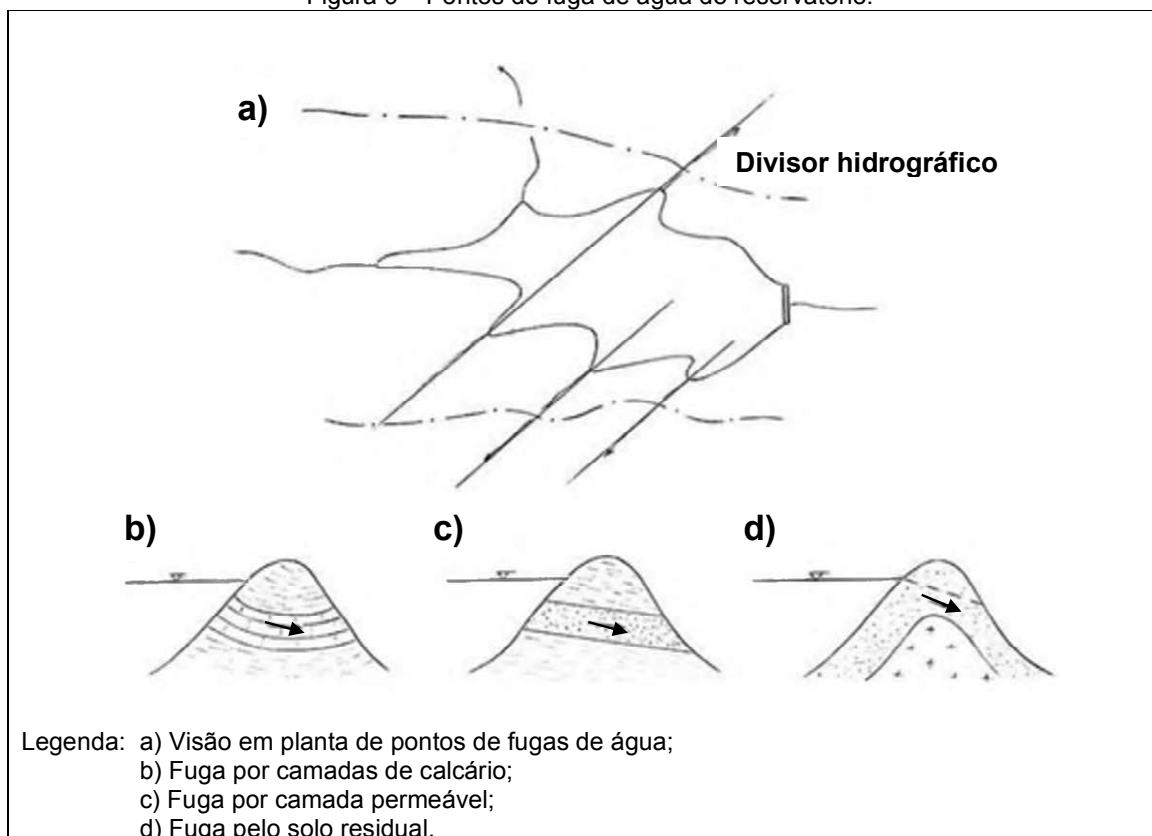


Fonte: CRAMEZ (2019), acessado pela biblioteca web, Universidade Fernando Pessoa.

A água que atinge a superfície terrestre tende a infiltrar-se até o instante em que a velocidade de precipitação ultrapassa a de infiltração e, desta maneira, inicia-se o escoamento superficial. A velocidade de infiltração é determinada pelas características hidrogeológicas do solo e rochas existentes, como porosidade, permeabilidade, conectividade das brechas e fissuras e a posição da linha freática.

As características hidrogeológicas da área de contribuição de reservatórios, como por exemplo os de barragens, são determinantes para a manutenção da água em seu interior e evitar que ocorra fuga por fluxos hidráulicos subterrâneos do reservatório para regiões adjacentes à bacia de drenagem como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Pontos de fuga de água do reservatório.



Fonte: Costa (2012).

Em regiões onde encontram-se elevadas taxas de condutividade hidráulica e extensas profundidades saturadas, têm-se aquíferos que são reservatórios naturais de água e possuem diferentes níveis de importância hidrogeológica como mostra Campos e Freitas (1998) a Região do domínio poroso, formada por solos residuais e aluvionares no Distrito Feral apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos domínios porosos do Distrito Federal.

Domínio	Características			
	P1	P2	P3	P4
Tipo de Aquífero	Intergranulares, contínuos, livres e grande extensão lateral	Intergranulares, contínuos, livres e grande distribuição lateral	Intergranulares, contínuos, livres e grande distribuição ampla	Intergranulares, contínuos, livres e muito restrito lateralmente
Condutividade Hidráulica	Alta $2,8 \times 10^{-6}$ a $1,7 \times 10^{-5}$ (m/s)	Média 1×10^{-8} a $1,7 \times 10^{-7}$ (m/s)	Baixa $2,3 \times 10^{-9}$ a $1,4 \times 10^{-8}$ (m/s)	Muito Baixa
Espessura Média do Saprolito	20 a 25 m	> 20m	< 15m	< 2m
Vazão dos Poços (l/s)	< 800	< 800	< 801	< 802
Importância Hrdrogeologica	Elevada	Mediana	Pequena	Muito Pequena
Solos	Latossolo Vermelho-amarelo (arenoso) e areias quartzosas	Latossolo Vermelho-amarelo argiloso	Latossolo Vermelho-amarelo argiloso e cambisolos	Cambisolos

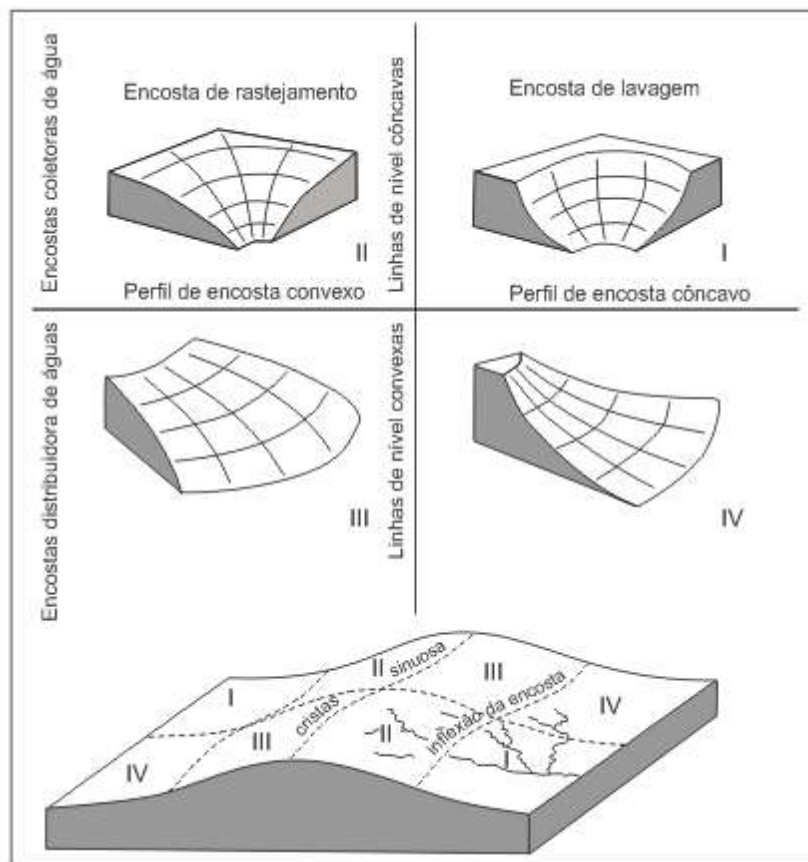
Fonte: Campos e Silva (1998) *apud* Carvalho (2006).

2.2.3 Condicionantes geomorfológicos

As características geográficas, físicas e geológicas são as principais bases de para a modelagem geomorfológica, e devido à interdependência e multidisciplinaridade destas características com outras como cobertura vegetal, clima, escala temporal e modo de utilização, como práticas conservacionistas de curvas de nível, entre outras, tornam-se de grande importância para o entendimento da dinâmica do escoamento superficial das águas pluviais.

Conforme Santos (2013), os modelos de curvatura de relevo podem ser estabelecidos como retilíneos, côncavos e convexos, sendo ainda que, em um mesmo relevo, podem coexistir vertentes com mais de uma forma, como apresentado na Figura 10.

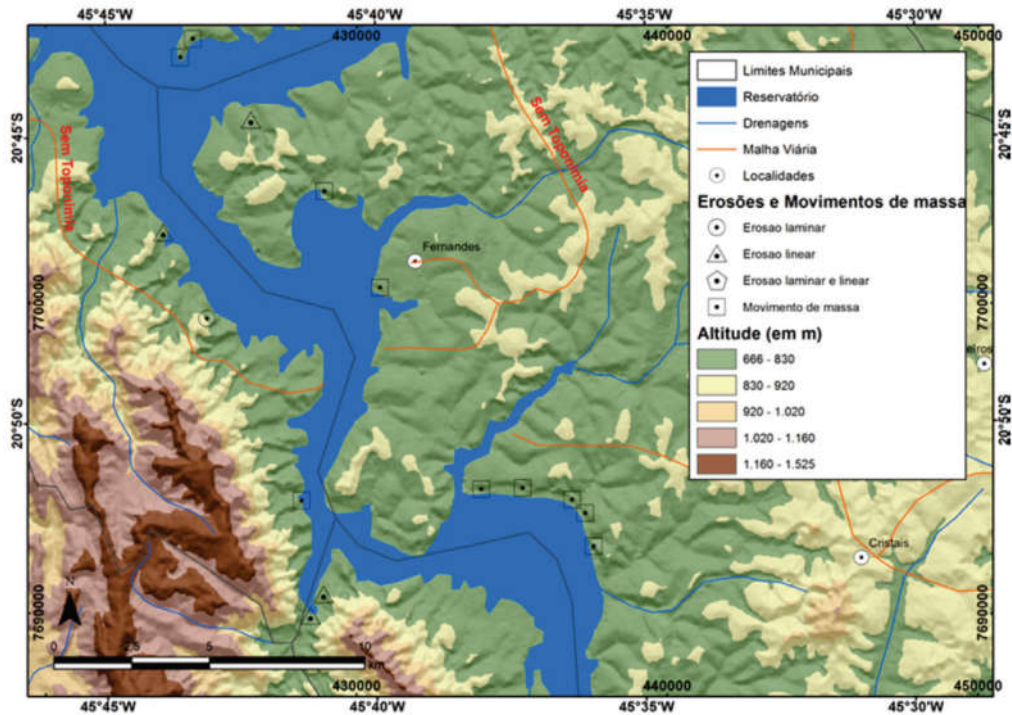
Figura 10 – Classificação de vertentes segundo a forma em perfil de acordo com Troeh.



Fonte: Troeh (1965) *apud* Sampaio (2013).

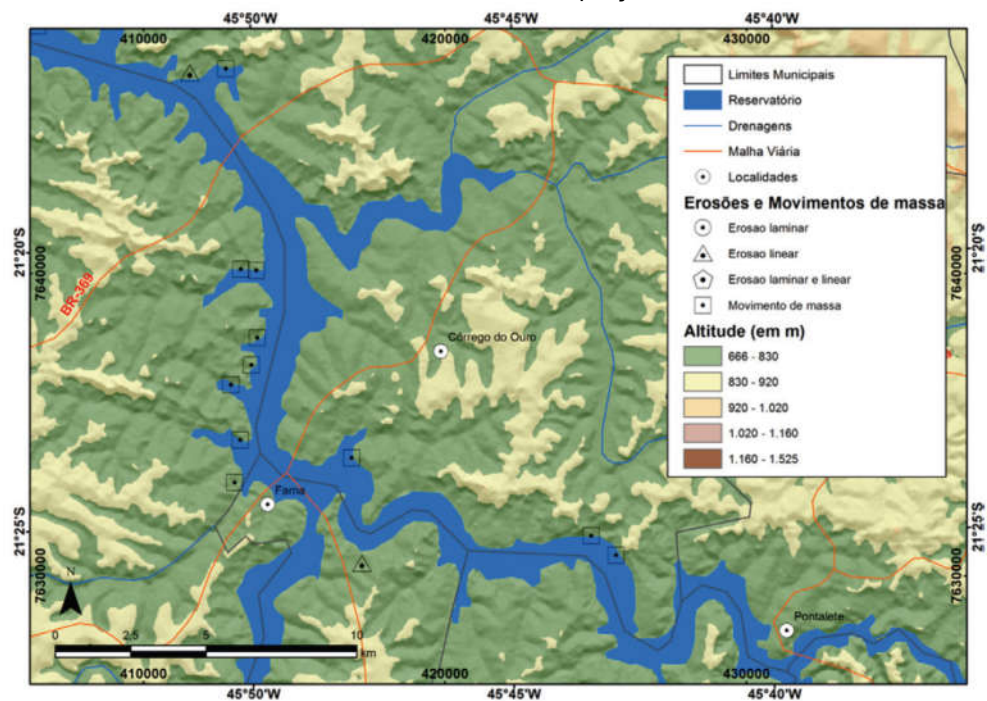
Segundo Carvalho (2017), a dinâmica da geomorfologia da bacia hidrográfica está relacionado aos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, sendo que tais aspectos devem ser considerados tanto nas margens ou bordas, quanto nas áreas de contribuição em escala regional, e que mesmo não possuindo correlação direta com as zonas de desencadeamento de processos erosivos, servem de orientação em escalas maiores como apresentado na Figura 11 e na Figura 12, que demonstram uma tendência do surgimento de deslocamento de massa em formações de relevo convexas.

Figura 11 – Identificação das áreas que apresentam deslocamento de massa e erosões no reservatório da UHE Furnas porção Norte.



Fonte: Carvalho (2017).

Figura 12 – Identificação das áreas que apresentam deslocamento de massa e erosões no reservatório da UHE Furnas porção Sul.



Fonte: Carvalho (2017).

2.2.4 Condicionantes Climáticas

As condicionantes climáticas que alteram, modificam e formam relevos se apresentam de diversas formas na atmosfera, podendo ser elencadas de acordo com Camapum *et al.* (2017), em forma de temperatura, precipitação, umidade, pressão, radiação e outros, além dos processos e mecanismos que nela atuam; influenciando em diversas atividades humanas, no desenvolvimento da flora, na distribuição e ciclo da água, na formação dos solos, na evolução do relevo e, concomitantemente, sendo influenciado pelos mesmos.

Camapum *et al.* (2017), ressalta que na implementação de reservatórios de usinas hidrelétricas deve-se ter maior atenção às configurações do relevo e à influência da cobertura do solo, em relação à inserção de uma nova massa de água do reservatório e da cobertura vegetal em seu entorno.

As variações climáticas ocorrem de modos distintos tanto em escala espacial, quanto temporal, e, buscando compreender as diferentes escalas de atuação, Mendonça e Oliveira (2017) apresentam as principais ordens de grandezas como visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Categorização espacial e temporal climática.

Ordem de Grandeza	Subdivisões	Escala Horizontal	Escala Vertical	Temporalidades	Exemplificação Espacial
				das Variações mais representativas	
Macroclima	Clima zonal Clima regional	>2000 km	3 a 12 km	Algumas semanas a vários decênios	O globo, um hemisfério, oceano, continente, mares, etc.
Mesoclima	Clima regional Clima local Topoclima	2000km a 10 km	12 km a 100 m	Várias horas a alguns dias	Região natural, Montanha, região, metropolitana, cidade, etc.
Microclima		10 km a alguns metros	Abaixo de 100 m	De minutos ao dia	Bosque, uma rua, uma edificação/casa, etc.

Fonte: Adaptado de Mendonça e Oliveira (2017).

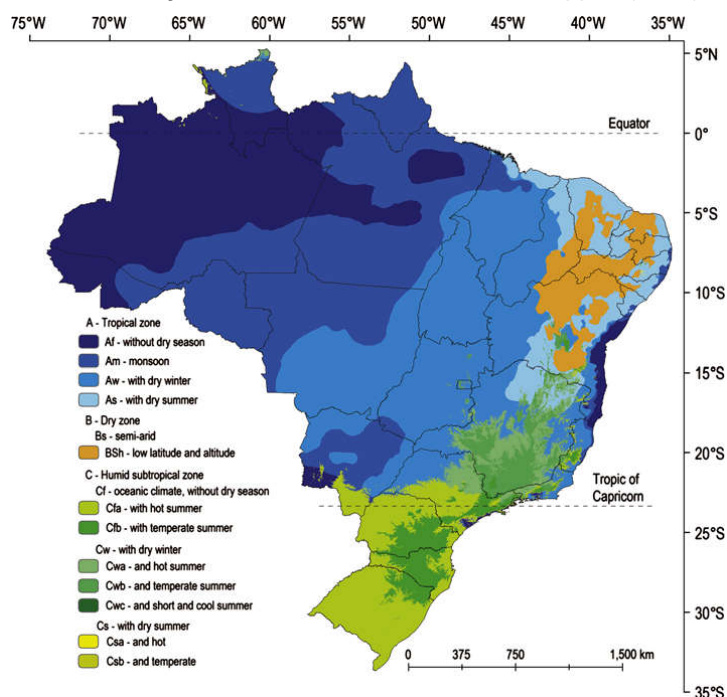
Sanches e Fisch (2005) analisaram o histórico pluviométrico do período de preenchimento dos anos de 1972 a 1983, e de pós enchimento dos anos de 1984 a 1996 da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, em diferentes estações dos municípios de Tucuruí e Marabá, constatando que, embora grande o volume e a área de espelho da água formada com a construção da hidrelétrica, não evidenciou-se significativas mudanças nos regimes de chuvas, sendo notado apenas uma leve diminuição do índice pluviométrico do mês mais chuvoso e um pequeno acréscimo nos seus posteriores, justificando-se pelo aumento da taxa de evaporação do reservatório, porém, enfatizam a importância de estudos com séries históricas pluviométricas com períodos maiores dos que os analisados por eles.

Conforme Camapum *et al.* (2017), dentre os fatores que regem a dinâmica geológica externa, têm-se que a análise do clima permite o entendimento dos processos que influenciam na formação e também do comportamento hidromecânico e na formação dos solos, influenciando os processos de intemperismo, a partir da variação da temperatura, da umidade e, concomitantemente, das propriedades físico químicas e mineralógicas.

Segundo Guerra (2012), na natureza, quatro importantes processos conduzem ao intemperismo físico, como a **fragmentação de rocha: frost wedging** (expansão resultante do congelamento de água intersticial e de fendas), **expansão térmica**, **expansão resultante de alívio de carga e atividade biológica**, e o **intemperismo químico**, o qual é ordenado por processos complexos que alteram as estruturas internas dos minerais pela remoção e/ou adição de elementos podendo modificar a sua mineralogia natural.

De acordo com Alvares *et al.* (2014) é possível classificar regiões por suas condições climáticas onde as médias atmosféricas são semelhantes. Tais condições climáticas no Brasil podem ser divididas, conforme a classificação de Köppen (1936) em três principais grupos, como, Tropical, Tropical Úmida e Zonas Secas, sendo respectivamente como retratado na Figura 13.

Figura 13 – Classificação climática com os critérios de Koppen (1936) do Brasil.



Fonte: Alvares *et al.* (2014)

2.2.5 Projeto hidrelétrico e sua vida útil

Conforme CEPEL (2016), na implantação de projetos de aproveitamento hidrológico de grande porte, como no caso de Usinas Hidrelétricas, são indispensáveis determinadas etapas de estudos e projetos para a obtenção de específicas licenças, para a conformidade com os órgãos ambientais responsáveis e a legislação brasileira, sendo elas as Licenças Prévia, de Instalação e de Operação conforme a Figura 14.

Figura 14 – Processo de Implantação de usinas hidrelétricas



Fonte: CEPEL, adaptado (2016)

Normalmente o Ministério de Minas e Energia designa uma empresa pública ou privada para realizar os estudos do Potencial Hidrológico de regiões consideradas de grande destaque, e para o caso em particular do aproveitamento para geração de energia, desenvolvendo-se também o Inventário do Potencial Hidroelétrico da Bacia Hidrográfica selecionada. Na identificação de regiões de elevado potencial hidroelétrico, realiza-se adiante o Estudo de Viabilidade e o Estudo de Impacto Ambiental – EIA do possível projeto de aproveitamento hidrelétrico.

Em paralelo aos estudos do EIA, ocorrem também audiências públicas com a população possivelmente afetada pelo empreendimento, apresentando e discutindo-se todas as principais condicionantes positivas e negativas, precedendo-se com a solicitação da obtenção da Licença Prévia aos órgãos ambientais responsáveis e posteriormente às demais licenças.

As análises do EIA devem ser desenvolvidas na etapa de Licenciamento Prévio, de modo a indicar o dano socioambiental que o empreendimento pode promover e em conjunto com o RIMA, serem a ferramenta de segurança da população sobre os danos que estarão dispostas a aceitar, contudo, estudos como o de ISHIHARA (2015) demonstram que a má delimitação da área de influência do empreendimento hidrelétrico, pode acarretar em avaliações incoerentes.

Atrelado a preocupações ambientais e outras de cunho econômico a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL desenvolveu um guia para a determinação da vida útil dos reservatórios e adverte que o assoreamento é um risco que deve ser considerado nos projetos hidrelétricos, ressaltando ainda que reservatórios pequenos podem sofrer maiores riscos do que os de grande porte, e ser indispensável tais estudos independentemente de seu tamanho.

ANEEL (2010) cita que em reservatórios de grande porte como o caso de Itaipu, Itá, Sobradinho e Tucuruí a vida útil desses empreendimentos podem ultrapassar os 1000 anos, entretanto, os depósitos das regiões do Delta e do Remanso já poderão estar prejudicando atividades de navegação antes desta data.

A avaliação e monitoramento do fenômeno sedimentométrico é complexo, pois deriva de toda a calha de drenagem e conforme ANEEL (2010), além da elevada distância, muitas vezes os acessos são dificultosos onerando o monitoramento pela entidade responsável e tornando o controle de erosão de uma bacia hidrográfica viável apenas em uma categoria de plano de governo.

Muitos dos programas de controle de sedimentos são limitados à área de atuação dos proprietários e em sua maioria consistem na proteção das margens dos rios e reservatórios, sendo intensificados os programas de prevenção e utilizando medidas corretivas nos casos onde não lhe cabem outra solução (ANEEL, 2010) e podem ser classificadas conforme as Tabela 4 e Tabela 5

O processo de assoreamento de um reservatório, em grande parte, é intensificado pelo desenvolvimento de processos erosivos da própria bacia, e mesmo entendendo que a sua prevenção traz grandes benefícios, ocorre que são de difícil aplicação ao barragem, de acordo com ANEEL (2010), contudo, a avaliação da erodibilidade dos solos surge como uma ferramenta que pode auxiliar a implantação de medidas de prevenção mais adequadas para cada região.

Conforme Carvalho *et al.* (2006), o processo erosivo em suas fases iniciais, é predominantemente regido pela erosividade das chuvas e pela susceptibilidade à erosão laminar, notando-se tais características, é possível a identificação de regiões mais propícias ao surgimento de erosões e o melhor direcionamento de suas políticas de prevenção.

Tabela 4 – Medidas preventivas do controle de sedimentos e do assoreamento do reservatório		
SELEÇÃO DO LOCAL DO APROVEITAMENTO	Se mais de um local for disponível para a barragem e formação do reservatório, selecionar aquele que tiver menor aporte de sedimentos	A escolha do local vai depender dos custos financeiros que incluem a proteção da área mais desprotegida
NO PROJETO DO RESERVATÓRIO	Prever volume morto adequado	Aumento da altura da barragem
	Prever volume reservado para sedimento	Aumento da altura da barragem
	Prever descarregador de sedimento com comportas (para correntes de densidade e para sedimento do leito)	Usinas afastadas da barragem necessitam de desarenador após a tomada d'água
CONTROLE DE EROSÃO NA BACIA (Traz benefícios diversos, sendo o mais eficiente mas de difícil aplicação pelo barrageiro; necessário pedir apoio de outras entidades para o gerenciamento de bacia)	Conservação e manejo do solo na agricultura (Bertoni e Lombardi Neto, 1990)	Práticas vegetativas: - Florestamento e reflorestamento - Pastagens - Plantas de cobertura - Culturas em faixas - Cordões de vegetação
	Controle de sedimento em estradas, em cidades, em obras diversas, controle de erosão urbana e rural:	Práticas edáficas: - Controle do fogo - Adubação verde - Adubação química - Adubação orgânica Práticas mecânicas: - Distribuição racional dos caminhos - Plantio em contorno - Terraceamento - Sulcos e camalhões - Canais escoadouros - Contenção ou proteção de taludes
		- Obras de drenagem - Controle de erosão em ravinas e voçorocas
CONTROLE DE EROSÃO NOS CURSOS D'ÁGUA E MARGENS DE RESERVATÓRIOS	Erosão nas calhas Desbarrancamentos	- Proteção com vegetação ciliar - Proteção estrutural (enrocamento, espigões etc.)
CONTROLE DA AFLUÊNCIA DE SEDIMENTO JÁ NA CALHA	Barragens a montante (pode ser submersa, se for conveniente)	Retirar periodicamente o sedimento retido
	Rede de vegetação	
	Canais de derivação em <i>by-pass</i>	- Canal - Conduto
	Desvio de enchentes para área de inundação	Bacias de decantação
CONTROLE DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS	Descarregador com comporta (operação planejada)	- Correntes de densidade - Sedimento de fundo
	Depleção do reservatório	Uma grande depleção do reservatório provoca o escorregamento dos depósitos para o volume morto
	Operação planejada do reservatório	Existem programas de computador para essa operação visando acomodação do sedimento

Fonte: ANEEL (2010).

Tabela 5 – Medidas corretivas do controle de sedimento e do assoreamento do reservatório

REMOÇÃO DO SEDIMENTO DO RESERVATÓRIO	Dragagem (local de deposição é importante)	Eventual
		Quase permanente
	Obras de derivação <i>by-pass</i>	Canal
		Conduto
	Sinfonagem	Por cima da barragem ou às vezes retirando sedimento de mais distante através do descarregador de fundo
	Descarregador de fundo	Às vezes sendo necessário construir já com barragem pronta
ALTEAMENTO DA BARRAGEM	Dimensionar adequadamente	Quando possível porque aumentará o nível e o espelho d'água

Fonte: ANEEL (2010).

2.3 TENSÃO CISALHANTE HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA DOS SOLOS

O Tensão Cisalhante Hidráulica da lâmina d'água ao escorrer sobre a superfície do solo é a principal responsável pela erosão superficial e nos casos onde a superfície é ampla e inclinada de maneira uniforme pode ser expresso conforme a Equação 1.

$$T_{ch} = \gamma_w h_w \text{sen} \beta \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

T_{ch} = Tensão Cisalhante Hidráulica (Pa)

γ_w = Peso específico da água (N/m³);

h_w = altura perpendicular da lâmina de água a partir do talude (m);

β = o ângulo de inclinação do Talude.

Segundo Fragassi (2001) a Equação 1 pode ser preenchida em termos de Run-off C , intensidade de precipitação I (mm/min.), velocidade da água u (m/min.) e da distância L da crista do talude. Contudo, cabe-se sempre analisar o instante e as condições que são adotados.

A tensão de cisalhamento resistente do solo a erosão pode também ser expressa em termos da resistência ao cisalhamento dada pela lei de Mohr-Coulomb conforme a Equação 2

$$T_c = c + \sigma \cdot \text{Tg}\phi \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

T_c = Resistência ao cisalhamento (Pa)

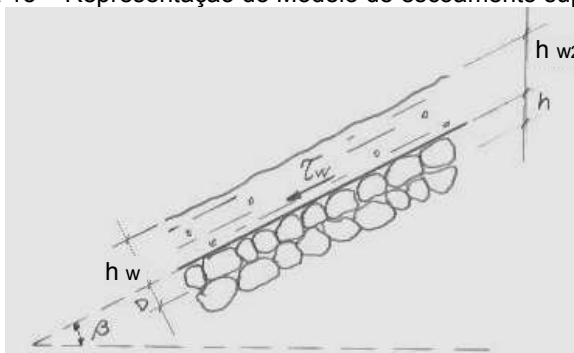
c = coesão (Pa)

ϕ = ângulo de atrito interno (graus)

σ = tensão normal no plano de ruptura. (Pa)

Além do exposto, pode-se estabelecer em termos da condição de equilíbrio de um corpo rígido que a Tensão normal do solo pode ser expressa conforme Fragassi (2001) observada na Figura 15 e determinada com a Equação 3

Figura 15 – Representação do Modelo de escoamento superficial



Fonte: Adaptado, Fragassi (2001).

$$\sigma = \gamma' \cdot D \cdot \cos \beta \quad \text{Equação 3}$$

Onde: γ' = Peso específico do material submerso (N/m^3);

D = Diâmetro dos grãos (m);

β = inclinação do talude (graus).

Realizando a substituição da Equação 3 na Equação 2 obtém-se a tensão de cisalhamento em função do diâmetro das partículas conforme a Equação 4

$$T_{c2} = c + \gamma' \cdot D \cdot \cos \beta \cdot \text{tg} \phi. \quad \text{Equação 4}$$

Sabe-se que as condições as quais o solo é solicitado sua resistência de atrito são muito diferentes das que são determinados os valores do Ângulo de Atrito

– ϕ e do Peso $\gamma'.D$, e que acordo com Fragassi (2001) bastando apenas o fluxo mudar do regime de escoamento laminar para turbulento, para que o solo sofra adições de efeitos de vibrações em seus grãos, o que torna a sua análise complexa.

Segundo Nascimento e Castro (1974) *apud*. Fragassi (2001) para reduzir tais condições especiais pode-se empregar um coeficiente b . cujo valor varia de 0 à 1 e emprega-se conforme a Equação 5.

$$T_{c3} = c + b. \gamma'. D \cos \beta. Tg\phi \quad \text{Equação 5}$$

Além do exposto ressaltar-se que o nível saturação do solo influenciará na contribuição da sucção matricial, reduzirá a tensão normal atuante e devendo desta maneira ser considerado, contudo, após o início do escoamento o solo tenderá a tornar-se completamente saturado e sendo este tempo uma função das características de infiltrabilidade e de sua umidade inicial, torna-se prudente avaliar a permeabilidade aguardada para o solo.

2.4 PREVISÃO DA PERDA DE SOLO POR EROÇÃO EM GRANDES ÁREAS

A avaliação da perda de solo foi estudada por diversos autores, das mais distintas áreas ao longo dos tempos, desenvolvendo-se métodos para a sua quantificação baseados em fundamentos empíricos. Após estudos de pequenas áreas experimentais e conforme Stephan (2010), entre estes modelos, pode-se citar o da Equação Universal de Perda de Solo – EUPS/USLE criado em 1976, revisado e novamente publicado em 1991 como a Equação Universal de Perda de Solo Revisada – EUPSR e o Projeto de Predição de Erosão Hídrica – PPEH/WWP criado em 1980 como propulsores do estudo da perda de solo.

De acordo com Bastos (1999), a EUPS foi desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1960, e publicada oficialmente em 1978, sendo estes, dois cientistas do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), e, conforme e Stephan (2010), empregada inicialmente em ambiente nacional no estado de São Paulo em trabalhos desenvolvidos por Bertoni *et al.* (1975).

Mesmo com restrições ao seu uso e do estabelecimento de outros modelos de previsão, a EUPS vem sendo cada vez mais utilizada, e conforme Stephan

(2010), a confiabilidade dos dados empregados em seus processos na determinação dos fatores de sua equação é indispensável para uma aplicação correta.

A Equação Universal de Perda de Solo é definida pela Equação 6.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A = perda de solo média anual, em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;

R = fator erosividade da chuva, em $(\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1})$;

K = fator erodibilidade do solo em $t \text{ h} / (\text{MJ mm})$;

LS = fator topográfico, que resulta da combinação dos fatores de comprimento de encosta (L) e declive (S) (adimensional);

C = fator uso e manejo (adimensional); e

P = fator práticas conservacionistas (adimensional).

Dentre os parâmetros da Equação 6, podemos destacar que o R, K, L e S são referentes as condições naturais da região e os parâmetros C e P são dependentes das características de uso e ocupação do solo (PRUSKI, 2009).

2.4.1 Erosividade da Chuva (R)

A erosividade pode ser definida como a capacidade que a chuva tem de causar erosão nos solos em uma área desprotegida de vegetação, sendo influenciada por diferentes fatores como o tamanho das partículas, velocidade de queda das gotas, energia cinética, intensidade, duração, frequência, e outros que formam o conjunto que promove a erosão hídrica conforme Pruski (2009).

De acordo com Stephan (2010), uma das primeiras propostas para a determinação da energia cinética de uma chuva (EC) foi proposta em 1958 por Wischmeier e Smith, em seguida modificada em 1981 por Forter e outros pesquisadores, sendo expressa em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e podendo ser determinada pelas Equação 7 e Equação 8.

$$EC_1 = 0,119 + 0,0873 \log i, \text{ para } i < 76 \text{ mm/h} \quad \text{Equação 7}$$

Ou

$$EC_2 = 0,283, \text{ para } i \geq 76 \text{ mm/h} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo: i: A intensidade da chuva ($\text{mm} \times \text{h}^{-1}$).

Com o passar do tempo os mesmo autores propuseram o índice EI_{30} , para melhor representar a erosividade das chuvas em escala mensal, conforme a Equação 9.

$$EI = EC \times i_{30}$$

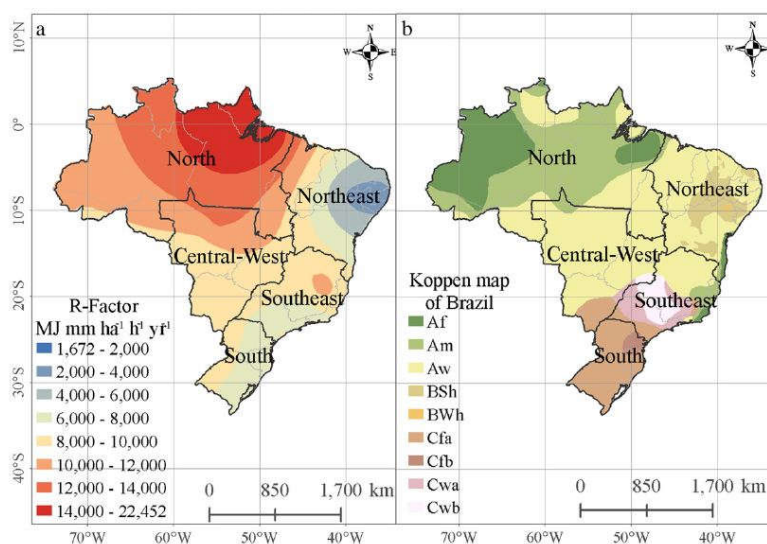
Equação 9

Sendo:

 EI_{30} = índice de erosão ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$); i_{30} = intensidade máxima em 30 minutos ($mm \text{ h}^{-1}$).

Posteriormente ao desenvolvimento do EI_{30} diversos pesquisadores analisaram as características pluviométricas e climáticas nacionais, e, Oliveira *et al.* (2012) sintetizando tais estudos, desenvolveram o mapa de isolinhas do Fator R e da classificação de Koppen conforme a Figura 16.

Figura 16 – Mapa do Fator R e classificação climática de Koppen.



Legenda:

a) Distribuição do Fator R no Brasil

b) Classificação climática de Koppen no Brasil

Fonte Oliveira *et al.* (2012)

2.4.2 Erodibilidade do Solo (K)

A erodibilidade do solo expressa pelo fator K representa a susceptibilidade dos solos a serem erodidos quando submetidos à ação mecânica da chuva e pode ser definido como a quantidade de material que é removido por unidade de área, em função da água da chuva que por ele passa.

As propriedades do solo que ditam a sua erodibilidade são aquelas que influenciam o nível de escoamento, como a saturação inicial, a permeabilidade, a capacidade de armazenamento e outras, como as que resistem às forças de dispersão, salpico, abração e transporte pelo escoamento.

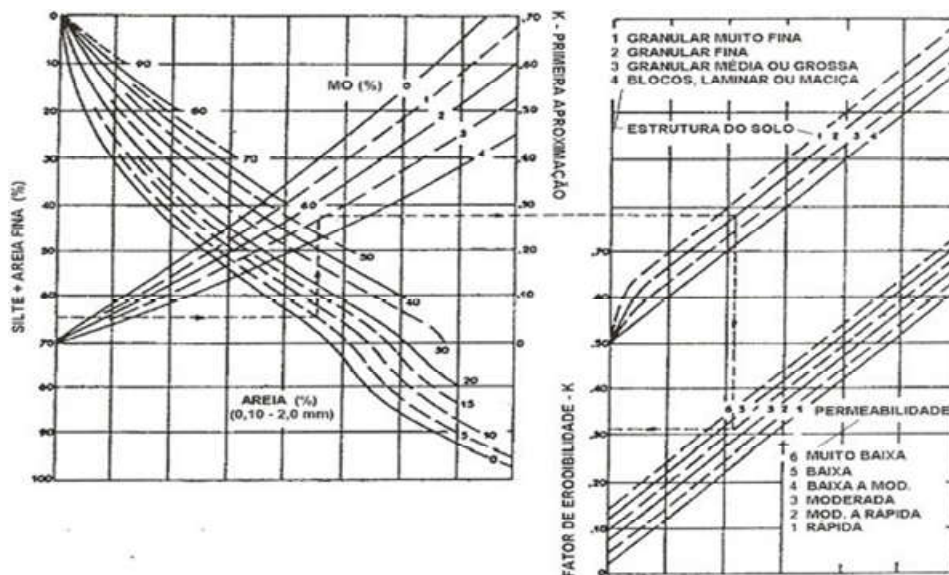
Conforme Stephan (2010), a determinação da erodibilidade do solo é normalmente realizada no campo, sendo determinada experimentalmente em parcelas unitárias com aplicação do EI_{30} . Pruski (2009) argumenta que tais parcelas são preparadas com uma aração e duas gradagens morro abaixo, com inclinação constante e de modo que os fatores LS sejam respectivamente de 22,10 m de comprimento e 9% de inclinação.

O primeiro método para estimativa da erodibilidade dos solos foi o K_{EUPS} , para ser empregado na EUPS, desenvolvido por Wischmeier *et al.* em 1971, consistindo em uma representação gráfica em espécie de nomograma, no qual emprega os dados das propriedades físicas dos solos, como porcentagem de areia de 2 a 0,1mm, areia muito fina e silte, estrutura e classe de permeabilidade e a quantidade de matéria orgânica como mostram as Figura 17 e Figura 18.

De acordo com Stephan (2010) estima-se no meio técnico que solos com $K_{EUPS} > 0,20$ sejam potencialmente erodíveis.

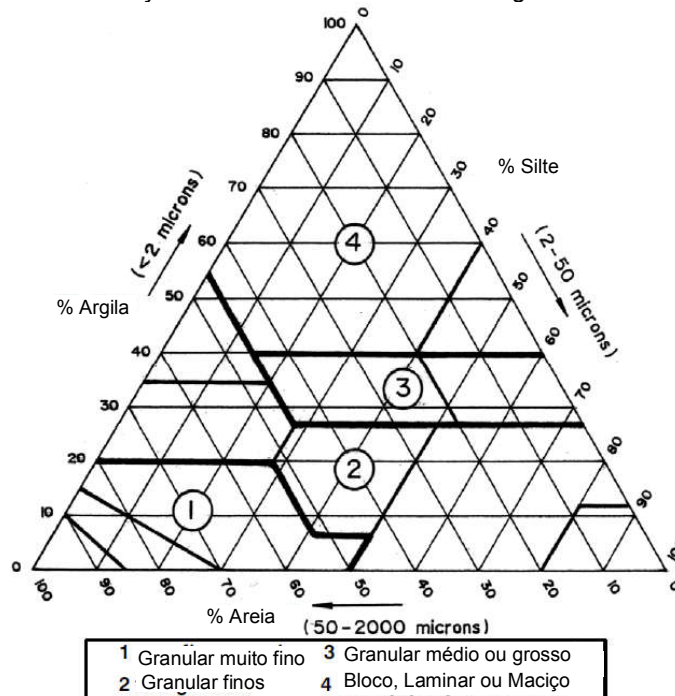
Bertoni e Neto (1990) após analisar a erodibilidade de solos do estado de São Paulo, alertam que pode ocorrer uma significativa variação deste parâmetro de acordo com o tipo e profundidade do solo, conforme apresentado na Tabela 6 e Bertoni e Neto (2012) estabeleceram também que algumas estimativas do fator k podem ser feitas para os Latossolos, Argissolos, Nitrossolos, Neossolos e Gleissolos conforme a Tabela 7.

Figura 17 – Nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para estimativa do fator KEUPS. Para converter os valores de K do nomograma do Sistema Inglês para o sistema Internacional de Unidade, basta dividir o valor de K deste nomograma por 7,59 conforme Pruski (2009).



Fonte: Pruski (2009).

Figura 18 – Índice da classificação da estrutura do solo do Nanograma de Wischmeier *et al.* (1971)



Fonte: Adaptado, Giordano *et al.*(2004)

Tabela 6 – Valores de K para solos de dois agrupamentos do estado de São Paulo.

Grupo de Solo	Fator K de erodibilidade em t.h/MJ.mm	
	Superficial	Subsuperficial
COM B TEXTURAL		
Podzolizados com cascalho	0,055	0,027
Podzolizados Lins e Marília, variação Marília	0,049	0,023
Podzólico Vermelho-Amarelo, variação Laras	0,043	0,046
Podzolizados Lins e Marília, variação Lins	0,035	0,023
Podzólico Vermelho-Amarelo, orto	0,034	0,018
Podzólico Vermelho-Amarelo, variação Piracicaba	0,028	0,019
Mediterrâneo Vermelho-Amarelo	0,023	0,021
Terra Roxa estrutural	0,018	0,011
COM B LATOSSÓLICO		
Latossolo Vermelho-Amarelo, orto	0,022	0,009
Latossolo Vermelho-Escuro, fase arenosa	0,017	0,012
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase rasa	0,017	0,022
Latossolo Vermelho-Escuro, orto	0,015	0,005
Solos de Campos do Jordão	0,015	0,013
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa	0,013	0,007
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase terraço	0,012	0,003
Latossolo Roxo	0,012	0,004
Latossolo Vermelho-Amarelo húmico	0,011	0,004

Fonte: Bertoni e Neto (1990)

Tabela 7 – Valores de erodibilidade de solos para distintos solos

Classes de Solos	Fator K
Latossolos Vermelhos – LV	0,017
Latossolos Vermelhos-Amarelos - LVA	0,013
Argissolos Vermelhos-Amarelos - PVA	0,034
Nitossolos- NV	0,018
Neossolos Quartzarênicos - RQ	0,022
Neossolos Litólicos – RL	0,050
Gleissolos –G	0,011

Fonte: Bertoni e Neto (2012).

Guerra *et al.* (2012), ressaltam que avaliando os trabalhos com parcelas, pesquisadores como Hashot (1995) expõem que o surgimento de ravinas tende a surgir a uma distância de 2 a 6 metros de seu topo, quando o ocorrer fluxo de água exceder velocidades de escoamento superiores de 3,2 cm/s e 3,4 cm/s como observado em estações experimentais de Rawus (1987) e confirmados por Govers (1987) com 3,0 cm/s e 3,5 cm/s.

Guerra *et al.* (2012) citam também que a cor do horizonte pode servir de indicador para a determinação de solos mais suscetíveis a erosão ao passo que solos com horizontes mais claros tendem a possuir menores volumes de matéria

orgânica e conseqüentemente vegetações esparsas e de menor porte. Arelado à coloração do solo, mas não dependente, ocorre também a contribuição dos compostos químicos agregando resistência, porém, quando presentes na água que percorre sobre o solo atuando como agente desestabilizador, constatando-se que para avaliações destes compostos, executa-se prospecções com amostragem em forma de malha, extrações a cada 0,10 m e em profundidades de no máximo 0,5 m.

Solos com característica latossólicas são quimicamente pobres em bases (K, Ca, Mg, e outras) e ricos em sesquióxidos de ferro e alumínio gerando normalmente microagregações, aumentando a porosidade entre as partículas. Contudo, quando rico em bases, tendem a gerar estruturas poliédricas, prismáticas em blocos, com pequena porosidade entre as partículas e menor permeabilidade (GUERRA *et al.*, 2012)

Segundo Pruski (2009), analisando em termos de aplicação da Equação Universal de Perda de Solos observa que a erodibilidade denominada Fator K, constitui o fator de maior custo e morosidade para o Brasil, tendo em vista a grande extensão territorial e diversidade da edáfica existente.

Bastos (1999) expressa que existem duas maneiras de determinar-se a erodibilidade de solos, e, posteriormente, a previsão do material erodido, sendo elas **diretas**, com campos experimentais, ou análises com amostras indeformadas em laboratório, e **indiretas**, com aplicação de equações com correlações em características físicas dos solos, como granulometria, química, consistência e outras.

Ao termino da apresentação dos parâmetros da Equação Universal da Perda de Solos será detalhado a determinação da erodibilidade do solos com metodologias geotécnicas complementares.

2.4.3 Fator Comprimento (L) E Declividade da Encosta (S)

O nível de degradação que a água pode causar no solo através de seu escoamento depende do comprimento de sua encosta e de sua declividade expressos pelos fatores L e S na USLE.

Tais fatores são independentes, contudo, a sua determinação dá-se em conjunto, resultando no fator topográfico LS, o qual é o produto da Equação 10 proposta originalmente por Wischmeier e Smith em 1978 no Agriculture Handbook 537.

$$LS_1 = (L/22,13)^m (65,41.\text{sen}^2 q + 4,56.\text{sen} q + 0,065) \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

L = comprimento de encosta (m);

q = ângulo de declividade da encosta (graus);

m = fator de ajuste, que varia em razão da declividade da encosta: 0,2, para declive menor que 1%; 0,3 para declividade entre 1 e 3%; 0,4 para declividade entre 3,5 e 4,5%; e 0,5 para declividade maior que 5%.

Posteriormente à publicação da primeira proposição do fator FS, vários outros pesquisadores também buscaram propor correções e novas formulações, como Bertoni e Neto (1990), que após trabalharem durante aproximadamente 10 anos nas condições do estado de São Paulo propuseram a Equação 11.

$$LS = 0,00984 C^{0.63} D^{1.18} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:

C= comprimento de rampa (m);

D= declividade da encosta (%).

2.4.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C)

O fator de uso e manejo do solo é obtido em parcelas experimentais preparadas para o plantio, cultivadas, colhidas, expostos seus resíduos e paralelamente avaliada a erodibilidade do solo em todos seus estágios.

Conforme Pruski (2009), dada a complexidade das técnicas de manejo e dos tipos de culturas para os distintos tipos de solos, evidencia-se uma pouca quantidade de estudos deste fator no âmbito nacional, contudo, algumas culturas já podem ser classificadas conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Valores do fator C para diferentes condições de uso e manejo do solo.

Uso e Manejo do Solo	C
Algodão morro abaixo (AMA)	0,69
Algodão em nível (AEN)	0,69
Milho em nível (MEN)	0,34
Cana-de-açúcar em sulco e em nível (CEN)	0,15
Cultivo do milho com os seguintes manejos	
Preparo convencional (aração e duas gradagens niveladoras)	0,34
Preparo reduzido 1 (duas gradagens niveladoras)	0,34
Preparo reduzido 2 (escarificador de cinco dentes e duas gradagens)	0,34
Preparo reduzido 3 (escarificador de três dentes e duas gradagens)	0,34
Preparo com grade pesada (grade pesada e duas gradagens niveladoras)	0,34
Plantio de soja e trigo cultivados em sucessão com os seguintes manejos de solo:	
Cultivo convencional	0,54
Gradagem pesada + niveladora	0,54
Plantio direto	0,20
Sucessão de culturas de trigo em cultivo convencional e de soja em cultivo mínimo	0,25
Cultivo da soja e preparo convencional do solo	0,54
Cultivo da soja em sistema de plantio direto	0,25
Pousio invernal e milho de verão	0,25

Fonte: Pruski (2009) adaptado de (Bertoni e Neto, 1990. Ferreira,1993; Renard *et al.* 1997; Amorin, 2003).

2.4.5 Práticas Conservacionistas (P)

O fator P é a relação entre a intensidade esperada de perdas de solo com a implementação de determinada prática conservacionista como plantio em nível, terraceamento, plantio em faixas na erosão do solo e outras, expressando a relação entre a perda do solo com a implementação de tal prática e a correspondente perda quando a cultura está implantada no sentido do declive e conforme Pruski (2009) podem ser classificadas de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Práticas conservacionistas e seus valores de fator P

Prática Conservacionista	P
Plantio morro abaixo	1.0
Plantio em contorno	0.5
Alternância de capinas com plantio em contorno	0.4
Cordões de vegetação permanente	0.2

Fonte: Pruski (2009), citado por Bertoni e Neto (1990).

2.5 ERODIBILIDADE DOS SOLOS

O comportamento de um solo é regido por diversas características como composição química, arranjo físico da partículas, estado de conformação, sua composição granulométrica, e o papel de cada fração granulométrica dentre outras características mais.

Segundo Bastos (1999), a erodibilidade dos solos é uma propriedade que vem sendo estudada em diferentes campos da ciência e que algumas metodologias já conseguiram ser desenvolvidas, contudo, Bertoni e Neto (2012) relatam que o estudo desta característica ainda é relativamente novo.

Conforme Stephan (2010), uma maneira comum de se avaliar de modo indireto a erodibilidade de um solo é correlacionando-a com propriedades geotécnicas fáceis de serem determinadas, como a granulométrica, os índices físicos, o coeficiente de permeabilidade, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e outros mais, além dos ensaios de caracterização química e mineralógica do solo e ensaios para composição química da água.

A avaliação de maneira indireta pode trazer benefícios se for respaldada em estudos anteriores que validem a aplicação de tais técnicas para os determinados solos, entretanto, na inexistência destas verificações, é prudente que sejam empregadas de maneira preliminar para estudos prévios.

A determinação da erodibilidade de solos de maneira direta pode ser realizada tanto em campo como em laboratório, sendo o mais comum no âmbito geotécnico, o emprego de técnicas em laboratório como o ensaio de Inderbitzen, objetivo principal deste trabalho, Slaking Test, Pinhole Test, Cilindros Rotatórios, Método de Nogami e Villibor, Dispersão, Infiltrabilidade e outros mais.

2.5.1 DETERMINAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS.

A determinação da erodibilidade dos solos pode ser realizada de diversas maneiras indiretamente, que promovem dados quantitativos ou orientações qualitativas e são tidas como práticas e de rápida aplicação, contudo, para estudos mais profundos recomendam-se validações com técnicas diretas de investigação.

2.5.1.1 Análise do Fator K de Erodibilidade com Formulações Simi-Empíricas.

De acordo com Araújo *et al.* (2011) e Correchel (2003), ao longo dos tempos, com importantes avanços no estudo da erodibilidade do campo agrônomo e em diversos outros campos, foi possível desenvolver métodos para a determinação da erodibilidade dos solos de modo indireto, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Principais métodos indiretos para determinação da erodibilidade dos solos.

Autores	Utilização de propriedades	Métodos indiretos para a determinação do fator K
Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	Físicas	$K = (\% \text{ areia} + \% \text{ silte}) / ((\% \text{ argila}) \times 100)$, onde o Fator K é dado em $(\text{Mg ha h}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1})$ e % areia, % silte e % argila representaram as porcentagens das respectivas frações granulométricas para o horizonte A.
Lombardi Neto & Bertoni (1975)	Físicas	$K = ((\% \text{ argila dispersa em água}) / (\% \text{ argila total})) / ((\% \text{ argila total}) / (\% \text{ umidade equivalente}))$
Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	Físicas	$K = (\% \text{ silte} + \text{ argila dispersos em água}) / (\% \text{ silte} + \text{ argila totais}) / ((\% \text{ argila total}) / (\% \text{ umidade equivalente}))$
Wischmeier, <i>et al.</i> (1971), modificada por LIMA <i>et al.</i> (1990)	Física - Químicas	$K = 0,00608397 (P27) + 0,00834286 (P39) - 0,00116162 (P52) - 0,00037756 (P19)$, onde P27 é a permeabilidade do perfil do solo, codificada conforme Wischmeier; P39 é o teor de matéria orgânica (teor de carbono orgânico total multiplicado por 1,72) expresso em porcentagem; P52 é o teor de óxido de alumínio extraível por ataque sulfúrico, expresso em porcentagem; P19 é o teor de partículas com diâmetro entre 2,0 e 0,5 mm, expresso em porcentagem.

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2011) e Correchel (2003)

Continuação...

Autores	Utilização de propriedades	Métodos indiretos para a determinação do fator K
Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	Física	$K = \frac{[2,1 (10^{-4}) (12-MO) M^{1,14} + 3,25 (EST-2) + 2,5 (PER-3)]}{100} \cdot 0,1317$ onde: K é o valor estimado para o fator K, em Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹ ; M é a soma dos teores de silte (%) e areia muito fina (%) multiplicada por 100 menos o teor de argila (%), sendo a análise granulométrica feita com uso de NaOH 1 mol L ⁻¹ como dispersante; MO é o teor de matéria orgânica (%); EST e PER são códigos, adimensionais, correspondentes à estrutura e permeabilidade do solo, respectivamente, conforme descrição em Wischmeier <i>et al.</i> (1971). O fator 0,1317 na equação refere-se à conversão da unidade original do fator K para o sistema métrico internacional, de acordo com Foster <i>et al.</i> (1981).
Lima <i>et al.</i> (1990)	Física	$K = \frac{[2,1 (10^{-4}) (12-MO) Ma^{1,14} + 3,25 (EST-2) + 2,5 (PER-3)]}{100} \cdot 0,1317$ onde: Ma é a soma dos teores de silte (%) e areia muito fina (%) multiplicada por 100 menos o teor de argila (%), sendo a análise granulométrica feita somente com água como dispersante. Os demais parâmetros desta equação são os mesmos descritos para equação original, ou seja, a própria equação
Denardin (1990) método 1	Física - Químicas	$K = 0,006084 (PER) + 0,00834286 (MO) - 0,00116162 (AL) - 0,00037756$ onde: AL é o teor de Al ₂ O ₃ da fração TFSA extraído pelo ataque sulfúrico, expresso em (%); PART é o teor de partículas com diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm (%), usando-se NaOH mol L ⁻¹ como dispersante na análise granulométrica.
Denardin (1990) método 2	Física	$K = 0,00000748(M) + 0,00448059(PER) - 0,06311750(DMP) + 0,010396(REL)$ onde: DMP = diâmetro médio ponderado das partícula menores que 2 mm (mm); REL = produto do teor de matéria orgânica (%) pela quantidade de partículas de diâmetro entre 0,1 e 2 mm (%). Em todos os casos a análise granulométrica foi feita usando-se NaOH 1 mol L ⁻¹ .
Roloff & Denardir (1994) método 1	Física	$K = 0,0049 PER + 0,0331 Mm^{0,5}$ onde: Mm é teor de silte (g g ⁻¹) multiplicado p ela soma de silte e areia fina (g g ⁻¹), sendo a análise granulométrica feita com NaOH 1 mol L ⁻¹
Roloff & Denardir (1994) método 2	Física - Químicas	$K = 0,1038 Mn^{0,5} - 0,0454 Al$ onde: Al é o teor de Al ₂ O ₃ extraído pelo ataque sulfúrico, expresso em (g g ⁻¹).
Roloff & Denardir (1994) método :	Física - Químicas	$K = 0,0917 Mn^{0,5} - 0,0526 Fe + 0,0176 af$ onde, Fe é o teor de Fe ₂ O ₃ da fração TFSA extraído pelo ataque sulfúrico (g g ⁻¹), e af o de areia fina (g g ⁻¹) usando NaOH 1 mol L ⁻¹ como dispersante na análise granulométrica.
Roloff & Denardir (1994) método ·	Física - Químicas	$K = 0,0437 Mn^{0,5} + 0,0350 Fe - 0,0111 (Al/arg)$ onde arg é o teor de argila (g g ⁻¹) usando NaOH 1 mol L ⁻¹ como dispersante na análise granulométrica.

Fonte: Adaptado Araújo *et al.* (2011) e Correchel (2003)

Bastos (1999), após avaliar diversos parâmetros de solos da região metropolitana de Porto Alegre – RS como Coesão, Ângulo de Atrito, Sucção, Limites de Consistência, erodibilidade com Inderbitzen e outros mais, definiu, com base na hipótese que a erodibilidade de um solo, quando inicia-se o escoamento pluvial, é função das tensões cisalhantes de sua superfície, podendo ser classificada conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Critério de Erodibilidade do solo de BASTOS (1999).

Classificação	Critério de Erodibilidade g.cm ⁻² .min. / Pa
Solos de alta erodibilidade	$K > 0,1$
Solos de mediana erodibilidade	$0,1 \geq K \geq 0,001$
Solos de Baixa erodibilidade	$K < 0,001$

Fonte: Bastos (1999)

Manningel *et al.* (2002) com o intuito de melhor avaliar a variação da erodibilidade dos solos estabeleceu a classificação da erodibilidade com cinco níveis conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Classes de erodibilidade do solo

Classificação	Critério de Erodibilidade g.cm ⁻² .min. / Pa
Extremamente alto	$>0,100$
Muito alto	0,075 a 0,100
Alto	0,050 a 0,075
Médio	0,025 a 0,050
Baixo	0,015 a 0,025
Muito baixo	$<0,015$

Fonte: adaptado Manningel *et al.* (2002)

2.5.1.2 Avaliações Geotecnicas de Erodibilidade

De acordo com Stephan (2010), existem diferentes maneiras de se avaliar a erodibilidade de um solo de maneira indireta, como, empregando estudos

fundamentadas em propriedades geotécnicas granulométricas, de limites de consistências, e outras como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Metodologias para avaliação indireta da erodibilidade de solos.

AUTORES	CONDIÇÃO	CARACTERÍSTICA
Pesquisas fundamentadas em propriedades de plasticidade dos solos		
Meireles (1967)	LL ≤ 21% e IP ≤ 8%	Solos fortemente erodíveis
Santos e Castro (1967)	LL < 50% e IP 20%	Solos altamente erodíveis
DNER (1979)	LP ≤ 32% e IP ≤ 7%	Solos com comportamento bom à regular quanto à resistência a erosão
Bastos (1999)	IP < 10%	Solos potencialmente erodíveis
Pesquisas fundamentadas em propriedades granulométricas dos solos		
	% de passante #200 ≤ 20%	Solos fortemente erodíveis
Meireles (1967)	20% < % de passante #200 < 40%	Solos passíveis de forte erosão
	% de passante #200 > 40%	Solos Pouco erodíveis
Bastos (1999)	% de passante #200 < 55%	Solos Potencialmente erodíveis
Eltz et al. (2001)	%argila < 35%	Solos erodíveis
Fragassi (2001)	$E=0,0002e^{5,6444x}$ onde: E= erodibilidade (g/cm ²); $X= (\%silte + \% Areia Fina)/(\%Argila + \% Areia Grossa)$	Solos mais erodíveis são aqueles quando apresentam mais partículas do tamanho de Areia Fina e Silte
DNER (1979)	49% ≤ % de passante #40 ≤ 96%	Solos com boa à regular resistência à erosão
	Razão de Dispersão NBR - 13602 RD > 50%	Solos Altamente Dispersos com Erodibilidade Muito Alta
Araújo (2000)	50% > RD > 25%	Solos Moderadamente Dispersos com Erodibilidade Alta
	20% < RD < 25%	Solos não Dispersos com Erodibilidade média
Pesquisas fundamentadas em propriedades mistas ou outras.		
	IP > 15	Boa resistência à erosão
	15 > IP > 6	Média resistência à erosão
	IP < 6	Baixa resistência à erosão
Santos (2001)	Cu > 15	Solos de baixa erodibilidade
	5 < Cu < 15	Média Erodibilidade
	Cu < 5	Solos Erodíveis
Bastos (1999)	$\Delta C = (Cnat - Cinun) / Cnat$ Onde: Cnat é a Coesão natural Cinun é a Coesão inundada	Solos com mais de 85% de ΔC são tidos como de alta erodibilidade

Fonte: Adaptado de Stephan (2010) e Araújo (2000)

Uma outra maneira de se avaliar o comportamento do solo perante a erosão é realizando a sua caracterização, e, posteriormente, a sua classificação em sistemas de classificação de solos. Segundo Santos (2006), os sistemas de classificações geotécnicas são muito importantes porque juntam em determinados grupos, solos de comportamento semelhantes e possibilitam prever ou estimar o seu comportamento ajudando a comunicação entre engenheiros e técnicos.

2.5.1.3 Análise da Erodibilidade com Sistemas de Classificações

A classificação pedológica, normalmente empregada no âmbito das ciências agrárias, estabelece distintas classes de solos com base no seu perfil pedogenético, sendo que os estudos referentes aos modelos desta classificação divergem muito de acordo com o país onde é estabelecida. Dessa maneira, a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias – EMBRAPA desenvolveu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, no qual trata-se de um sistema taxonômico, hierárquico, multicategórico e aberto, sendo composto por 6 níveis de classificação como Origem, Subordem, Grande Grupo, Família e Séria (EMBRAPA, 2019). De acordo com a Secretaria de Planejamento de Mato Grosso – SEPLAN (2000), ao se considerar os atributos e horizontes diagnosticáveis, o agrupamento de classe de textura, as fases de unidade de mapeamento, classe de profundidade e a erodibilidade dos solos, é possível estabelecer a seguinte classificação de erodibilidade pelo perfil pedológico da Figura 19.

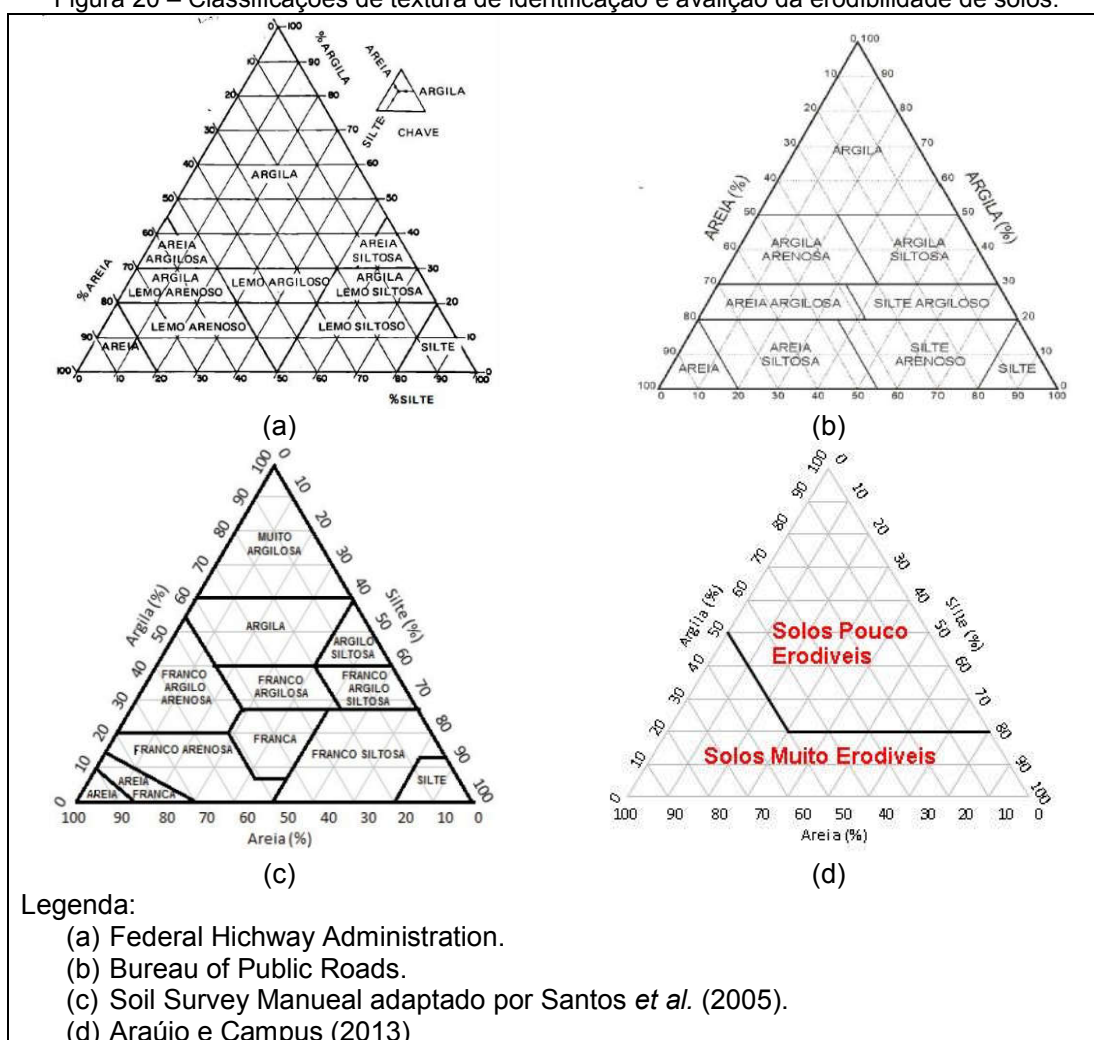
Figura 19 – Hierarquização dos solos de Mato Grosso, de acordo com a erodibilidade, conforme SEPLAN-MT

Classes de erodibilidade	Horizonte subsuperficial	Outras características	Exemplos no Estado
Muito Fraca	B Latossólico	Profundos, com homogeneidade vertical, textura argilosa, muito argilosa e algumas textura média; Baixa erodibilidade	Latossolos Roxos Latossolos Vermelho-Escuros Latossolo Vermelho-Amarelos
Fraca	B Latossólico B textural C	Profundos, relativamente homogêneos verticalmente, textura média (leve) ou arenosa/média ou arenosa (caso de areia) Baixa erodibilidade	Latossolo textura média leve Podzólicos textura arenosa/média ou média Podzol Hidromórfico Areia Quartzosa e Areia Quartzosa Hidromórfica
Moderada	B textural Horizonte plíntico	B textural de textura argilosa ou muita argilosa sem mudança textural abrupta Horizonte plíntico de textura média e sem mudança textural abrupta Solos profundos Média erodibilidade	Podzólicos textura argilosa ou média/argilosa Terras Roxas Estruturadas Plintossolos e solos com caráter plíntico de textura média
Forte	B textural B nátrico B câmbico Horizonte plíntico	Alta relação textural nos solos com B textural, B nátrico e horizonte plíntico Textura argilosa no horizonte plíntico Solos profundos ou de mediana profundidade Solos de argila de atividade alta Alta erodibilidade	Podzólico abruptos Solonetz Solodizado Planossolos Plintossolos argilosos Cambissolo da região de Paranatinga
Muito Forte	Solos com sequência de horizontes: A, C, R A, Bt, R A, R B textural	São solos rasos ou têm mudança textural abrupta e argila de atividade alta Ambas as situações Alguns outros impedimentos físicos à percolação d'água Pequena profundidade Muito Alta erodibilidade	Solos Litólicos Cambissolos e Podzólicos rasos Podzólicos abruptos e com atividade alta.

Fonte: Del' ARCO *et al.* (1992), adaptado por SEPLAN-MT/CNEC (2000)

A classificação do solo através de sua textura, diferentemente do perfil, possibilita uma prévia compreensão de tendências de comportamento, e foi desenvolvida empiricamente ao longo dos tempos, entretanto, ainda discute-se muito sobre a melhor maneira de realizá-la, destacando-se por exemplo os modelos da Federal Highway Administration, Bureau of Public Roads e o Soil Survey Manual adaptado por Santos *et al.* (2005), sendo ainda conforme Caputo (1986) e Santos *et al.* (2005), designados, respectivamente os termos Lemo e Franco para substituir a expressão Barro que vem do inglês como Loam. Buscando uma maneira simples e prática de avaliar a erodibilidade de solos Araújo e Campus (2013) estabeleceram em função do triângulo textorial um método de avaliar tal tendência de comportamento conforme a Figura 20.

Figura 20 – Classificações de textura de identificação e avaliação da erodibilidade de solos.




Fonte: Adaptado de Caputo (1986), Nunes (2010), Santos *et al.* (2005) e Araújo e Campus (2013).

O Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, utilizado com maior frequência no âmbito da Geotecnia, utiliza em sua metodologia as características granulométricas e de consistência, classificando os solos em grupos por duas letras, sendo a primeira relativa à granulometria, a segunda à plasticidade e totalizam quinze grupos distintos, como apresentando no Anexo I, e de acordo com Gray e Sotir (1996), permite a diferenciação entre os solos com base na sua erodibilidade, hierarquizando os solos do mais erodível para o menos erodível conforme a Figura 21.

Figura 21 – Hierarquização da erodibilidade dos grupos do SUCS.

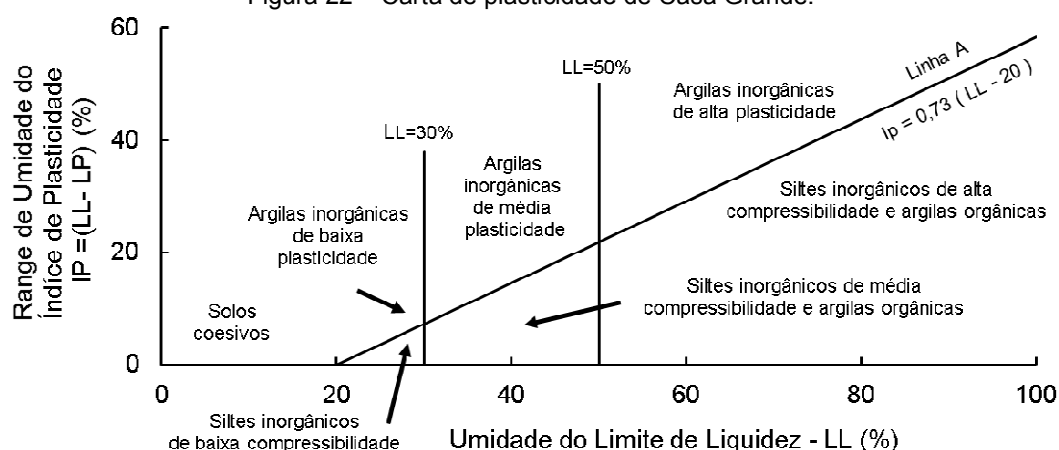
Característica	Grupo - SUCS	Erodibilidade
Silte de baixa plasticidade	ML	Maior
Areia siltosa	SM	
Areia argilosa	SC	
Silte de alta plasticidade	MH	
Argila de alta plasticidade	CH	
Solo orgânico de plasticidade baixa	OL	
Argila de baixa plasticidade	CL	
Pedregulhoso siltoso	GM	
Areia bem graduada	SW	
Pedregulho pobremente graduado	GP	
Pedregulho bem graduado	GW	Menor



Fonte: Gray e Sotir (1996).

De modo geral sabe-se que em solos granulares o fator que mais influência na sua resistência ao cisalhamento e a erosão é o atrito entre os grãos, contudo, para os solos finos a plasticidade é o fator de maior impacto em seu desempenho resistente. Conforme Bergaya e Lagaly (2013) avaliando os níveis de plasticidade dos solos finos, vemos que os solos argilosos e siltosos possuem maiores valores de Índice de Plasticidade que os demais, possuindo em termos de consistência uma maior disposição dos sedimentos argilosos absorverem água sem perderem muito de sua consistência, conforme observado na carta de Plasticidade de Casa Grande na Figura 22.

Figura 22 – Carta de plasticidade de Casa Grande.



Fonte: Bergaya e Lagaly (2013).

Pesquisando diversos valores de referência para limites de consistência de solos coesivos de ocorrência natural, Dahms e Fritz (1998) estabeleceram os limites da Tabela 14.

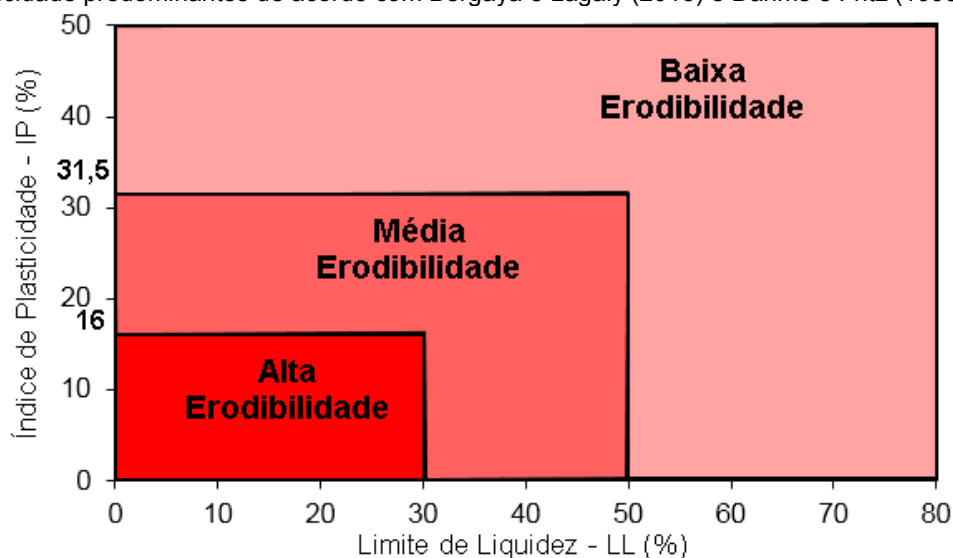
Tabela 14 – Valores de referência para limites de consistência de solos coesivos

Solo	Limite de Liquidez LL (%)	Limite de Plasticidade LP (%)	Índice de Plasticidade IP (%)
Siltoso de baixa plasticidade	25-35	20-28	4-11
Siltoso de média plasticidade	35-50	22-23	7-20
Argiloso de baixa plasticidade	25-35	15-22	7-16
Argiloso de média plasticidade	40-50	18-25	16-28
Argiloso de alta plasticidade	60-85	20-35	35-55

Fonte: Dahms e Fritz (1998).

Analisando as contribuições de Bergaya e Lagaly (2013), sobre valores dos limites de consistência dos **solos argilosos**, concluímos, de maneira qualitativa que dos valores de **Limites de Liquidez** que distinguem a **plasticidade** dos solos da carta de Casa Grande da Figura 22 e dos **Índices de Plasticidade médios** que delimitam as regiões de comportamento de baixa/média e de média/alta plasticidade dos **solos argilosos** da Tabela 14, podemos estabelecer três de zonas de **diferentes tendências de plasticidade** e conseqüentemente de **erodibilidade indiretamente** conforme a Figura 23.

Figura 23 – Regiões de distintas tendências de erodibilidade para solos Argilosos, conforme valores de plasticidade predominantes de acordo com Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).



Fonte: Adaptado de Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).

A plasticidade de solos argilosos não depende apenas de seu teor de água, mas também do percentual de argila e da natureza de seus argilo minerais conforme apresentado na Tabela 15. De acordo com Bergaya e Lagaly (2013) este comportamento plástico possibilita não apenas estimar a quantidade de argila, mas também o seu tipo, elencando, por exemplo, que solos muito pegajosos ou plásticos normalmente contêm esmectitas, enquanto que a plasticidade diminui para os solos Ilíticos e ainda mais para caulíníticos. Contudo, existe a possibilidade de, em um mesmo solo, encontrar a presença de mais de um argilomineral, prejudicando tais proposições.

Tabela 15 – Limites de consistência dos Argilominerais conforme Mitchell e Soga (2005).

Argilomineral	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Limite de contração (%)
Motimorilonita	100-900	50-100	8,5-15
Nontronite	37-72	19-27	
Ilita	60-120	35-60	15-17
Caulinita	30-110	25-40	25-29
Clorita	44-47	36-40	
Palygorskite	160-230	100-120	
Allophane	200-250	130-140	

Fonte: Bergaya e Lagaly (2013).

De acordo com Skempton (1953), a plasticidade, mais especificamente a coesão das argilas, é regida pela quantidade do Argilo mineral, pela sua capacidade de atividade e pela sensibilidade que possa ter para perda de resistência por perturbações físicas, propondo um índice para analisar esta atividade, que é a relação do Índice de Plasticidade, dividido pelo ter da argila ($\phi < 0,002$ mm), e que, segundo Bergaya e Lagaly (2013) podem ser elencados os possíveis coeficientes para cada grupo de argilo minerais conforme a Tabela 16.

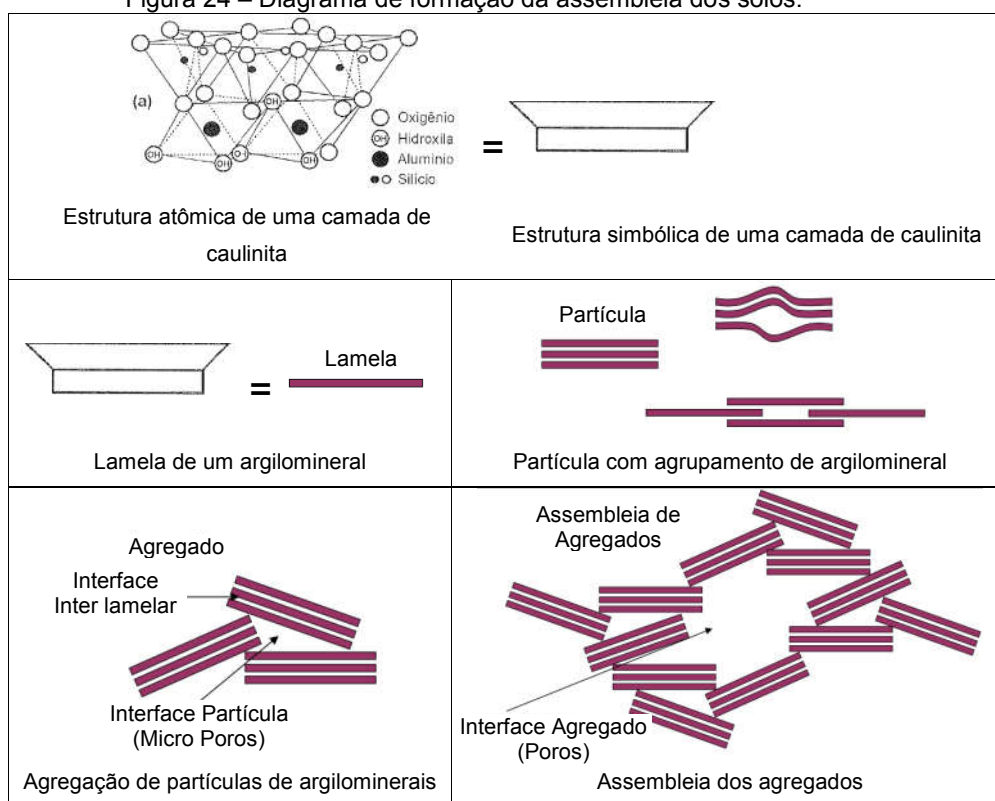
Tabela 16 – Atividade dos Argilominerais e de combinações preparadas artificialmente

Mineral	Atividade de Skempton	Combinações de Mineral	Atividade de Skempton
Smectites	1-7	Bentonite/Kaolinita - 4:1	4,85
Illite	0,5 -1	Bentonite/Kaolinita - 1,5:1	4,43
Kaolnita	0,5	Kaolinita/Bentonite - 1,5:1	3,25
Halloysite (2H ₂ O)	0,5	Kaolinita/Bentonite - 4:1	195
Halloysite (4H ₂ O)	0,1	Kaolinita/Bentonite - 9:1	1,52
Attapulgite	0,5 -1,2	Kaolinita/Bentonite - 19:1	0,96
Allophane	0,5 -1,2		
Bentonite comercial	5,4		
Kaolinite comercial	0,36		

Fonte: Bergaya e Lagaly, 2013.

Segundo Pinto (2006) e Bergaya e Lagaly (2013), em uma análise mais detalhada, verifica-se que a partícula de argila é normalmente constituída por combinações de arranjos de estruturas químicas tetraédricas e octaédricas que formam uma lamela, posteriormente, a combinação destas lamelas de mesma semelhança, ou não, formam a partícula, em seguida o agregado, e adiante a assembléia dos agregados, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de formação da assembleia dos solos.



Fonte: Adaptado, Pinto (2006) e Bergaya e Lagaly (2013).

Alguns argilominerais são formados por uma camada tetraédrica (Folha de Sílica) e uma octaédrica (Folha de Gibbissita), formando uma estrutura 1:1, possuindo uma espessura de 7Å^1 como a caulinita, e que, conforme Pejon (1992), é a mais abundante no território brasileiro. De acordo com Pinto (2006), estas camadas assim estabelecidas, encontram-se firmemente empacotadas, com ligações de hidrogênio que impedem a sua separação, e que, entre elas se introduzam moléculas de água, resultando em uma espessura da ordem de 1.000Å e em uma dimensão longitudinal de 10.000Å .

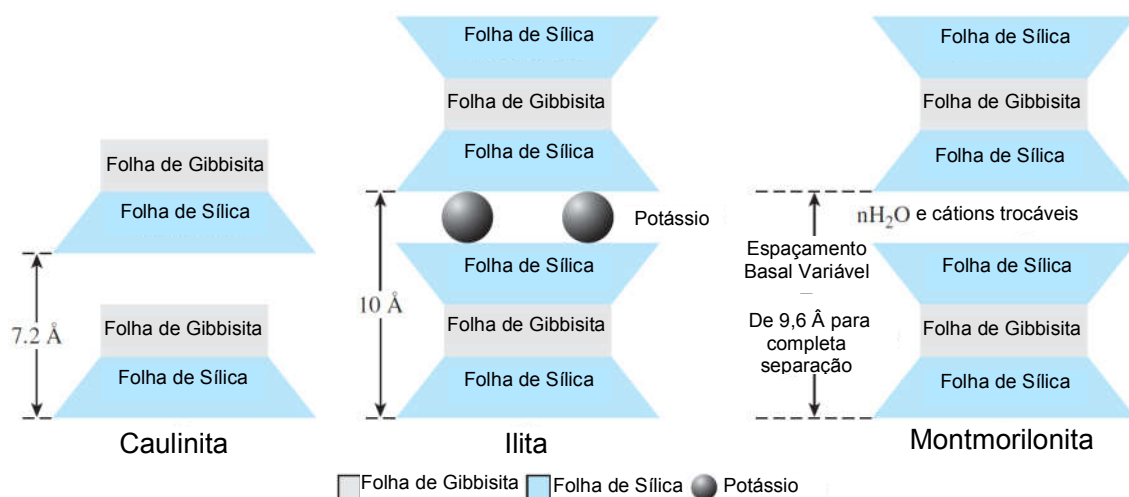
Existem ainda outros argilominerais com arranjo de uma estrutura octaédrica entre duas estruturas tetraédricas (estrutura 2:1), resultando em uma espessura de 10Å , como é o caso das esmectitas e as ilitas. Segundo Pinto (2006), nestes minerais as ligações entre as camadas acontecem por íons de O^{-2} e O^{+2} dos arranjos

¹ 1 Angstrom = 10^{-10} m

de tetraedros, pois são mais fracos em relação as ligações da caulinita, na qual, íons de O^{2+} do tetraedro se ligam a OH^- da amostra octaédrica.

Conforme DAS (2010) as ilitas e as emectitas, geralmente, possuem dimensões laterais de 1.000 a 5.000Å, contudo, suas espessuras são respectivamente de 50 a 500Å e de 10 a 50 Å, resultando em superfícies específicas de 80 m² e 800 m². As forças resultantes destas superfícies são de grande importância no comportamento de partículas coloidais², pois a diferença de superfície específica pode indicar uma brusca variação de comportamento em campo e conforme a Figura 25 podemos ver claramente os diferentes arranjos das camadas dos principais argilominerais (DAS, 2010).

Figura 25 – Diagrama das estruturas de Caulinita, Ilita e Montmorilonita.



Fonte: Adaptado DAS, 2010.

Uma maneira de se realizar a determinação do grupo de argilominerais que o solo possui é realizando a difração de raios ou aferindo sua capacidade de adsorção, empregando por exemplo a técnica da adsorção do corante Azul de Metileno, possibilitando a determinação da sua superfície hidrófila e, conseqüentemente, medir a capacidade que estes minerais têm para fixar água, bem como o tipo e teor presentes.

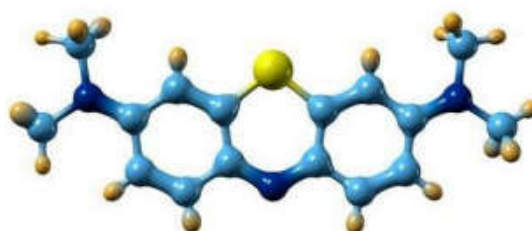
Na década de 1930, em especial na França, iniciou-se uma série de pesquisas de utilização de corantes em solos, na tentativa de se determinar a

² Partícula de tamanho tão pequeno que sua massa se torna depressível em comparação com a contribuição de sua carga elétrica para o comportamento do solo

superfície específica (SE) e a capacidade de troca catiônica (CTC) desses materiais, culminando, por exemplo, no ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo método da Mancha, apresentado no Anexo IV e descrito por Fabbri (1994).

O corante Azul de Metileno (MB) é um composto químico altamente detectável a olho nu em ambientes aquáticos, de cadeia aromático heterocíclica, do tipo catiônico ou básico, classificado como CI 52015, com fórmula química $C_{16}H_{18}N_3SCl$, de massa molar $319,8 \text{ g mol}^{-1}$, conforme a Figura 26, e que em sua forma hidratada torna-se $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ de massa molar $373,9 \text{ g mol}^{-1}$ e de área superficial adsorvida de 130 \AA^2 , conforme Oliveira (2012).

Figura 26 – Estrutura do Corante Azul de Metileno



Fonte: OLIVEIRA (2012).

Devido a importantes diferenças do comportamento “*in situ*” de solos tropicais com solos de clima temperado, Nogami e Villibor (2009) desenvolveram a metodologia Miniatura Compactada – MCT, que fundamenta-se em dois grupos principais, como solos de comportamento laterítico ou não laterítico e em subgrupos correspondentes à sua textura conforme mostra o Anexo II e após analisarem a resistência a erosão de taludes de corte em solos isotrópicos e homogêneos, inclinados de 45° a 60° , nas condições climáticas de São Paulo, estabeleceram os níveis de erodibilidade de cada grupo conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Níveis de erodibilidade dos grupos MCT quanto à erosão em seções de corte

Grupo Miniatura Compactada Tropical							
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Erodibilidade	B,M,E	B,M,E	B,M,E	M,E	B	B	B
Formas de erosão	Desag. E	Desag. M	Sulcos E	Sulcos e Desag. E	Firme	Desag . B	Desag . B
Legenda: B = Baixo, M= Média e E= Elevado. Des= Desagregações							

Fonte: Adaptado de NOGAMI e VILIBOR (1995)

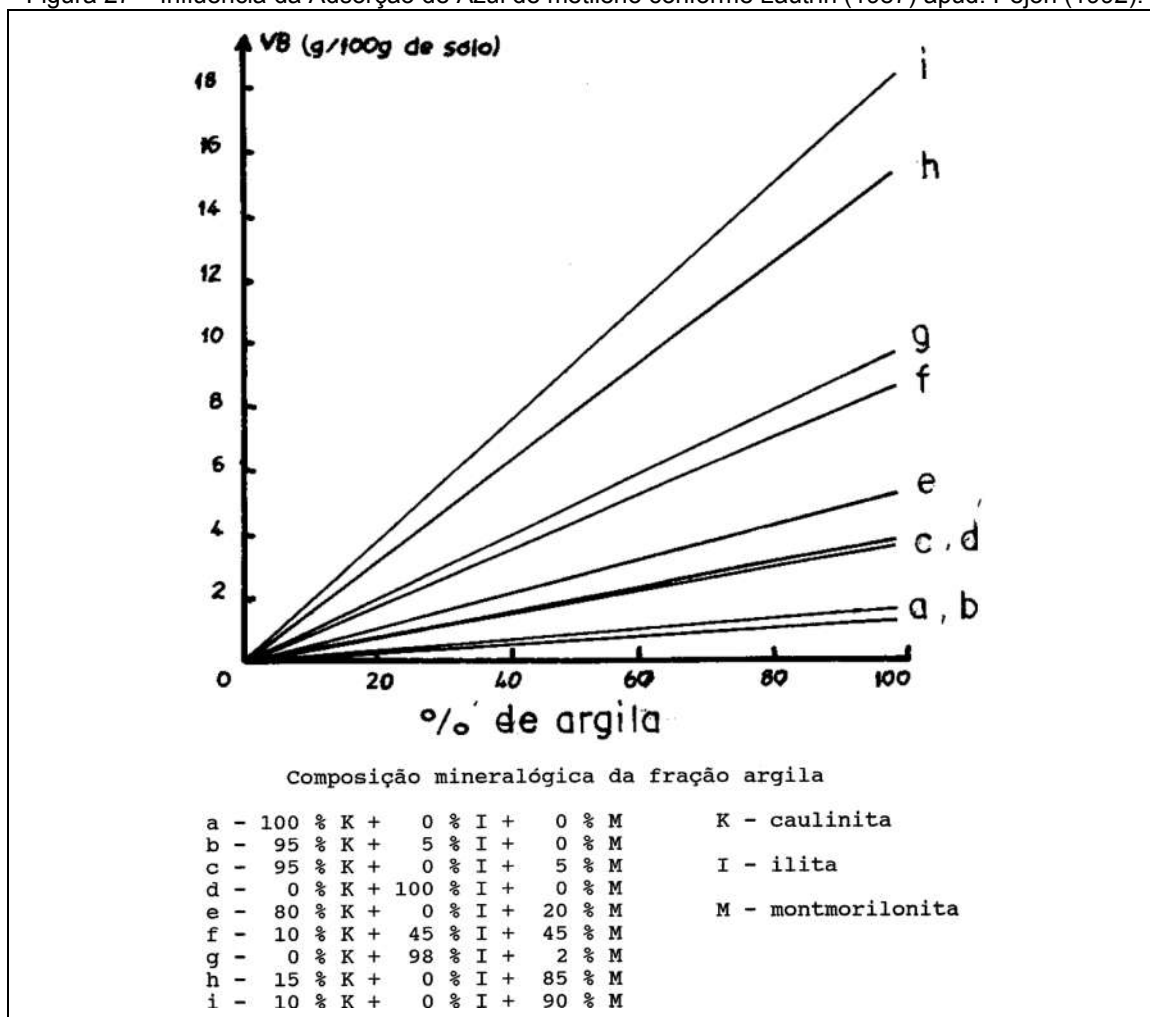
Diversos trabalhos, como por exemplo, o de Fabbri (1994), relatam que um dos principais fatores dos solos tropicais que dificultam, e muitas vezes impossibilitam, as classificações tradicionais é estado de laterização dos solos. Como a classificação MCT, além de estabelecer o tipo de solo, é capaz de determinar se o mesmo é laterítico ou não, esta se torna uma referência em sistema de classificação de solos.

A classificação MCT, em especial através do método expedito das pastilhas, avalia o comportamento do solo em estado amolgado, denominando de solos de comportamento laterítico aqueles que, mesmo com altos teores de finos, mesmo podendo apresentar contrações elevadas (devido à sua desidratação), mantem-se estáveis e demonstrando baixa penetração da agulha padrão na reabsorção de água. Neste método expedito analisa-se também a possibilidade de expansão, trincas, fraturas ou qualquer outro comportamento na reabsorção de água das amostras, fornecendo indicadores de possíveis comportamentos indesejáveis em campo.

Tais comportamentos indesejáveis das pastilhas, mencionados acima podem ser justificados com: o teor de Silte, que, por não ter tamanho grande o suficiente para contribuir com peso próprio e com atrito entre os grãos e nem pequeno o suficiente para possuir coesão, pode desencadear tais expansões; o teor de matéria orgânica que, por possuir alta atividade, pode desencadear expansões quando secas e expostas à água novamente; e a atividade de seus argilo minerais que, através de sua composição e arranjo químico mineralógico, pode apresentar altas taxas de atividade superficial e desencadear expansões.

Analisando possíveis combinações de diferentes argilominerais em diferentes teores, Lautrin (1987) apud. Pejon (1992), apresenta o comportamento os valores do *Valeur Bleue* – VB adsorvidos conforme a Técnica de Adsorção do Azul de Metileno apresentado no Anexo IV para as algumas combinações na Figura 27.

Figura 27 – Influencia da Adsorção de Azul de metileno conforme Lautrin (1987) apud. Pejon (1992).



Fonte: Lautrin (1987) apud. Pejon (1992)

Buscando caracterizar a atividade da fração argilosa com a adsorção de azul de metileno para 100 gramas de argila (Acb), Lautrin (1989) apud. Pejon (1992) apresenta a Equação 12 e, com base na identificação da mineralogia por Difração de Raios X, o diagrama e a classificação na Figura 28.

$$Acb = \frac{100 \times VB}{C_2}$$

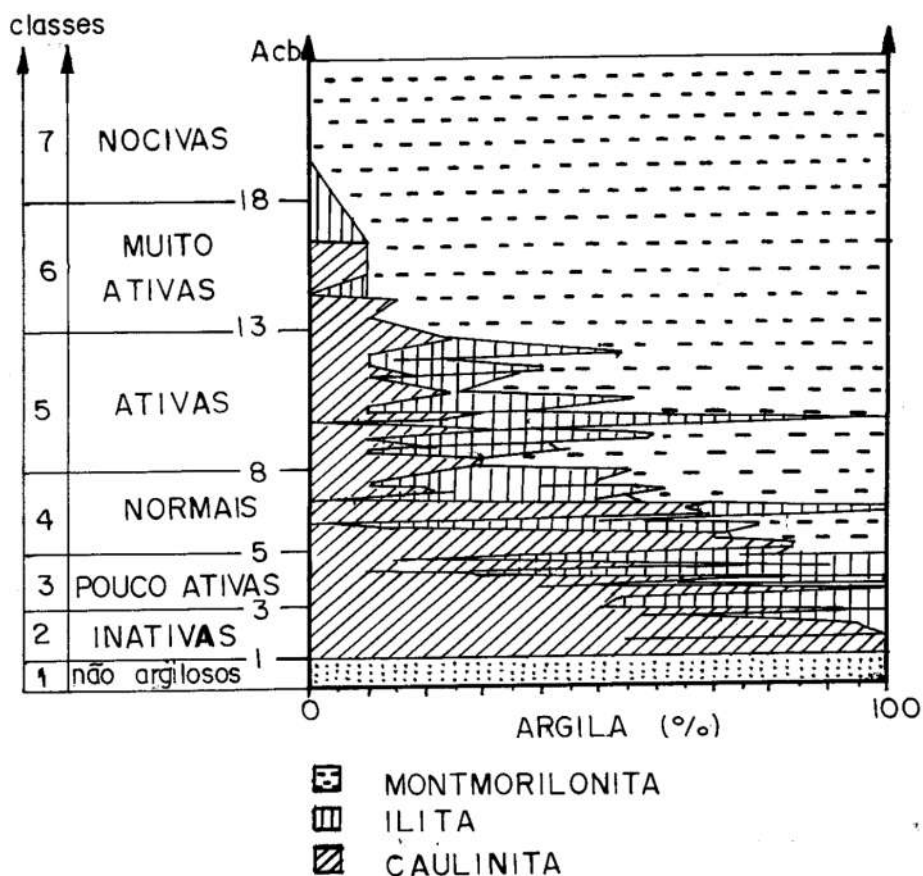
Equação 12

Onde:

Acb: Índice de atividade da fração argilosa (g/100g de argila);

VB: Valor de Azul de metileno Adsorvido (g/100 g de solo);
 C₂: Porcentagem de material com menos 0,002 mm de diâmetro.

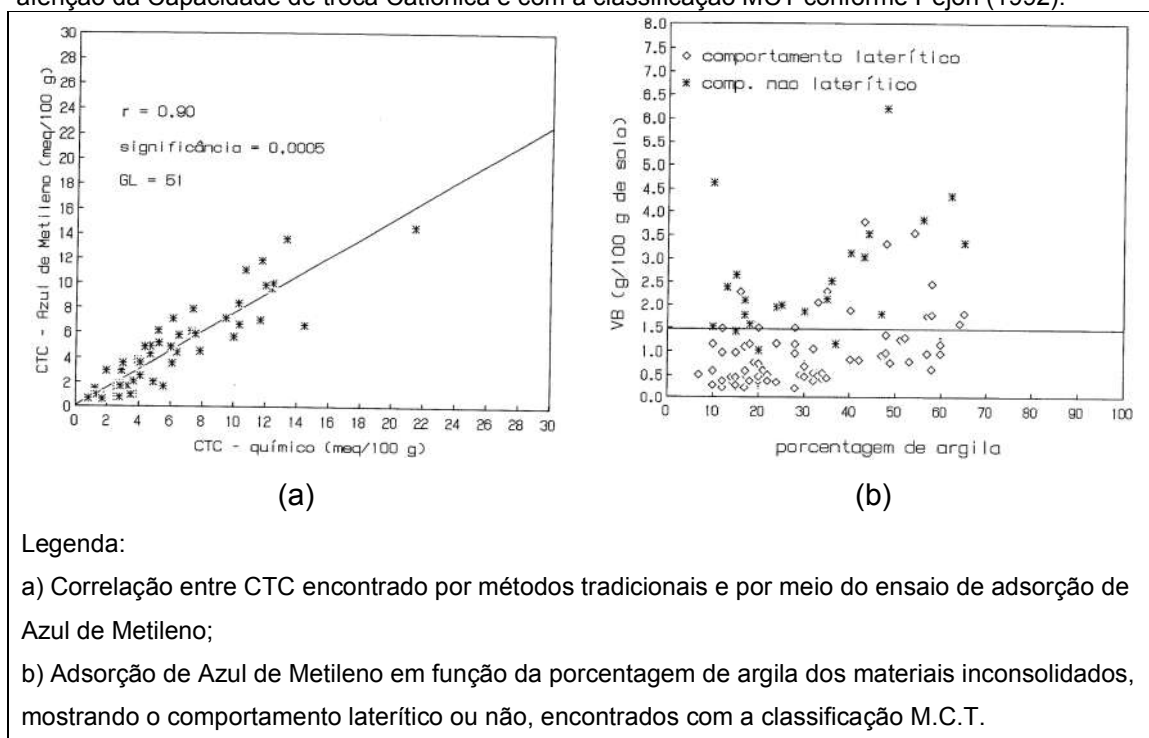
Figura 28 – Diagrama de atividade das argilas pelo método do Azul de metileno de Lautrin (1989) apud. Pejon (1992).



Fonte: Lautrin (1989) apud. Pejon (1992).

Pejon (1992), ao analisar 123 amostras de solos tropicais do Brasil com as técnicas tradicional e a de adsorção, verificou uma ótima correlação entre ambas, tendo a confirmação da empregabilidade da última, conforme a Figura 29a e realizando complementarmente a classificação M.C.T. constatou que a técnica de adsorção de Azul de metileno poderia ser empregada para a classificação em laterítica e não laterítica de solos, em um limiar de VB igual à 1,5, tendo uma probabilidade de 80 % de acerto conforme apresentado na Figura 29b.

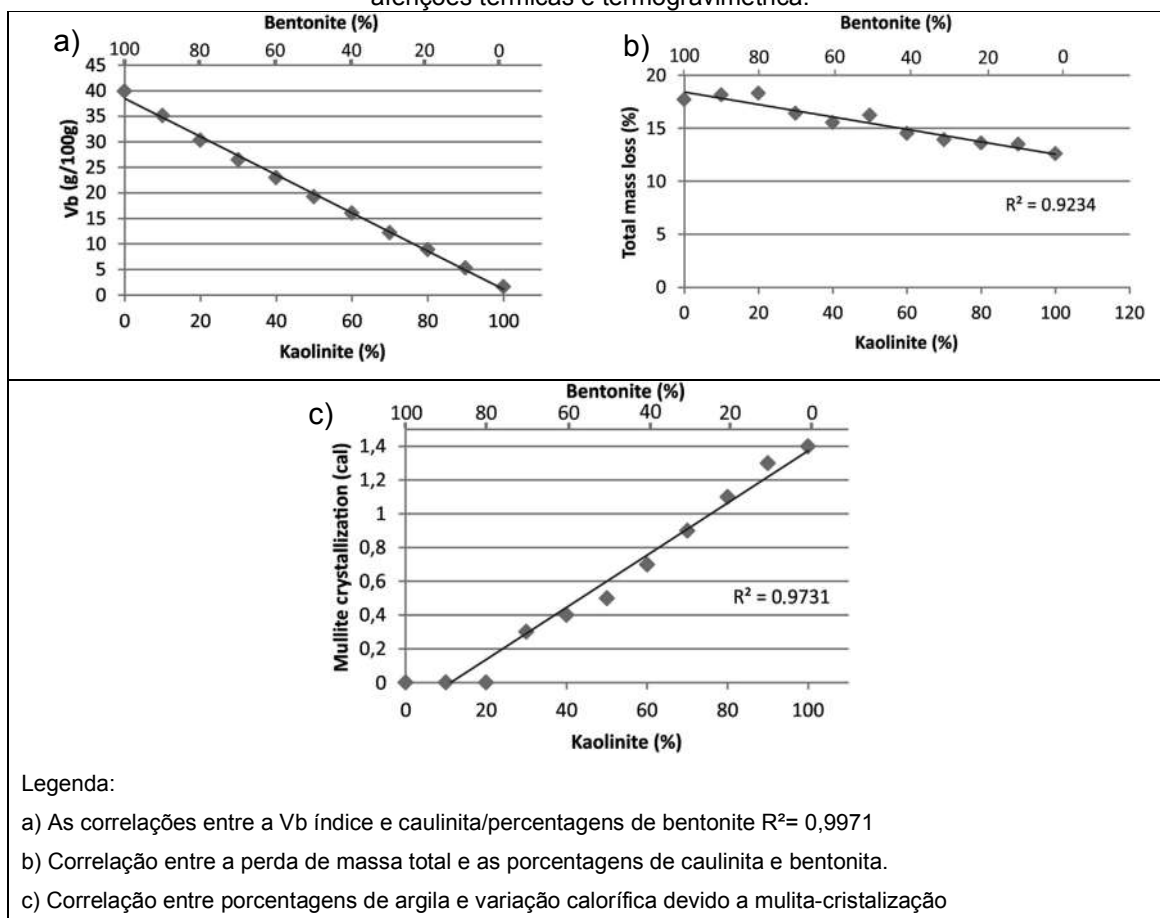
Figura 29 – Avaliações da técnica de Adsorção de Azul de Metileno com métodos tradicionais de aferição da Capacidade de troca Catiônica e com a classificação MCT conforme Pejon (1992).



Fonte: Adaptado Pejon (1992).

Recentemente, Pejon *et al.* (2015) avaliaram a técnica da adsorção de azul de metileno na identificação de minerais argilosos em misturas de caulinita e montimorilonitas submetidas a análises térmicas e termogravimétricas, constatando que os métodos apresentam uma correlação positiva e altamente significativa, sendo ainda, determinado que a técnica de adsorção, conforme mostra Figura 30, além de ser de custo bem mais reduzido e requerer equipamentos de menor nível tecnológico, pode fornecer informações térmicas relacionadas a ambos os métodos de análises.

Figura 30 – Determinações dos Valores de Azul adsorvidos pelas misturas argilosas e a suas aferições térmicas e termogravimétrica.



Fonte: Adaptado Pejon *et al.* (2015).

Segundo Lan (1980) *apud*. Fabbri (1994) a Superfície Específica- SE dos Argilominerais pode ser determinada com a técnica da Adsorção de Azul de Metileno e, segundo Fabbri (1994), pode-se caracterizá-los com o Coeficiente de Atividade – CA resultante da divisão do Volume de Azul – VA pelo teor de argila conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Valores VA e CA, em função da superfície específica medida pelo azul de metileno e o Grau de Atividade do Argilo Mineral proposto por Fabbri (1994).

Grupo de Argilo Minerais	Superfície Específica - SE (m ² /g)	CA (10 ⁻³ g/g%)	Va ¹ (10 ⁻³ g/g)	Grau de Atividade Fabbri (1994)
Montmorilonitas	860	350	350	Muito Ativo
Vermiculitas ²	200	82	82	(CA>80)
Ilitas	74	30	30	Ativo
Caulinitas	48	20	20	(11<CA<80)
Laterizados ³	27	11	11	Pouco Ativo (Ca<11)

1. Valores de azul para 1 grama da fração argila

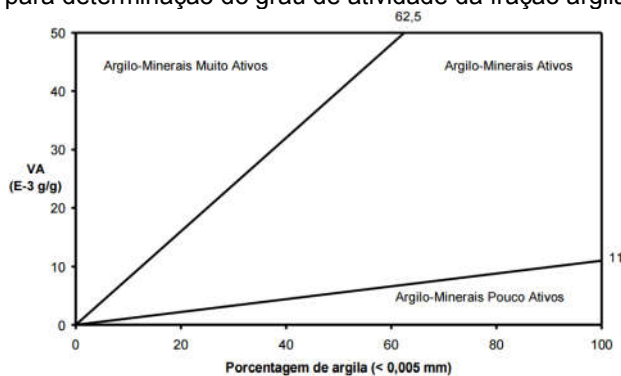
2. Superfície específica segundo LCPC (1979)

3. Superfície específica para CA = 11

Fonte: adaptado de Lan (1980) apud. Fabbri (1994).

Conforme FABBRI (1994) após verificar a atividade de 297 amostras de solos tropicais do Brasil, verificou em seus estudos de doutoramento que é possível categorizar a atividade de toda a fração dos argilo minerais conforme a carta apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Carta para determinação do grau de atividade da fração argila dos solos



Fonte: FABBRI (1994)

Conforme Bergaya e Lagaly (2013) deve-se sempre ter em mente que mesmo avaliando todas as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos, não é possível estabelecer preceitos com auto grau de precisão de seu comportamento in situ na condição natural, pois o seu arranjo estrutural, a orientação das partículas, a conectividade dos poros, entre outras características mais, impossibilita tais previsões. Entretanto, no que tange à contribuição da atividade dos argilominerais

na erodibilidade dos solos verifica-se que a sua atuação pode manifestar-se de distintas maneiras como:

- Argilominerais ativos como a Montmorilonita: possibilitam uma maior plasticidade (Bergaya e Lagaly, 2013), permitem através da expansividade o fechamento de trincas (Hiltmann e Sreibny, 1998), contudo, também se envolvem com água quando úmidas (Wind, 1994) e quando secas possuem maiores taxas de contração, conferindo menor estabilidade aos seus agregados (Morgan, 1986 *apud* Araújo, 2000).
- Argilominerais pouco ativos como a caulinita: Possuem menor movimentação hidráulica, permitindo uma maior estabilidade de seus agregados e a manutenção de sua estrutura (Morgan, 1986 *apud* Araujo, 2000), sendo ainda que em ambientes de alta laterização espera-se solos ricos em óxidos e mesmo estes não alterando os níveis de atividade, atuam como cimentantes (Santos e Castro, 1966 *apud* Araujo, 2000), (Pejon, 1992) e (Nogami e Villibor, 2005).

2.5.2 DETERMINAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS.

Conforme Briaud *et al.* (2019) existem diversas técnicas de avaliação direta da erodibilidade de solos, que aplicam esforços de diferentes maneiras, encontrando distintas taxas de erosão, com ordem de grandezas variadas e que podem ser elencadas em testes de laboratório ou em testes de campo conforme apresentado na Tabela 19 e observado na Figura 32.

Tabela 19 – Tipos de avaliações da erodibilidade de solos em termos de aplicação.

Testes de erosão em laboratório	
Erosion Function Apparatus (EFA)	Improved rotating cylinder test
Sediment Erosion Rate Flume (SERF)	Rotating Erosion Test Apparatus (RETA)
Ex-situ Scour Testing Device (ESTD)	Pinhole Erosion Test
Sediment Erosion at Depth Flume (Sedflume)	Drill Hole Test
Some other flume tests	Hole Erosion Test (HET)
Lab Jet Erosion Test (JET)	Slot Erosion Test (SET)
Jet apparatus to measure the tractive resistance of cohesive channel beds Dunn	Stress-Controlled Erosion Apparatus
Submerged jet test at the University of Texas	True Triaxial Piping Test Apparatus (TTPTA)
Rotating cylinder apparatus developed in University of Texas	Constant Gradient Piping Test Apparatus

(Continuação)...

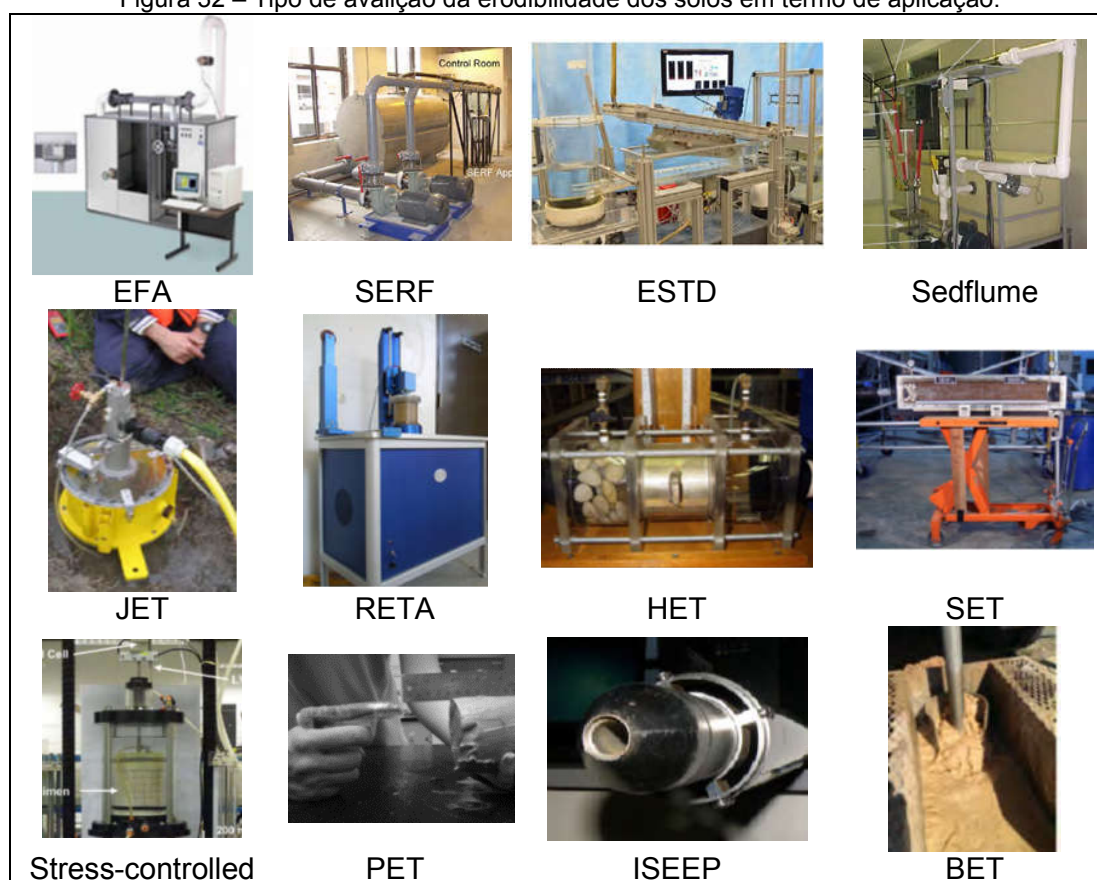
Testes de erosão em campo

Pocket Erodimeter Test (PET)	Borehole Erosion Test (BET)
In Situ Erosion Evaluation Probe (ISEEP)	In situ Scour Testing Device (ISTD)
Jet Erosion Test (JET)	Field Flume Tests

*Nomenclatura conforme idioma de origem

Fonte: Adaptado Briaud *et al.* (2019).

Figura 32 – Tipo de avaliação da erodibilidade dos solos em termo de aplicação.



Fonte: Adaptado Briaud *et al.* (2019).

As diferenças entre cada equipamento podem ser desde os materiais em que é aplicável, faixas de tensões empregadas, custo e até a confiabilidade dos resultados, sendo apresentado conforme Briaud *et al.* (2019) tais características na Tabela 20.

Tabela 20 – Informações de aplicações de determinados testes de erosão.

Teste de Erosão	Variedade de aplicação	Faixa de tensões cisalhantes aplicadas	Custo do Dispositivo ¹	Confiabilidade dos resultados
Lab. JET	Argilo arenosa	Inferiores à 100 Pa	Baixa	Boa
Em campo JET	Argilo arenosa	Inferiores à 500 Pa	Média	Boa
EFA	Argilo arenosa	Inferiores à 800 Pa	Alta	Boa
HET	Solos argilosos	Até 800 Pa	Alta	Boa
SET	Solos argilosos	Até 400 Pa	Alta	Média
RETA	Solos argilosos	Inferiores à 100 Pa	Alta	Média
PET	Argilo arenosa	Inferiores à 20 Pa	Muito Alta	Média
ISEEP	Argilo arenosa	Inferiores à 650 Pa	Alta	Boa
BET	Argilo arenosa	Inferiores à 600 Pa	Média	Boa

Custo do Dispositivo¹ em dólares americanos = Alto: igual ou superior a \$ 30.000; Médio: entre \$15.000 e \$30.000; Baixo: entre \$5.000 e \$15.000; Muito baixo: menos de \$5.000

Fonte: Adaptado Briaud *et al.* (2019).

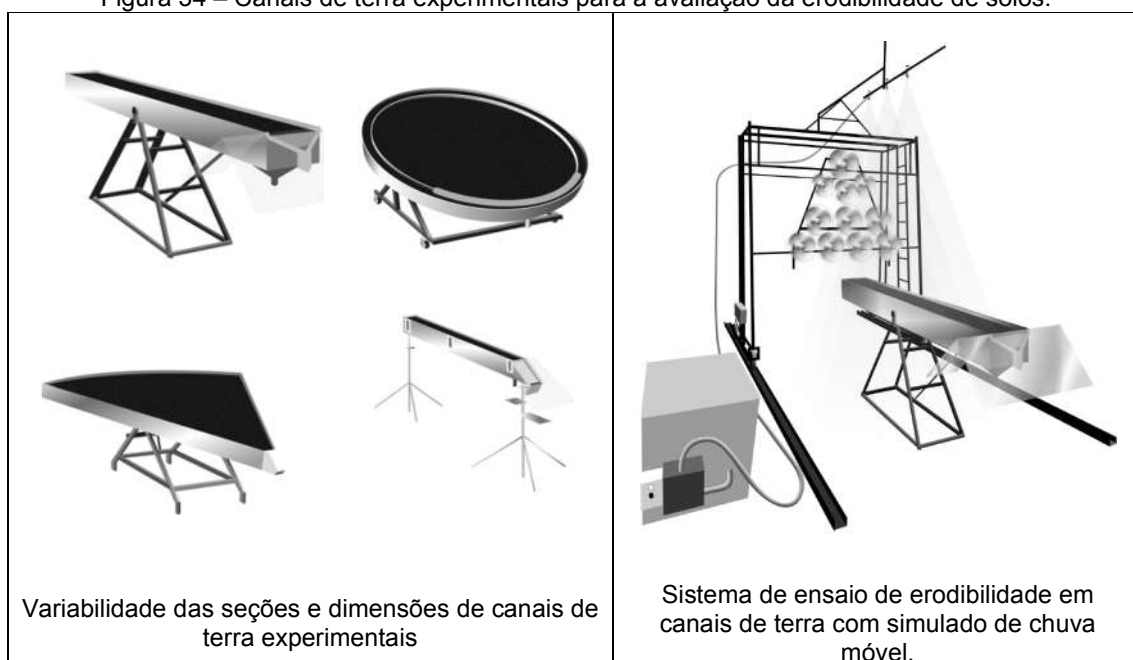
Segundo Couto (2008) e Carvalho (2017), a avaliação ou quantificação da erodibilidade dos solos deve ser realizada nas condições em campo ou em laboratório, que mais se aproximem da ocorrência do fenômeno estudado em campo. Dessa maneira pode-se destacar os estudos com estações experimentais de campo ou laboratório, que com a ação das chuvas ou escoamentos superficiais naturais ou simuladas promovem a erodibilidade dos solos e, posteriormente, a sua quantificação, como apresentado na Figura 33 e na Figura 34

Figura 33 – Estação experimental de campo para a avaliação da erodibilidade de solos.



Fonte: Adaptado de Lafayette (2006) e Mendes (2006).

Figura 34 – Canais de terra experimentais para a avaliação da erodibilidade de solos.



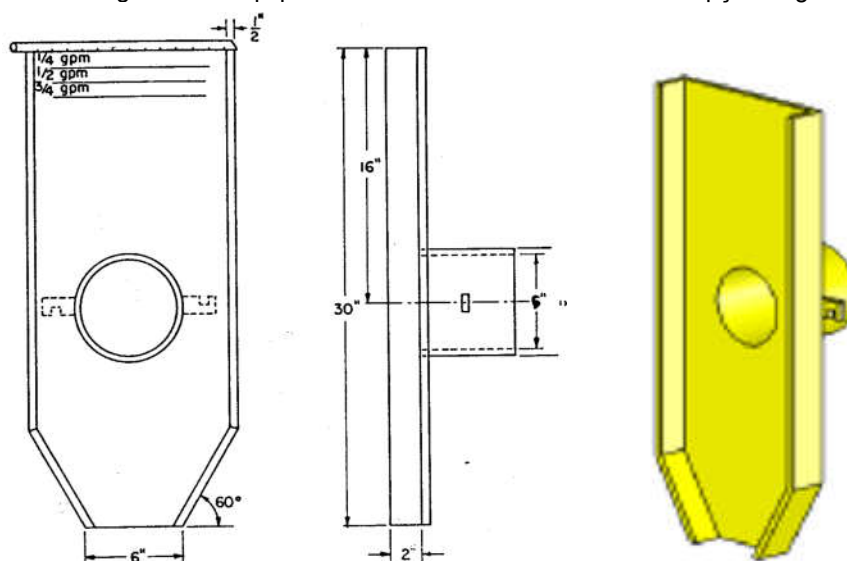
Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2006)

Compreendendo a variabilidade de equipamentos e condições nas quais as amostras podem ser submetidas, observa-se que para o estudo de amostras indeformadas, com condições de escoamento semelhantes às que ocorrem em campo, o equipamento de Inderbitzen, que será apresentado destaca-se pela simplicidade e praticidade de uso (BASTOS, 1999). Contudo, deve-se saber que na medida em que é reduzido os seus volumes de escoamento, consequentemente os níveis de tensão no fluido escoado são reduzidos, e surgem efeitos viscosos de interação fluido-superfície, que não permitem uma total garantia de estabilidade das linhas de corrente durante o seu escoamento, entretanto, simulam o fenômeno em campo nesses níveis de tensão.

2.5.2.1 Ensaio de Inderbitzen

Segundo Stephan (2010), Inderbitzen em 1961 idealizou um equipamento com a finalidade de monitorar o volume de perdas de solos em decorrência dos processos erosivos provocados pela água, conforme a Figura 35.

Figura 35 – Equipamento de Inderbitzen em sua concepção original

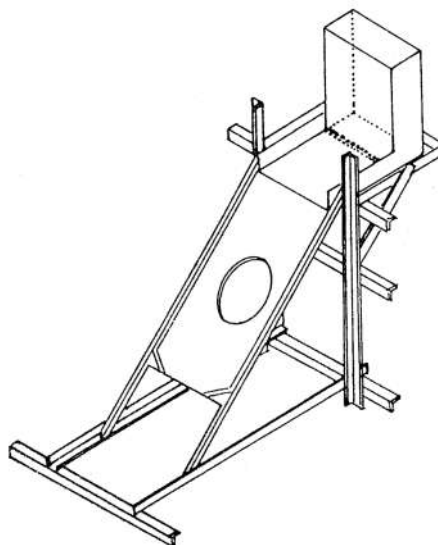


Fonte: Bastos apud. Inderbitzen (1961) e Stephan (2010)

O equipamento consiste em um canal hidráulico onde é acoplado uma amostra indeformada, expondo-a rente à base do canal, posteriormente submetido a um fluxo de água controlado, e registrando, periodicamente a quantidade de material que é erodido e carregado por unidade de tempo.

Conforme Bastos (1999) o equipamento de Inderbitzen foi introduzido no Brasil pelo engenheiro Salomão Pinto, devido à necessidade do estudo de erosão de solos na pesquisa Estabilidade de Taludes, desenvolvida pelo IPR/COPPE/TRAFECOM, nos períodos de 1975 a 1978, sendo construído com base no esboço do equipamento do LNEC como apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Equipamento de Inderbitzen utilizado na pesquisa Estabilidade de Taludes.



Fonte: Fonseca e Ferreira (1981)

Bastos (1999) relata que na mesa redonda de erosão de estradas do 2º Simpósio de Nacional de Controle de Erosão em 1981, o professor Job Nogami, analisando a utilização do ensaio de Inderbitzen e suas restrições, destacou que o referido ensaio pode promover taxas de erosão maiores do que as que naturalmente ocorreriam em solos com boa infiltrabilidade e pouco sujeitos ao escoamento superficial, devido a não possuir o controle da circulação ou na sucção no interior da amostra, e também da perturbação do fluxo gerada na descontinuidade entre a amostra e a rampa, sendo ainda sugerido a implementação de chuva simulada ao ensaio.

Conforme Bastos (1999), após a experiência do IPR, o emprego do ensaio de Inderbitzen em âmbito nacional ressurgiu apenas em na década de 90, com os trabalhos de Fácio (1991) e Carvalho e Fácio (1994) construindo o equipamento de Inderbitzen em Brasília, em um convênio entre a empresa NOVACAP e a Universidade de Brasília – UnB.

De acordo com Stephan (2010), o ensaio de Inderbitzen ao longo dos anos foi realizado com diversas alterações, sendo elas desde características das dimensões e material da rampa até o tamanho e dimensões dos corpos de prova, conforme retratadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Aplicação e modificações do ensaio de Inderbitzen

Referência	Local de retirada das amostras	Rampa Material/dimensões (cm)	Dimensões dos corpos de prova (cm)	Condição Dos corpos de prova	Variáveis Adotadas Vazão/ declividade da rampa	Tempo Total de ensaio
BASTOS (1999)	Região Metropolitana de Porto Alegre – Rio Grande do Sul	Chapa metálica base=25,0 Comprimento= 60,0	Cilíndrica de $\phi = 9,76$ Altura= 5,0	Secas ao ar, Natural e preumedecidas	50,0 e 100,0 ml/s / 10°, 26°, 45° e 54°	20 min.
FRAGASSI (2001)	Serra de São Geraldo-MG e campus da UFV, Viçosa-MG.	PVC base=15,0cm Comprimento= 120,0	$\Phi = 15,20$ Altura = 4,0	Próximo à saturação	25,0 ml/s / 10°	30 min.
SANTOS (2001)	Santo Antônio do Leite Ouro Preto-MG	PVC base=15,0 Comprimento= 120,0	$\square = 15,20$ Altura= 4,0	Amostras Saturadas	25,0 ml/s 30 min iniciais 50,0 ml/s 100,0 ml/s e 150,0 ml/s, (Intervalos de 5 em 5 minutos) 10°	45 min.
RAMIDAN (2003)	Área de empréstimo da UHE de Itumbiara – GO	Chapa metálica Base=33,0 Comprimento= 130,0	$\phi = 10,0$ Altura= 10,0 (para solos lateríticos) $\square = 10,0$ Altura= 15,0 (demais solos)	Umidade natural	50,0 ml/s / 10°	30 min.
PAIVA (2004)	Bacia do rio Una em TaubatéSP	Chapa de aço revestida com PVC base =33,0 Comprimento= 130,0	$\phi = 15,0$ Altura = 4,5	Secas ao ar, Natural e preumedecidas	50,0 e 125,0 ml/s / 20° e 60°	120 min
MENEZES et al. (2006)	Encostas da cidade de Lavras-MG	PVC base=15,2 Comprimento = 120,0	$\square = 15,0$ Altura= 4,0	Umidade natural	25,0 ml/s / 10° e 80°	120 min
MENDES (2006)	Bom Jardim-RJ	Madeira coberta por fórmica, revestida em PVC Base= 50,0 Comprimento= 100,0	$\square = 15,0$ Altura= 10,0	Umidade natural	50,0 ml/s / 37°	60 min
Stephan (2010)	Juiz de Fora-MG	Alumínio Base= 14,4, 14,2 e 9,3 Comprimento= 170,0	Cilíndrica de $\phi = 14,4$ e quadrada de 14,2 e 9,3 respectivamente 43,0, 40,0, 42,0.	Secas ao ar, Natural e preumedecidas	16,6 ml/s / 10°	30 min.

Fonte: Adaptado, Stephan (2010).

Objetivando avaliar a erodibilidade de solos do município de Juiz de Fora no estado de Minas Gerais, Stephan (2010) empregou o ensaio de Inderbitzen com amostras cilíndricas e quadradas, com dois tamanhos distintos, afim de avaliar a influência do formato e tamanho das amostras na determinação da erodibilidade de solos, concluindo que dependendo das características dos solos pode ocorrer

variações significativas na avaliação da erodibilidade dos solos ao alterar-se as características das amostras como apresentado Figura 37.

Figura 37 – Equipamento de Inderbitzen de Stephan (2010).



Equipamento de Inderbitzen completo

Placas da base do canal hidráulico

Instalação da amostra cilíndrica

Instalação da amostra quadrada

Fonte: Adaptado de Stephan (2010).

Compreendendo as contribuições de Stephan (2010), tem-se que a determinação da erodibilidade dos solos pode ser influenciada pelo formato e tamanho do corpo de prova, contudo, tais estudos ainda são preliminares e a maior reprodutibilidade do ensaio de Inderbitzen deu-se até o momento com amostras cilíndricas de 15 ou 10 centímetros de diâmetro, dessa maneira, para a execução desta pesquisa, serão empregadas amostras cilíndricas de 10,4 cm diâmetro e 11 de altura.

Segundo Graf (1984) apud. Bastos (1999), com a Equação 1 da página.28, também apresentada por Du Boys, e através do estudo da Hidráulica de Canais, é possível o entendimento do destacamento das partículas nos processos erosivos, quando considerando que as tensões cisalhantes hidráulicas do fluxo excedem a tensão cisalhante crítica do solo. Tal ajuste da equação considera que os sedimentos se movimentam em camadas, cada uma com determinada espessura,

devido à força de tração resultante de tensões cisalhantes hidráulicos aplicados em cada uma delas.

Conforme Stephan (2010) a altura da lâmina de fluxo é obtida através da vazão, velocidade do escoamento e da largura da rampa hidráulica conforme a Equação 13.

$$h = Q / (v \cdot L) \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

h = Altura real da lâmina de fluxo (cm);

v = Velocidade do fluxo (cm/s);

Q = Vazão (cm³/s);

L = Largura da Rampa hidráulica (cm).

Empregando o coeficiente de rugosidade de Manning da Tabela 22 na Equação 14 de Chezy é possível determinar a velocidade do fluxo do filete de água utilizado no ensaio de Inderbitzen, contudo, devido a simplificações intrínsecas à presente equação, e também à sua recomendação para atuação apenas em pequenas inclinações, o valor obtido será como apenas comparativo como a técnica de corante a ser utilizada.

$$v = R_h^{1,5} \cdot I^{0,5} \cdot 1/\eta \quad \text{Equação 14}$$

Sendo:

R_h (cm) = Raio Hidráulico = Área Molhada / Perímetro Molhado;

I = declividade (adimensional – cm/cm);

η = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional).

Tabela 22 – Coeficiente de rugosidade de Manning.

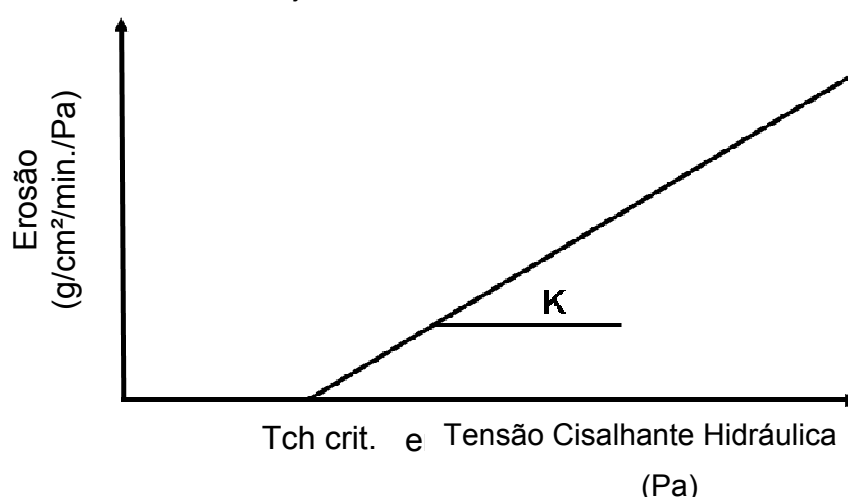
Material	Coeficiente (η)
Acrílico em boas condições	0,009
Plástico, fibrocimento, alumínio, aço inoxidável, aço galvanizado, latão	0,011
Ferro fundido, concreto alisado, alvenaria revestida	0,012
Cerâmica e concreto não alisado	0,013
Alvenaria de tijolos não revestida	0,015

Fonte: Adaptado de Tomaz (2005) e Henderson (1980) e Silva (2013).

Com os dados da velocidade real encontrada utilizando recursos técnicos visuais é possível empregar a Equação 14 de Chezy, determinar o seu coeficiente de Manning da calha de escoamento e a sua correspondente velocidade teórica de escoamento para o respectivo coeficiente. Com a velocidade real e a velocidade teoria é também possível a realização da determinação da altura do filete de escoamento teórica e real.

Empregando o valor da Tensão Cisalhante Hidráulico do ensaio (T_{ch}) da Equação 1, com a perda de solo por unidade de área e de tempo ($\text{g/cm}^2/\text{min.}$), desenvolve-se o gráfico da Figura 38, e, segundo Stephan (2010), realiza-se o ajuste da tendência de erosão para uma reta, e, desse modo, possibilitando estimar o parâmetro K de erodibilidade do solo, bem a como tensão cisalhante hidráulica crítica ($T_{ch \text{ crit.}}$), que expressa o limiar do nível de tensão hidráulica que o solo pode suportar sem que inicie o desenvolvimento de processos erosivos.

Figura 38 – Representação da Taxa de material erodido pela sua respectiva tensão hidráulica e o ajuste linear da tendência de erosão.



Fonte: Autoria própria.

Os níveis de tensões hidráulicas aplicadas são normalmente baixos e os valores das taxas de erodibilidade variados, sendo comum em casos onde se encontram taxas negativas, a determinação de que não há erodibilidade, adotando-se o valor zero. Contudo, para a determinação da tensão crítica hidráulica é realizada a regressão linear da tendência de erosão até o cruzamento do eixo das abscissas, sendo ainda que caso o valor encontrado seja inferior a zero adota-se como **indeterminado**, como apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Alguns valores de Erodibilidade do Inderbitzen encontrados em pesquisas.

Localidade e autor	Amostra	Condição	Range de Tensões ³ (Pa)	Erodibilidade - K (g x min./cm ² /Pa)	Tch ⁴ (Pa)
Porto Alegre - RS (Bastos, 1999)	ALGB	Seca ar	1,13 a 2,74	0,1290	1,00
		W nat.	1,13 a 2,74	0,0007	indet.
		Pré- umid	1,13 a 2,74	0,0003	indet.
	ALGC	Seca ar	1,13 a 2,74	0,2670	0,69
		W nat.	1,13 a 2,74	0,2830	0,70
		Pré- umid	1,13 a 2,74	0,2810	0,86
	RS239 BC	Seca ar	1,13 a 2,74	0,2280	0,28
		W nat.	1,13 a 2,74	0,0065	0,77
		Pré- umid	1,13 a 3,24	0,0004	indet.
	RS239C	Seca ar	1,13 a 2,74	0,0360	indet.
		W nat.	1,13 a 2,74	0,0150	0,25
		Pré- umid	1,13 a 2,74	0,0000	indet.
	PTB	Seca ar	1,13 a 2,74	0,1480	1,17
		W nat.	1,13 a 3,24	0,0000	indet.
		Pré- umid	1,13 a 3,24	0,0009	indet.
	PTC	Seca ar	1,13 a 2,74	0,3300	0,63
		W nat.	1,13 a 2,74	0,3630	0,79
		Pré- umid	1,13 a 2,74	0,3650	1,00
	CDB	Seca ar	1,13 a 2,74	0,1900	1,25
		W nat.	1,13 a 3,24	0,0047	indet.
		Pré- umid	1,13 a 3,24	0,0029	indet.
CDC	Seca ar	1,13 a 2,74	0,2590	1,05	
	W nat.	1,13 a 2,74	0,0630	0,56	
	Pré- umid	1,13 a 2,74	0,0360	0,56	
Recife - PE Couto, 2008)	P-01	Seca ar	0,81a 2,31	0,7966	0,66
		W nat.	0,81a 2,31	0,7902	0,44
		Pré- umid	0,81a 2,31	0,7914	0,70
	P-02	Seca ar	0,81a 2,31	0,7424	0,70
		W nat.	0,81a 2,31	0,7138	0,43
		Pré- umid	0,81a 2,31	0,7234	0,72
Juiz de Fora - MG (Stephan, 2010)	Morro do Alemão	Pré- umid	0,84 a 1,13	0,0000	indet.
	Jardim Caiçaras	Pré- umid	0,84 a 1,13	0,0210	0,12
	Bom Jardim	Pré- umid	0,84 a 1,13	0,0430	0,42

Fonte: Adaptado de Bastos (1999), Couto (2008) e Stephan (2010)

Conforme Bastos (1999), a hipótese de linearidade entre as tensões cisalhantes e as taxas de erosão nem sempre é verificada em estudos práticos, contudo, tal hipótese é aceita em diversos modelos de erosão, e, conforme Stephan (2010), geralmente pode-se considerá-la precisa segundo análises experimentais em campo.

³ Range de Tensões: valores mínimos e máximos de tensões hidráulicas aplicadas.

⁴ Tch: Tensão Crítica Hidráulica necessária para iniciar processos erosivos laminares.

2.5.2.2 Ensaio de Desagregação - Slaking Test

Conforme Bastos (1999) o ensaio de Desagregação Slaking test evoluiu do ensaio “Crumb test”, o qual tinha como objetivo identificar solos que possuíam agregações passíveis de dispersão quando imersas em água, contudo, com a sua evolução, o seu objetivo tornou-se o de verificar a estabilidade à desagregação de amostras cúbicas ou cilíndricas, independentemente da dispersão da amostra desagregada.

A engenheira Anna Margarida Fonseca foi a responsável pelo desenvolvimento e a aplicabilidade do ensaio de desagregação para finalidades geotécnicas na construção de Brasília.

Segundo Santos (1997) e Santos e Carvalho (1998) o emprego do ensaio de desagregação possibilita uma análise qualitativa da amostra, e a metodologia do ensaio pode ser descrita da seguinte maneira: inicialmente molda-se cubos de 6 cm de aresta, com amostras indeformadas, extraídas do local de estudo e posteriormente realiza-se a Imersão Total ou a Imersão Parcial. No Primeiro modo, de Imersão a amostra é posta sob uma pedra porosa e imersa completamente em água destilada de uma só vez por um período de 24 horas. Já no segundo modo, a imersão é realizada de modo Parcial e gradualmente aumentada, sendo inicialmente a amostra colocada sob uma pedra porosa e dentro de uma bandeja com água no nível da base (face inferior) da amostra, posteriormente, ao decorrer 30 minutos, acrescenta-se mais água até o nível de 1/3 da amostra, aguarda-se por mais 15 min. para elevar o nível de água até 2/3, e após novos 15 min, realiza-se a completa imersão dela aguardando por um período de 24 horas e registando-se fotograficamente todas as etapas realizadas, como apresentado na Figura 39.



Fonte: Santos (1997).

Para a realização deste ensaio, Carvalho *et al.* (2006) recomenda a utilização de recipientes de imersão independentes para que a solubilização de uma determinada amostra não altere as características da água do ensaio.

Para realizar a análise dos tipos de reações à inundação que as amostras apresentaram durante o ensaio, SANTOS (1997) recomenda a utilização da classificação conforme a categoria de desestruturação como:

- a) **Sem Resposta:** quando a amostra mantém sua forma e tamanho original
- b) **Abatimento (slumping):** quando ocorre a desestruturação da amostra forma pilhas de material em sua base.
- c) **Faturamento:** quando a amostra se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas.
- d) **Dispersão:** quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma espécie de nuvem coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

Carvalho *et al.* (2006) ressalta que os mecanismos que promovem o **Abatimento** das amostras são devidos à hidratação e desaeração, gerando pressões positivas dentro da amostra; já no caso do **Faturamento**, o seu principal mecanismo é a expansão osmótica, a qual ocorre quando a concentração de íons dentro da fase sólida é superior à da solução ambiente, fazendo com que a água tenda a mover-se para o interior da amostra reduzindo esta concentração e promovendo a sua expansão e, conseqüentemente o faturamento; e para o caso da **Dispersão**, é entendido que ocorre o aumento das pressões de expansão de modo que são suficientemente capazes de causar a separação entre partículas individuais, sendo justificado que a principal condição para a ocorrência deste fenômeno é a

presença de sódio no sistema. Contudo, outros fatores como a concentração de sais, o pH da amostra e a sua umidade inicial podem influenciar na sua dispersão.

2.5.2.3 Pinhole Test

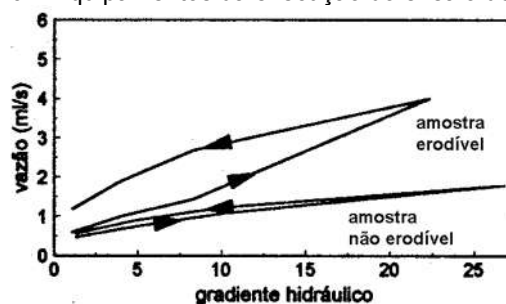
De acordo com Bastos (1999), o ensaio de “Pinhole”, ou de Furo de Agulha, é um dos ensaio que mais são empregados para a identificação de solos dispersivos, e segundo Carvalho (2006), é normatizado no Brasil pela NBR 14114/98 da ABNT, sendo que a presente norma segue a metodologia apresentada por Sherard *et al.* em 1976.

O ensaio consiste em colocar uma amostra de solo indeformada em um tubo, realizar um furo de 1mm de diâmetro em seu interior e na aplicação de sucessivas cargas hidráulicas registrar a sua correspondente vazão hidráulica e as suas características visuais de turbidez, na tentativa de simular o efeito “*piping*”.

Após a realização do ensaio, a amostra é extraída do tubo e seccionada em duas partes para a verificação das condições do furo de 1 mm de diâmetro, anteriormente executado, e caso ocorra significativas variações, isto indica que o referido solo é propício ao desenvolvimento de processos erosivos internos.

Com os dados de carga hidráulica e vazão do ensaio de “Pinhole”, é desenvolvido o gráfico que expressa o comportamento da amostra durante o ensaio, facilitando a observação de alterações da estrutura interna da amostra e de suas propriedades hidráulicas, conforme a apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Equipamentos da execução do ensaio de Pinhole



Fonte: Santos e Carvalho (1998).

Segundo Carvalho (2006), o ensaio de “Pinhole” em solos tropicais tende a não apresentar elevadas variações, mas, conforme, SANTOS (1997) em baixos níveis de cargas hidráulicas, é possível identificar algumas alterações neste ensaio

que possibilita um entendimento do comportamento da estrutura do solo e contribui para o entendimento da desagregação.

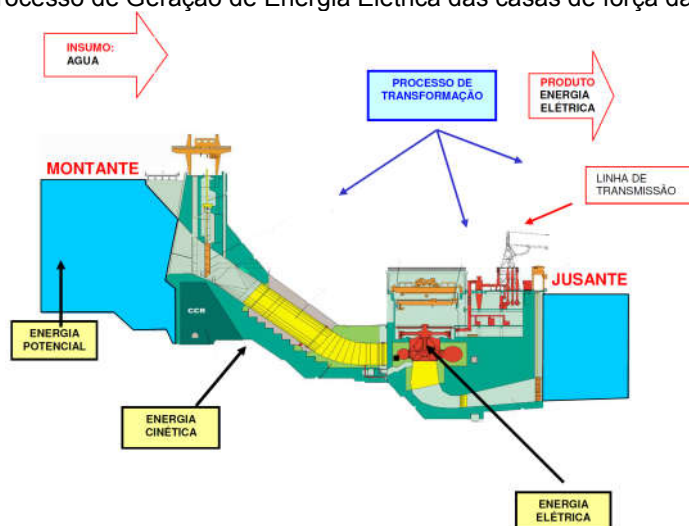
3. ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

3.1 CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO

A concepção e implantação da UHE Tucuruí deram-se no contexto histórico dos fins da década de 60 ao início dos anos 80. Sendo tida como parte de um projeto nacional, foi construída com uma elevada intervenção estatal e com a disponibilidade de créditos internacionais a juros baixos. Sua construção iniciou em 1975, necessariamente para atender às novas demandas dos projetos minero-metalúrgico⁵ da parte norte do país e o suprimento de energia das cidades de Belém, São Luiz e Marabá (CMB, 1999).

De acordo com Pena (2018), a UHE Tucuruí é atualmente a quinta maior hidrelétrica do mundo, tendo mais de 30 anos e implantada no bioma Amazônico é tida conforme CMB (1999), como um marco para o Brasil e o mundo. Seu sistema de geração de energia transforma a energia potencial da água armazenada, em energia cinética e posteriormente em energia elétrica, a qual é direcionada a linha de transmissão, onde o Operador Nacional do Sistema elétrico realiza a sua distribuição para os outros estados como ilustrado na Figura 41 e na Figura 42.

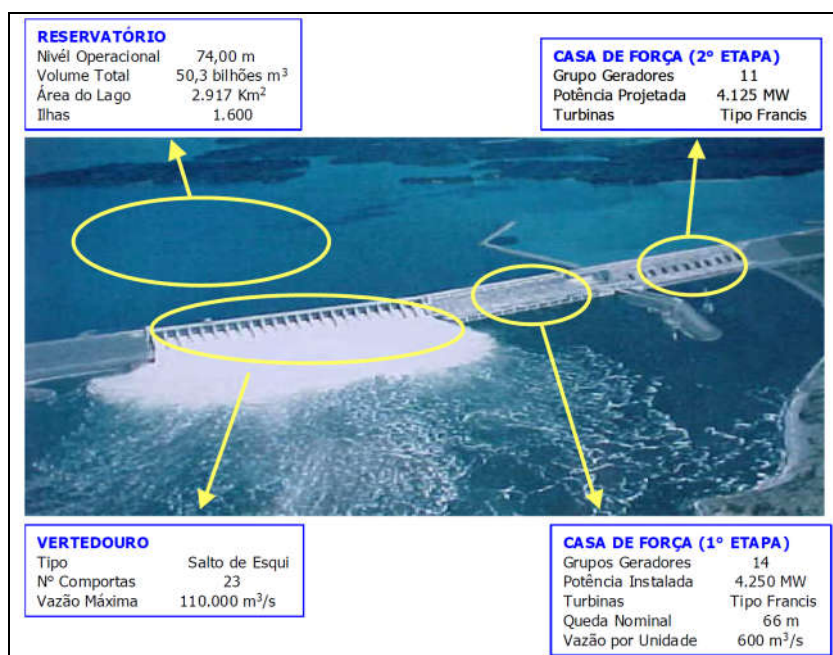
Figura 41 – Processo de Geração de Energia Elétrica das casas de força da UHE Tucuruí.



Fonte: Eletronorte (2018).

⁵Conforme a Comissão Mundial de Barragens as principais industriais foram ALUMAR, ALBRAS, ALUNORTE, Companhia Vale do Rio Doce – CVR e a Camargo Correa Metais – CCM, com demandas médias respectivamente de 662 MW, 625 MW, 160 MW, 31 MW e 16 MW.

Figura 42 – Distribuição dos principais elementos operacionais da UHE Tucuruí



Fonte: Eletronorte (2018)

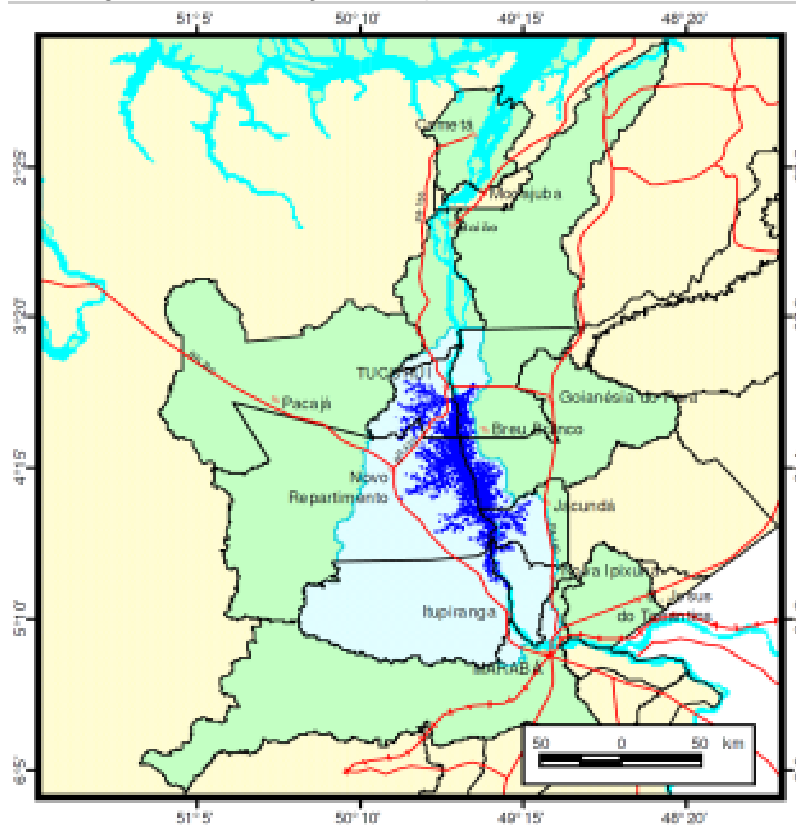
O modelo de geração elétrica da UHE Tucuruí utiliza turbinas do tipo Francis, operando com desníveis não tão elevados, mas com maiores consumos de água, e segundo Eletronorte (2018), em sua máxima cota de reservamento, possui um reservatório de aproximadamente 50,3 bilhões de metros cúbicos de água acumulada, e em seu eixo longitudinal, uma extensão de 175 km, sendo o seu provimento dado pela Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia à qual está inserida, que possui uma vazão média estimada de 10.950 m³/s provenientes de uma área de drenagens de 767.000 km²

A área de influência da usina abrange vários municípios, podendo eles serem agrupados em município a montante⁶ como Tucuruí, Novo Repartimento, Itupiranga, Breu Branco, Goianésia do Pará, Jacundá e Ipixuna; e os municípios à jusante⁷, como Baião, Mocajuba, Cametá, Limoeiro do Ajuru e Igarapé Miri conforme a Figura 43.

⁶ Direção voltada para antes da usina hidrelétrica e no sentido do curso do rio que alimenta o reservatório, sendo neste caso o rio Tocantins

⁷ Direção voltada para depois da usina hidrelétrica e no sentido do rio que a alimenta.

Figura 43 – Localização do empreendimento UHE Tucuruí.

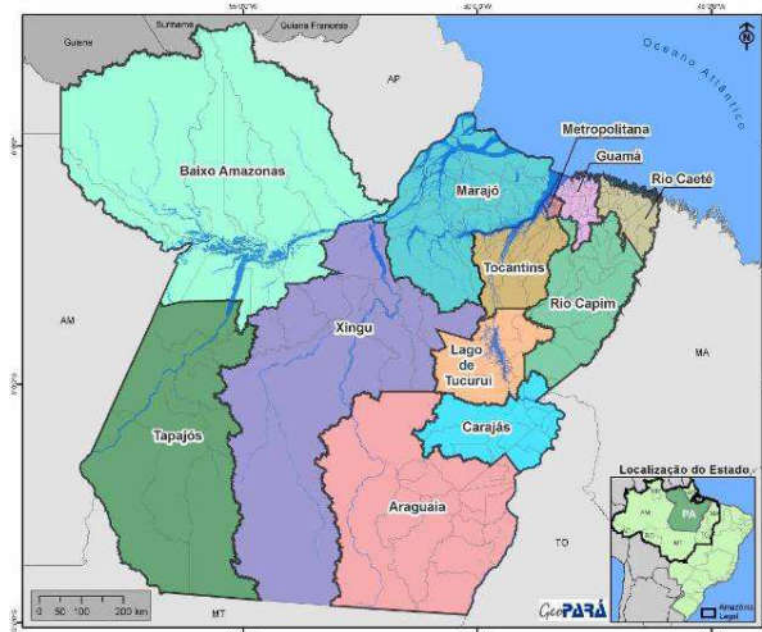


Fonte: Manual do Sistema de Gestão Ambiental- UHE Tucuruí (2018).

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOPOLÍTICAS DA REGIÃO LAGO DA UHE TUCURUÍ.

O estado do Pará é composto por 12 regiões de integração, que baseadas na inclusão social, redução das desigualdades inter-regionais, no respeito a cultura, no fomento às atividades econômicas, e outras características mais, são tidas como instrumento de planejamento e operacionalização, objetivando integrar as ações do Governo Federal, Estadual e Municipal, incluindo-se ainda na concepção do Plano Amazônico Sustentável – PAS e na formulação de crescimento encontrada no Programa de Aceleração do Crescimento – PAC, conforme Figura 44.

Figura 44 – Regiões de integração do estado do Pará



Fonte: SEIR/GeoPARÁ (2008).

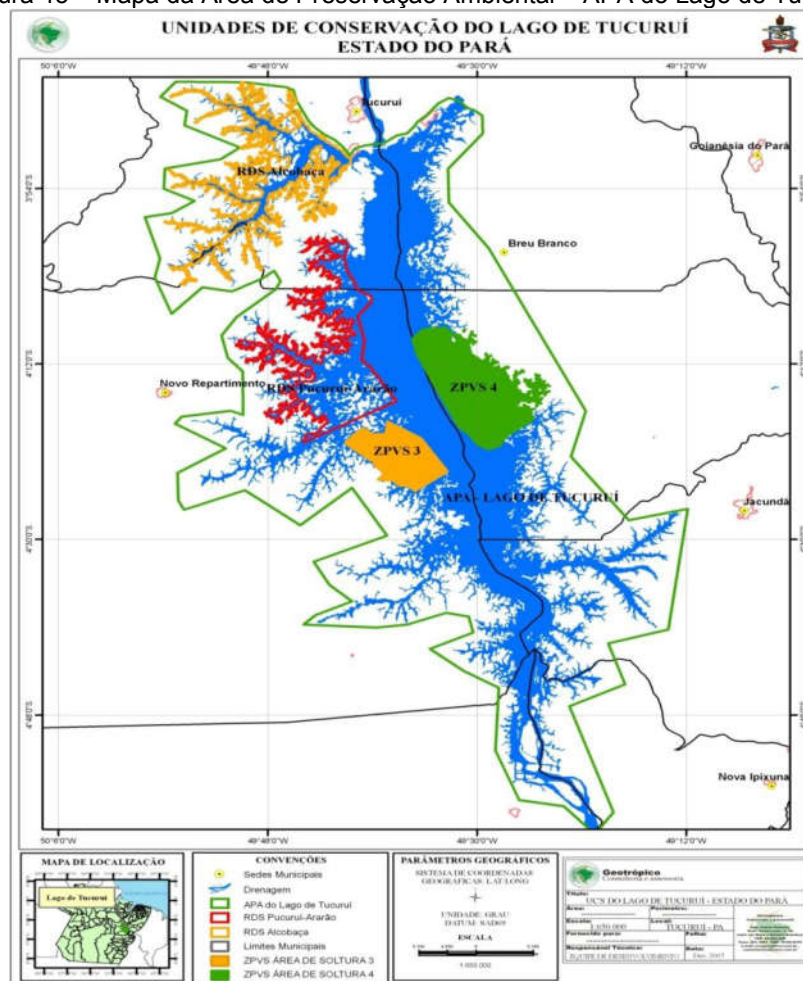
A região de integração do Lago de Tucuruí é composta apenas pelos municípios à montante do reservatório, sendo inclusive estabelecido o espaço do lago como a área intitulada mosaico de unidades de conservação⁸, do qual é composto pela Área de Proteção Ambiental – APA do lago de UHE Tucuruí com 588.667 ha, pelas Reservas de Desenvolvimento Sustentável – RDS Alcobaça com 36.128 ha e Pucurui-Ararão com 29.049 ha e pelas Zonas de Proteção da Vida Silvestre – ZPVS, criadas pela Lei Nº 6.451:2002 conforme a Figura 45.

Conforme Eletronorte (2018), devido ao momento em que foi construída a primeira fase da usina, ocorreu que naquela época ainda não haviam legislações específicas sobre avaliações dos impactos socioambientais, mas dada a constituição de 1988, teve-se que realizar as solicitações das Licenças Prévia, de Instalação e Operação e estabelecer-se planos de avaliação dos programas de controle ambiental anteriormente implementados. Dos programas ambientais que foram implementados, pode-se destacar o Programa de Liminologia e Qualidade da água, Fiscalização dos Recursos Naturais, Banco de Germoplasma Florestal e o Programa

⁸ Os mosaicos são expressos pela criação de unidades de conservação, sendo a combinação de unidades de uso protegido com as de uso sustentável (Monteiro *et al.* (2005)

Indígena Parakanã, porém apenas alguns mantem-se em pleno funcionamento nessa década.

Figura 45 – Mapa da Área de Preservação Ambiental – APA do Lago de Tucuruí.



Fonte: Araujo e Rocha (2008).

3.3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE DRENAGEM DO LAGO DA UHE TUCURUÍ.

Conforme ANEEL (2000), estima-se uma vida útil do reservatório da UHE Tucuruí de aproximadamente 1.000 anos, contudo, estudos hidrossedimentológicos realizados pela ELETRONORTE (1988) *apud* Fearnside (2015), e apontados no relatório da Comissão Mundial de Barragens – CMB (2000), sugerem uma vida útil de 400 anos para o reservatório, sendo tal estimativa feita adotando dados de produção sedimentológica das campanhas de 1982, e estabelecendo a cota de 23 m como limite para a deposição com segurança dos sedimentos, de modo que não

viesses alcançar a cota de 27 m, das tomadas de águas da usina hidrelétrica e a causarem a abrasão das turbinas.

A CMB (2000) já destacava a falta de dados hidrossedimentológicos posteriores ao enchimento do reservatório, para verificação das taxas de sedimentação e conseqüentemente da vida útil do reservatório, sendo ressaltado ainda por Fearnside (2015) que atualmente a situação é completamente diferente, com áreas desmatadas para finalidades agrícolas ou pecuárias que poderiam aumentar a taxa de erosão dos solos e subseqüentemente a taxa de sedimentos direcionados aos seus contribuintes e estes ao reservatório.

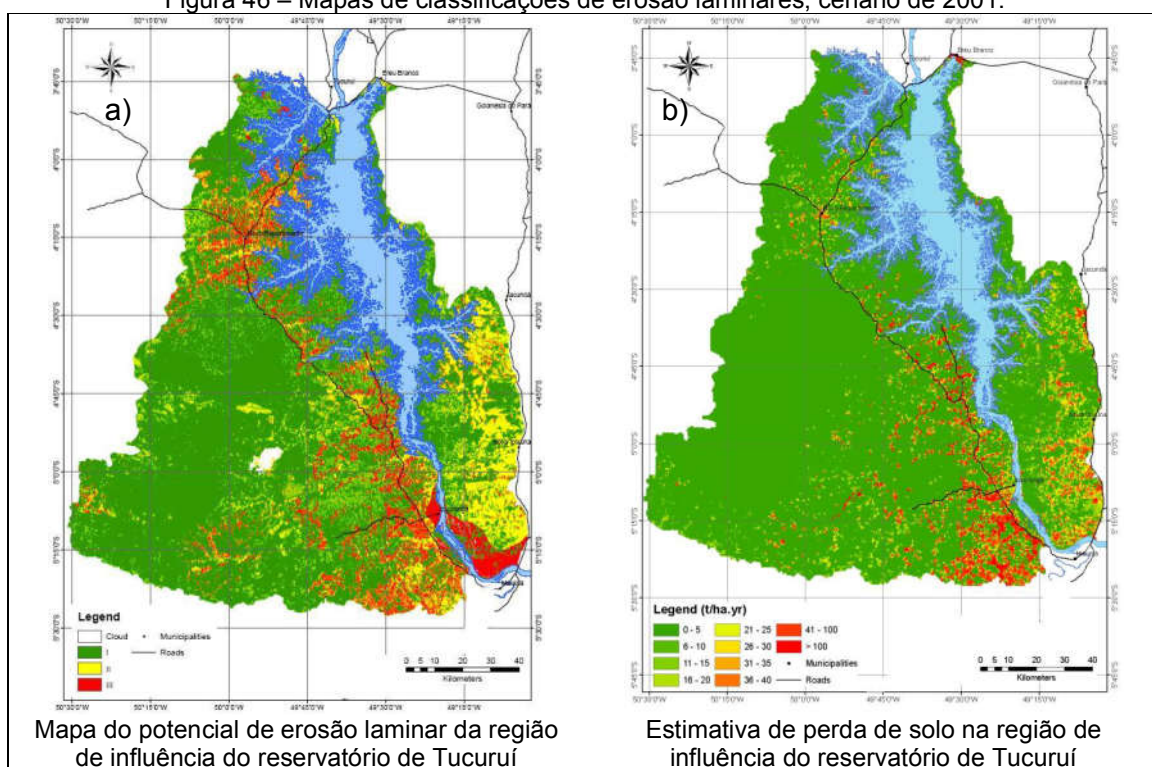
Buscando avaliar os sedimentos do reservatório da usina hidrelétrica de Tucuruí, a Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. - ELETRONORTE fomentou o projeto de número 145, intitulado “Estudos e estratégias para a utilização de sedimentos acumulados nos reservatórios de hidrelétricas”, de forma a resolver conflitos sócio ambientais, executado pelas Universidades Federais de Brasília e do Pará, durante o período de 2003 a 2004, coordenado pela Dra. Suzi Maria de Cordova Huff Theodoro, possuindo um custo de R\$ 399.335,00 reais (ELETRONORTE, 2019).

Grandes foram as contribuições deste projeto de pesquisa, sendo publicado seu relatório técnico em 2007 e apresentado também no 5º Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, sugerindo a possibilidade do emprego dos sedimentos como fertilizantes naturais nas culturas locais, e que, com base em análise computacional, usando imagens do satélite Landsat de 2001 e características geológicas, o reservatório possui em sua maioria baixa erodibilidade (THEODORO *et al.* 2009).

Macedo *et al.* (2007) analisando as características geopedológicas, geomofológicas e as de cobertura de solo das imagens Landsat de 2001 conclui que 73,2% do reservatório apresenta o potencial de erosão linear da classe I (baixo potencial: uso da terra compatível com a suscetibilidade à erosão laminar), mas destaca que 19,91% deste total se refere à área indígena Parakanãs, sendo ainda apresentado que 16,5% e 10,3% são correspondentes, respectivamente, às classes II (potencial médio: uso real do solo, incompatível com a suscetibilidade à erosão laminar, possível controlar com práticas conservacionistas adequadas) e III (alto potencial: uso real do solo incompatível com suscetibilidade à erosão laminar), conforme a Figura 46a.

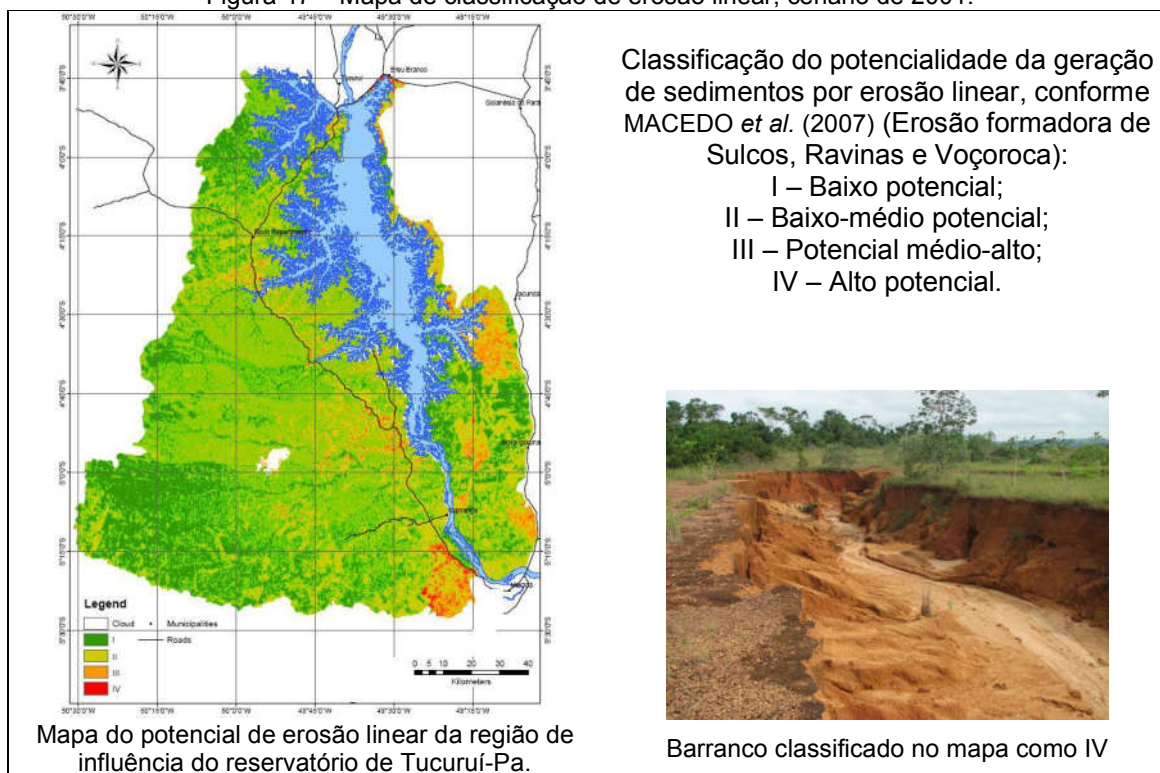
Verificando computacionalmente com o modelo de Morgan Morgan Finney – MMF, Macedo *et al.* (2007) também estabeleceu que as perdas de solo da região em análise eram baixas (inferiores a 5 t / ha / ano) em áreas de florestas densas ou em regeneração; que as perdas de solo máximas eram de até 40 t / ha / ano em regiões de solo exposto e que nas áreas de pastagem eram de 6 t / ha / ano, como representado na Figura 46b e correlacionando os mapas citados com uso e ocupação do solo como com novas classes de erosão linear, obteve a Figura 47, que com visitas em campo permitiram a sua validação, com identificações de processos de voçorocamento na região classificada na categoria IV.

Figura 46 – Mapas de classificações de erosão laminares, cenário de 2001.



Fonte: Adaptado de Macedo *et al.* (2007).

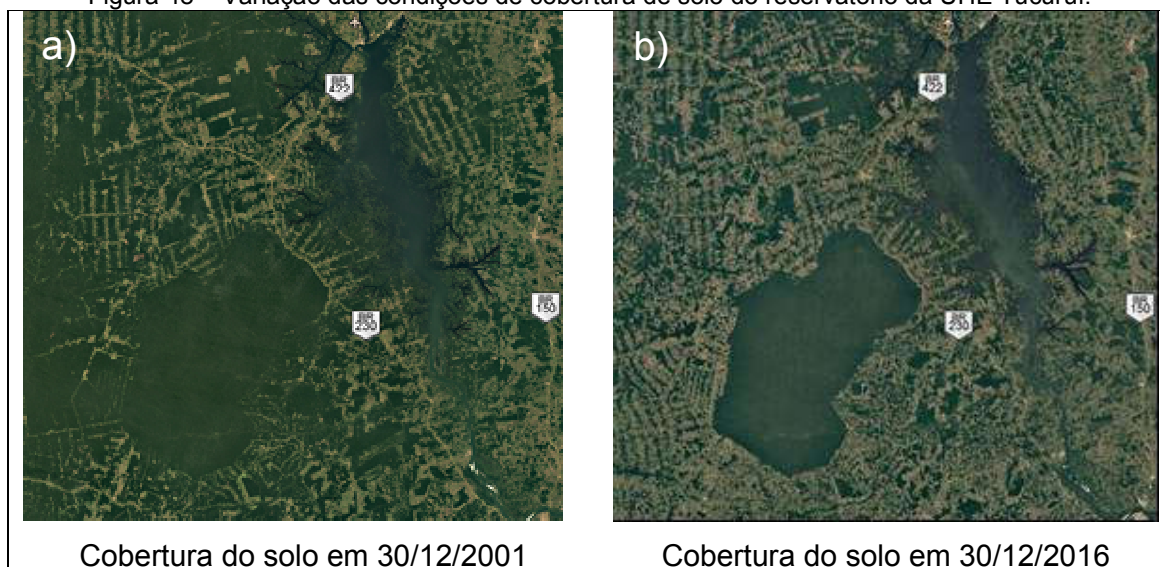
Figura 47 – Mapa de classificação de erosão linear, cenário de 2001.

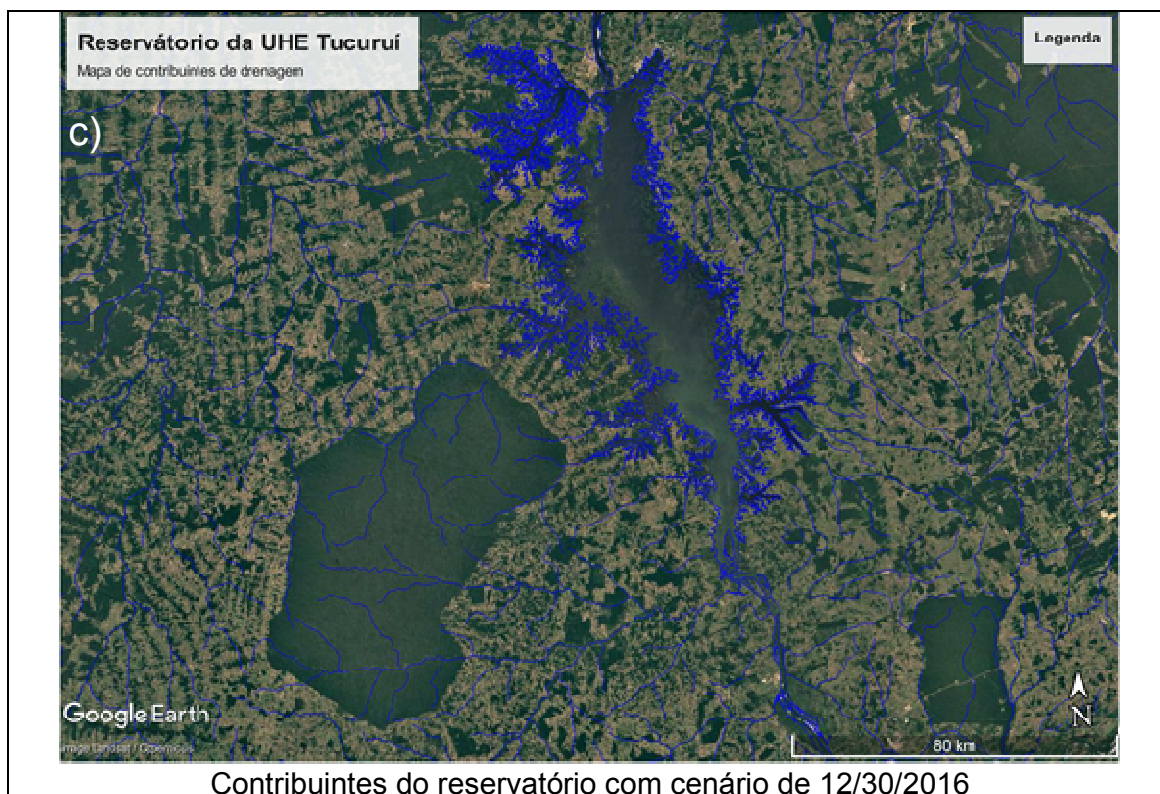


Barranco classificado no mapa como IV

Grandes foram as contribuições de Macedo *et al.* (2007), contudo, o cenário de uso e cobertura dos solos atual é muito distinto, sendo nitidamente observado a permanência preservada da área da reserva indígena Parakanãs como polígono semirretangular nas Figura 48a e Figura 48b de mesma escala e região, sendo ainda observada a exposição dos contribuintes no novo cenário na Figura 48c.

Figura 48 – Variação das condições de cobertura de solo do reservatório da UHE Tucuruí.





A transformação da área do reservatório foi analisada em diferentes escalas temporais e espaciais, sendo analisada o espaço do reservatório dos anos de 1996 a 2001 por Vasconcelos e Novo (2004), foi identificada uma leve redução das áreas de florestas; e verificando o reservatório dos anos de 1988 a 1999, por Montoya *et al.* (2018) constatou as taxas de desmatamento estavam em 70,673 ha/ano, já, analisando a área do Município de Novo Repartimento dos anos de 2000 a 2013, Farias *et al.* (2018) verificou um incremento de áreas desmatadas de 141,67%. Desse modo, pode-se observar a redução das áreas de florestas e a modificação do cenário hidrossedimentológico do lago de Tucuruí mencionado por Fearnside (2015).

3.4 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E PEDOLÓGICAS DO LAGO DA UHE TUCURUÍ

De acordo com CMB (2000), a bacia hidrográfica do Tocantins localiza-se por completo na província geológica da Amazônia Oriental e é caracterizada por ambientes geológicos distintos, em função da época em que se originaram e pelos dois eventos tectônicos a que estiveram submetidas. Em especial, a área de influência do reservatório de Tucuruí é caracterizada por dois domínios geológicos, sendo um o embasamento cristalino, constituído por rochas ígneas e

metassedimentares e outro por cobertura sedimentar, constituída por sedimentos que se depositaram durante os períodos mesozóico e cenozóico (terciário e quaternário. Dessa maneira o reservatório está situado na zona de contato entre as rochas cristalinas do Complexo Xingú (margem esquerda) e rochas metamórficas de baixo grau, do grupo Tocantins (Margem esquerda, leito do rio e margem direita) (CMB, 1999).

Ainda conforme CMB (1999), o local de implementação da barragem de Tucuruí se situa no fim de um longo trecho encachoeirado que pode ser dividido em três unidades de relevo, como o Planalto Setentrional Pará-Maranhão, Planalto Rebaixado do Amazonas e a Depressão Periférica do Sul do Pará, que abrange quase por completo a área do reservatório, tendo ainda sua origem relacionada à atuação de processos erosivos iniciados no final do período terciário, apresentando inclusive várias formas de relevo na região, como áreas com superfícies pediplanadas, áreas dissecadas em colinas de topo aplainado e planícies fluviais.

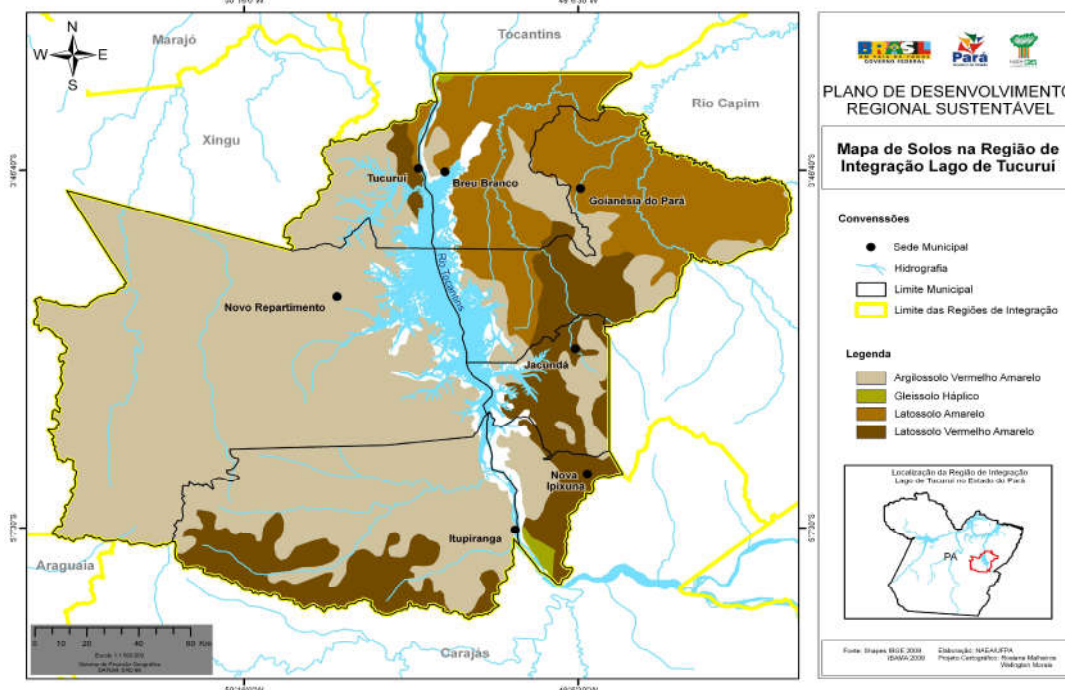
Segundo IBGE (2002), citado pelo Plano Desenvolvimento Regional Sustentável do lago da UHE Tucuruí (2018), os solos que perfazem o reservatório da UHE Tucuruí são predominantemente Argissolos, Latossolos Vermelhos Amarelos, Latossolos Vermelhos, e, em seu leito, depósitos de materiais sedimentares conforme a Figura 49, com as respectivas cores cinza, marrom claro, marrom escuro e branco, sendo, conforme a Comissão Mundial de Barragens – CMB (2000), tidos normalmente como ácidos, de baixa fertilidade natural e quantificados em 60% Argissolos, 25% Latossolos Vermelhos-Amarelos e Amarelos e 15% de outros tipos.

Quando muito grande, a escala do mapa, pode-se ocorrer na omissão de variações pedológicas, ou, também, quando pequenas, podem destacar com mais detalhes e menos erros os solo que estão no espaço amostral analisado.

O mapa apresentado pelo IBGE (2002) *apud*. PDRS (2018), com sua escala de 1:1.500.000, possibilita uma análise superficial das distinções dos solos, contudo, para um estudo mais aprofundado (como neste estudo), recomenda-se a utilização dos mapas pedológicos dos Planos Diretores dos municípios de Tucuruí, Breu Branco, Nova Ipixuna, Jacundá, Itupiranga, Goianésia, com exceção do de Novo Repartimento, que foram adquiridos na plataforma online da antiga Secretaria de Estado de Integração Regional Desenvolvimento Urbano e Metropolitano –

SEIDURB / SEDURB, com escalas de 1:400.000 e 1:300.000 dos Anexo V, Anexo VI , Anexo VII, Anexo VIII, Anexo IX e Anexo X.

Figura 49 – Mapa pedológico de solos da área de Integração do lago de Tucuruí.



Fonte: Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável – PDRS do lago de Tucuruí.

3.5 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DOS SOLOS

Objetivando analisar as condições de sustentabilidade da Reserva de Desenvolvimento Sustentável – RDS Alcobaça, Barata (2011) realizou diversos vãos de reconhecimento, de modo a obter um panorama das condições atuais de uso e ocupação da referida região, e pôde constatar que existiam diversas áreas onde poderia ser observado a interação do lago com as encostas das ilhas, como mostra na Figura 50.

Figura 50 – Vistas aéreas da região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável – RDS Alcobaça, registradas por Barrata (2011).



Fonte: Adaptado de Barrata (2011) em 2011.

Além das observações aéreas, Barrata (2011), realizando observações de campo, evidenciou a instalação de processos erosivos em determinadas regiões, destacando a necessidade do aumento dos cuidados com os solos dessas áreas, como apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Manifestação de processos erosivos acelerados observados por Barrata (2011).





Fonte: Adaptado de Barrata (2011).

Compreendendo a extensão do reservatório e a necessidade de estudos da erodibilidade dos solos que o compõem, definiu-se que seriam realizadas avaliações em laboratório do potencial de erodibilidade dos três tipos de solos pedologicamente predominantes, sendo feitas também visitas de campo em regiões onde poderiam ser encontradas tais solos.

Empregando os mapas pedológicos dos Anexo V e Anexo VI, com o auxílio do software Google Earth estabeleceram-se as rotas que foram utilizadas conforme a Figura 52, sendo constatada a instauração de processos erosivos laminares e lineares como mostram as Figura 53, Figura 54 e Figura 55.

Figura 52 – Caminhos utilizados nas visitas as distintas formações pedológicas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Feições erosivas verificadas na região do Argissolo



Processos erosivos laminares, lineares e com participação de solapamentos



Formação de sulcos



Formação de ravinas

Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Feições erosivas verificadas na região do Latossolo Amarelo



Processos erosivos laminares, lineares e com participação de solapamentos

Fonte: Autoria própria.

Figura 55 – Feições erosivas verificadas na região do Latossolo Vermelho



Formação de sulcos

Material em suspensão

Fonte: Autoria própria.

A definição dos locais de coleta e amostragem foi realizada considerando a premissa da similaridade pedológica do solo, de suas feições erosivas e acessibilidade dos locais, sendo deslocado os locais de amostragem do Latossolo Amarelo e do Latossolo Vermelho, conforme apresentado na Tabela 24 e na Figura 56.

Tabela 24 – Coordenadas Geográficas do locais de amostragem

Amostra	Latitude	Longitude
Argissolo	3°46'3.76"S	49°45'26.57"O
Latossolo Amarelo	3°46'28.19"S	49°35'15.06"O
Latossolo Vermelho	3°47'13.50"S	49°40'40.38"O

Fonte: Autoria própria.

Figura 56 – Locais de amostragem distintas formações pedológicas.



Fonte: Autoria própria.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ATIVIDADES DE CAMPO

Inicialmente foram realizadas visitas de campo nas áreas da borda do reservatório das três formações pedológicas por meio de vias terrestres, avaliando visivelmente se os solos existentes em cada região vistoriada condizia com a classificação de solos pedológica do mapa, sendo concomitantemente observado os principais processos erosivos.

4.1.1 Determinação dos locais de amostragem

A seleção e determinação dos locais de amostragem foi realizada considerando quatro características fundamentais:

- Característica pedológica evidenciada em campo e apontada pelo mapa pedológico do município;
- Similaridade de comportamento aos processos erosivos mais frequentes com base nas observações de campo;
- Acessibilidade do local de amostragem com a caminhonete da universidade;
- Não presença de pedregulhos, para avaliar o maior potencial de erosão.

O primeiro local de amostragem selecionado foi na região pedológica Argissolo, acessado por vias terrestres vicinais não pavimentadas do município de Tucuruí, com sua principal estrada rural denominada Bom Jesus e coordenadas de latitude 3°46'3.76"S e longitude 49°45'26.57"O.

O segundo local de amostragem amostrado foi na região pedológica de Latossolo Amarelo, acessado por vias terrestres pavimentadas até o município de Breu Branco, com as coordenadas de latitude 3°46'28.19"S e longitude 49°35'15.06"O.

O terceiro local de amostragem foi na região pedológica de Latossolo Vermelho, acessada por vias terrestres pavimentadas, até o centro de Tucuruí nas proximidades do Baixo Cristo Vive, com as coordenadas de latitude 3°47'13.50"S e longitude 49°40'40.38"O.

4.1.2 Amostragem

As amostras foram recolhidas de maneira indeformada de acordo com a NBR 9604/2016, contudo, empregou-se adaptações do processo de amostragem, como foi proposto por Stephan (2010) e Ribeiro (2016) sem que modificasse quaisquer das características da amostra e melhorando a sua trabalhabilidade e transporte.

Foram georreferenciados os locais de amostragem e para a sua extração, a comum caixa de madeira sugerida pela norma NBR9604/2016 foi inicialmente substituída por um cilindro metálico, tripartido, rígido, com as dimensões de 17 cm de diâmetro e 27 cm de altura e com a possível adição e preenchimento dos espaços vazios com parafina como proposto por Stephan (2010) e Ribeiro (2016). Entretanto, devido a impossibilidade de execução em campo, pela fragilidade do solo fino coletado, optou-se apenas pela extração das amostras indeformadas dentro do cilindro biselado como apresentado NA Figura 57.

Figura 57 – Material para o transporte de amostras indeformadas.



Fonte: Autoria própria.

A extração das amostras procedeu-se com a escavação duas trincheiras (Valas) até a cota de 50 cm, posteriormente, à cravação de 25 cilindros, procedeu-se a escavação lateral, lapidação e o rasar das faces, conforme na Figura 58, para o armazenamento, o transporte e a realização dos ensaios de Erodibilidade e de Desagregação.

Figura 58 – Etapas da extração da amostra indeformada do Argissolo.



Fonte: Autoria própria.

As amostras recolhidas com o cilindro biselado foram todas envolvidas por papel filme de PVC e transportados em caixas de isopor, de modo que não perdessem a sua umidade e não ocorressem quaisquer perturbações em seu interior, conforme a Figura 59.

Figura 59 – Amostras indeformadas coletadas e protegidas com papel filme prontas para o transporte.



Fonte: Autoria própria.

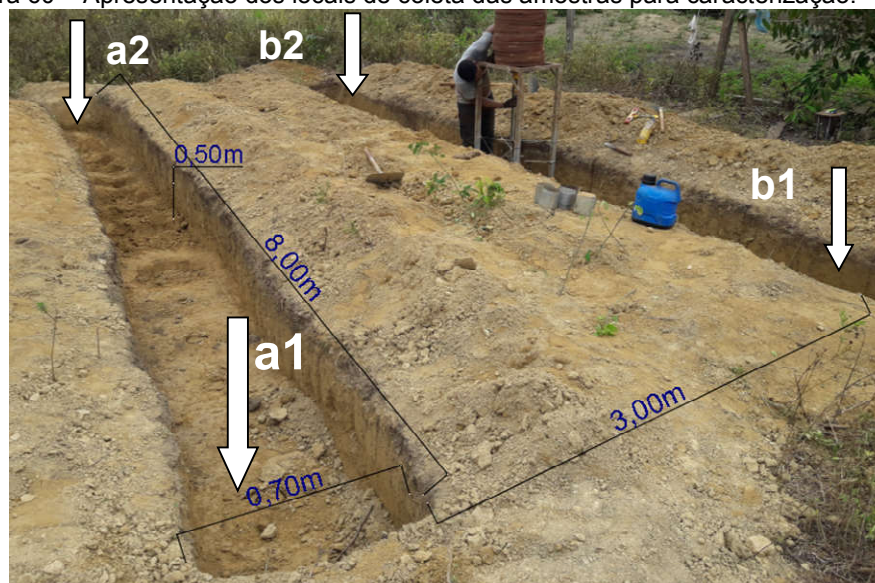
4.2 ENSAIO DE LABORATÓRIO

4.2.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As coletadas foram com amostras indeformadas para as análises específicas e deformadas para a sua caracterização, sendo retiradas em sacos plásticos,

quantidades de 6 kg de cada extremidade, na profundidade das trincheiras e enumeradas no mesmo sentido de a1, a2, b1 e b2, como mostra na Figura 60.

Figura 60 – Apresentação dos locais de coleta das amostras para caracterização.



Fonte Autoria própria.

As amostras foram preparadas respeitando todas as normatizações específicas para cada respectivo ensaio. De acordo com a norma NBR 6457/2016 para a caracterização e classificação das amostras, as mesmas foram secas ao ar, quartejadas e destorroadas de modo que não tivessem a quebra de partículas grossas e a alteração granulométrica do material.

A preparação das amostras para os ensaios tidos como especiais, seguiram suas respectivas metodologias e sistemáticas, ao qual foram reproduzidas na atualidade e em maior número pelos pesquisadores brasileiros, devido as especificidades dos Solos Tropicais.

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a caracterização foram os realizados 4 vezes os específicos ensaios de acordo com as suas respectivas normas brasileiras:

- Preparação para ensaio de compactação e caracterização - NBR 6457 (ABTN, 2016a);
- Determinação da massa específica - NBR 6458 (ABTN, 2017a);
- Determinação do limite de liquidez - NBR 6459 (ABTN, 2017b);
- Determinação do limite de plasticidade - NBR 7180 (ABTN, 2016b);

- Análise granulométrica - NBR 7181 (ABTN, 2018a) tamponada com Carbonado de Sódio e com dispersor químico Hexâmetra Fosfato;
- Análise granulométrica - NBR 7181 (ABTN, 2018a) com dispersor químico Hidróxido de Sódio nas concentrações de 10 ml e 25 ml da solução de 40 gramas por litro de água destilada;
- Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação - NBR 9813 (ABTN, 2016c);
- Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio - NBR 13600 (ABTN, 1996a);
- Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS - Método de ensaio- NBR 13602 (ABTN, 1996b).
- Caracterização mineralógica por Difração de Raios X utilizando o Difrátômetro do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, modelo Empyrean da PANalytical, com tubos de raios-X cerâmicos de anodo de Co ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), foco fino longo, filtro $K\beta$ de Fe, detector PIXCEL3D-Medpix3 1x1, no modo “scanning”, com voltagem de 40 kV, corrente de 35mA, tamanho do passo $0,0263^\circ$ em 2θ , varredura de $3,0072^\circ$ a $94,9979^\circ$ em 2θ , tempo/passos de 30,6s, fenda divergente: $1/4^\circ$ e antiespalhamento: $1/2^\circ$, máscara: 10 mm.

4.2.3 ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

Para a complementação da análise da atividade da fração fina dos solos, empregou-se o ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha detalhada no Anexo IV, porém que de maneira breve consiste na titulação de uma mistura de água e solo por uma solução padrão do adsorvente azul de metileno⁹ até o instante de sua saturação, identificado quando ocorre a formação de uma aura azul esverdeada quando gotejado em um papel filtro quantitativo padronizado.

Neste trabalho efetuou-se a análise da atividade com a amostra de solo em duas condições distintas, sendo elas na condição natural e na condição de Calcinação após um período de 12 horas a 440°C, na condição posterior a determinação do teor de Matéria Orgânica preconizada pela NBR 13600.

⁹ Solução de 1 grama de Azul de metileno por litro de água destilada;

Atrelado a cada uma das duas condições da amostra executou-se a determinação da atividade seguindo duas metodologias distintas e efetuando-se a sedimentação a NBR 7181 (ABNT 2018a), totalizando 4 avaliações independentes que sendo descritas a seguir:

- Nas condições de amostra Natural e de amostra Calcinação com a Metodologia proposta por Fabbri (1994) e também em conformidade com a Norma Francesa **NF - 94 068**,
- Nas condições de amostra Natural e de amostra Calcinação com Metodologia apresentada pela Norma Americana **ASTM C 837 – 09**

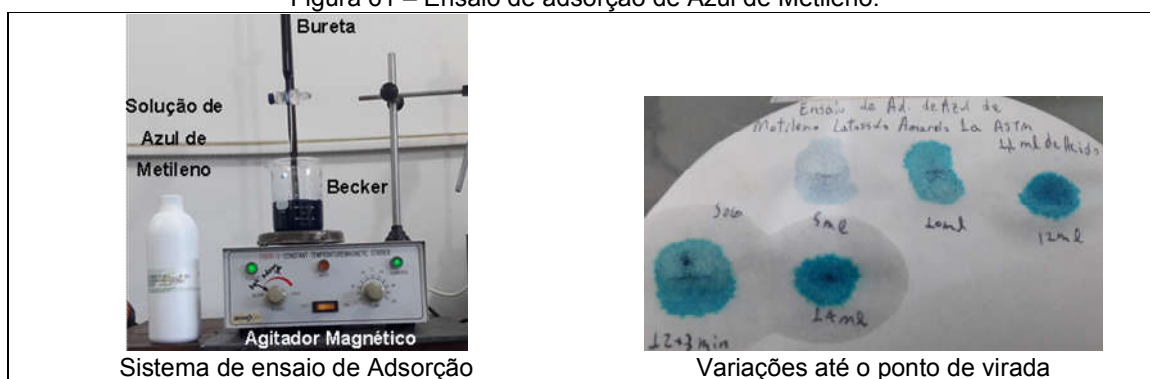
De acordo com metodologia de Fabbri (1994) aplica-se uma solução padrão de azul de metileno¹ em uma grama da fração de solo fino¹⁰ com passos de carga de 1 ml por minuto até o seu instante de saturação, em um Becker de 250 ml, com 100 ml de água destilada e sistema de agitação ininterrupta, sendo ainda aplicada uma gota da solução resultante a cada passo de carga em um papel filtro específico¹¹, conforme a Figura 61. De modo a padronizar a velocidade de rotação adotou-se o sistema de agitação por bastão magnético pequeno de rotação ininterrupta média de 400 rpm e almejando a melhora da acurácia do ponto de saturação, optou-se por passos de carga de adições de azul de 2 ml por minuto.

Já na Metodologia apresentada pela ASTM C 837 – 09 recomenda-se a utilização de 2 gramas da fração de solo fino² com passos de carga de 5 ml a cada 2 minutos até o seu instante de saturação, em um Becker de 500 ml com 200 ml de água destilada, com a adição de ácido sulfúrico, na concentração de 0,1 molar até a condição de pH do solo com a água estiver inferior a 3,5 e sistema de agitação ininterrupta, sendo ainda aplicada uma gota da solução resultante de cada passo de carga em um papel filtro específico³. De modo a aproximar a metodologia apresentada com a anterior adotou-se a amostra de solo fino² de 1 grama, com passos de carga de 2 ml por minuto, utilização de Becker de 250 ml com 100 ml de água destilada e sistema de agitação por bastão magnético pequeno de rotação ininterrupta média de 500 rpm.

¹⁰ Fração de solo passante na peneira de 0,074mm;

¹¹ Papel de filtro circular, com diâmetro de 150 mm, para micro-cristais, com teor de cinzas inferior a 0,01%, do tipo Reagen R-42, Whatman 42 ou similar.

Figura 61 – Ensaio de adsorção de Azul de Metileno.



Fonte: Autoria própria.

Avaliaram-se os volumes de azul de metileno consumidos por 1 g de amostra de solo integral (VA) e os Coeficiente de Atividade (CA) de cada condição e metodologia empregada, sendo analisados também na carta de classificação proposta por Fabbri (1994).

4.2.4 CLASSIFICAÇÃO MCT PELO MÉTODO DAS EXPEDITO DAS PASTILHAS NOGAMI E VILLIBOR (1994)

Para a avaliação das amostras na metodologia MCT foi empregado o método Expedito das Pastilhas de Nogami e Villibor (1994) detalhado no Anexo II, sendo realizados com 4 amostras de cada solo, 5 pastilhas e 4 aferições de leituras de penetração

Neste método foram moldadas pastilhas de solos de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura, com a fração passante na peneira de malha 0,42 mm em uma consistência de penetração de 1 mm, posteriormente secas ao ar por 24 horas e em seguida, foram avaliadas as taxas de contração utilizando paquímetro digital, as reações durante o período de reabsorção de 2 horas e os seus valores penetração da agulha padrão de 10 gramas conforme a Figura 62 e a Figura 63.

Figura 62 – Procedimento de reabsorção de água das pastilhas utilizadas.



Pastilhas do Argissolo

Pastilhas de Latossolo Amarelo

Pastilhas de Latossolo Vermelho

Fonte Autoria própria.

Figura 63 – Procedimento de registro das condições das pastilhas após reabsorção e de penetração com a agulha padrão.



Fonte: Autoria própria.

Com os valores da contração diametral e os da penetração empregou-se a carta de classificação expedita das pastilhas e determinou-se a qual grupo da classificação Miniatura Tropical Compactada – MCT as amostras pertenciam.

Conforme preconiza a metodologia empregada, realizou-se conjuntamente a classificação pastilhas o registro da ocorrência de fissuração, expansão e o aparecimento de água na superfície das pastilhas, que posteriormente serão devidamente apresentadas.

4.2.5 ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

Para analisar a presença de elementos solúveis, a disposição de fase gasosa e a possível ocorrência de argilo minerais expansivos, foram moldadas no mínimo 4 amostras em formato cúbico com arestas de 60 mm de solo indeformado e em umidade próxima a natural de acordo com a metodologia descrita por Santos (1997), sendo 5 delas submetidas à imersão total e 5 à imersão parcial e ambas com constância de seus níveis de água.

As amostras com imersão total foram confeccionadas e instaladas individualmente sobre um papel filtro, uma pedra porosa e imersas em recipientes com água destilada que as cobriam completamente, sendo registrado o seu comportamento e fotografadas a cada 30 min. em cada uma das 2 primeiras horas e após 24 h.

Nas amostras com imersão parcial o procedimento adotado foi o de também instalá-las individualmente sobre um papel filtro, uma pedra porosa e imergi-las de modo parcial e crescente com intervalos de 30 min, sendo inicialmente com a água no nível da superfície na pedra porosa e da base da amostra, posteriormente com o

nível de água a 1/3 da amostra, em seguida a 2/3 da amostra e por fim com ela completamente imersa também registrando-se cada etapa e fotografando-as, como apresenta a Figura 64.

Figura 64 – Ensaio de desagregação da amostra do Argissolo por imersão Parcial, após um período de 30 minutos.

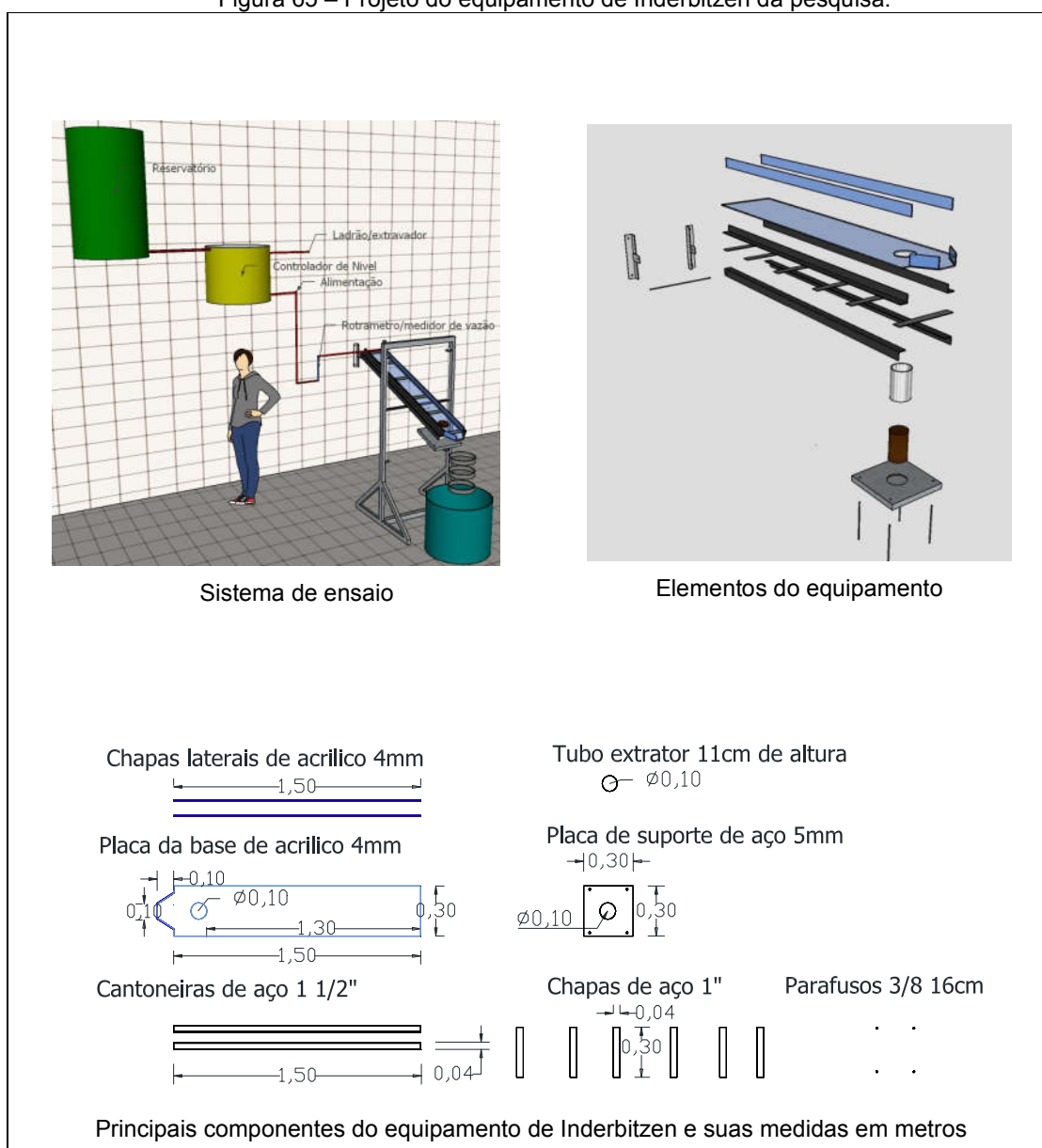


Fonte: Autoria própria.

4.2.6 ENSAIO DE INDERBITZEN

O sistema de ensaio e a concepção do equipamento utilizado nesta pesquisa fundamentaram-se nos trabalhos de Fragassi (2001) e Stephan (2010), sendo o sistema composto por um reservatório de alimentação, um de controlador do nível d'água com um extravassor, operando constantemente e fornecendo também água a um registro, e posteriormente um medidor de vazão da marca Hidronix, modelo IFM-022, escala de 0,8 a 8 l/min e acurácia de 5%, em seguida para a caixa estabilizadora de fluxo e posteriormente ao canal hidráulico construído em acrílico incolor de 4 mm, como ilustra a Figura 65.

Figura 65 – Projeto do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.



Fonte: Autoria própria. adaptado dos softwares Sketchup (2018) e Autocad (2017).

O equipamento foi construído na Universidade Federal do Pará, campus Tucuruí, no Laboratório de Mecânica – LAMEC pelo pesquisador e com o auxílio do Técnico de Laboratório Sr. Rodimilson como mostra nas Figura 66, sendo as etapas e dificuldades superadas na construção do presente equipamento apresentadas no Anexo III

Figura 66 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente à instalação do equipamento de Inderbitzen, constatou-se que o escoamento da água não era uniforme na seção na calha hidráulica e procedeu-se com a correção dessa característica com os métodos apresentados no Apêndice I

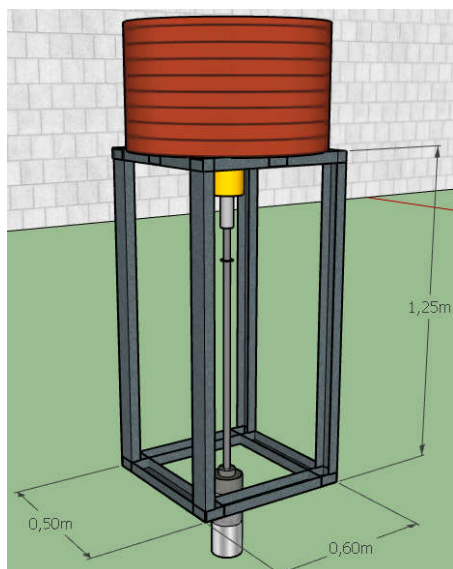
O estudo foi realizado com amostras de solos de locais que apresentam processos erosivos em evolução nas bordas do lago da UHE Tucuruí, nas principais tipologias de solos existentes, como o Argissolo, o Latossolo Amarelo e o Latossolo Vermelho-Amarelo, extraídas na profundidade de 0,5 m, avaliadas nas condições de

inundação com imersão sob pedra porosa por mínimo 3 dias, sendo submetidas a vazão de 3,0 l/min e de 10°, 20° e 30°; vazões de 1,5 l/min e 4,5 l/min com inclinação de 20° e vazão de 3,0 l/min e de 10° e 20°.

Cada amostra foi extraída do local e profundidade de origem com o cilindro de cravação biselado padronizado conforme a norma brasileira de determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação – NBR 9813, contudo, empregou-se um sistema hidráulico de cravação com o apoio de uma pequena estrutura de reação, buscando evitar o acréscimo de poropressão na amostra, permitindo que permanecesse indeformada.

O sistema de cravação contou com a mesa de suporte, 22 pesos de 40 kg de reação, e também com o Macaco hidráulico modificado, que com a inserção de um tubo em seu interior permitiu operar de cabeça para baixo, possibilitando a drenagem do óleo, escorrer para a sua extremidade e o seu bombeamento para câmara interna, promovendo a pressão hidráulica necessária para o deslocamento e cravação dos elementos de amostragem, de modo próximo ao executado por Lemos et. al (2007), como apresentado na Figura 67.

Figura 67 – Sistema de cravação do cilindro biselado das amostras para o ensaio de Inderbitzen



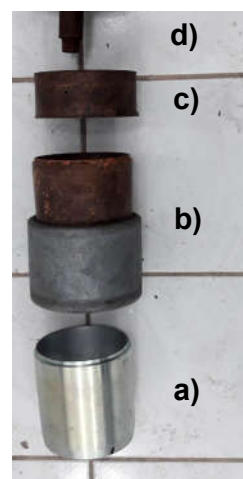
Projeto do sistema de cravação



Utilização do sistema de cravação



Modificação do sistema hidráulico do Macaco de cravação



Equipamentos de cravação

Legenda:

- a) Cilindro biselado de 11 cm de altura, 10,4 cm de diâmetro interno e 3 mm de espessura;
- d) Luva metálica de extensão com 15 cm;
- b) Cabeça de apoio de cravação vasada;
- c) Barra de aço para o sistema hidráulico.

Fonte Autoria própria.

Para a cravação do cilindro e da luva de extensão realizou-se a escavação de duas trincheiras de 0,70 x 8,0 m com pá, picareta e cavadeira até atingir a cota de 50 cm, executando-se o posicionamento e nivelamento da estrutura, o seu carregamento com peças metálicas circulares de 40 kg cada e em seguida a

cravação, a retirada do sistema de reação e a escavação lateral para a sua extração como apresentado na Figura 68 com as amostras prontas para a retirada.

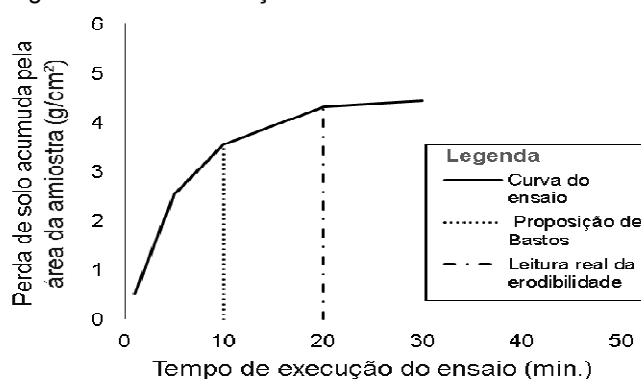
Figura 68 – Processos de escavação para coleta das amostras



Nos dois primeiros solos a escavação lateral foi realizada com o auxílio da cavadeira tipo “boca de lobo”, mas no último solo optou-se por empregar cavadeira do tipo “picareta” para pré abrir as laterais, facilitar a lapidação do solo com espátulas ou facão e a extração das amostras com maior cuidado, melhorando a produtividade da equipe e os cuidados para com o processo de retirada das amostras.

Com as amostras no laboratório, realizou-se a avaliação da taxa de perda de solo acumulada em função do tempo de ensaio, sendo empregado a metodologia proposta por Bastos (1999), com as leituras realizadas em 1, 5, 10 e 20 min, contudo, adicionando-se a leitura de 30 minutos, afim de garantir a estabilização do ensaio como ilustra a Figura 69.

Figura 69 – Determinação da taxa de erosão da amostra.



Fonte: Autoria própria.

A quantificação da perda de solo foi realizada coletando o material erodido nos tempos de 1, 5, 10, 20 e 30 min. em recipientes plásticos capacidade de 80 litros de armazenamento, posteriormente vertido individualmente em um funil de grande capacidade de vazão¹² e em seguida na peneira de 0,075mm, como indicado na Figura 70, entretanto, a determinação do material menor que 0,075 mm foi realizada de maneira indireta, sendo determinado conforme a proporção que o mesmo representa-se na sua curva granulométrica sem defloculante de cada solo.

Figura 70 – Equipamentos para a obtenção dos sedimentos.



Funil e peneira 0,075 mm

Amostras de cada de cada período retidas nas peneiras e vertidas nas capsulas

Fonte: Autoria própria.

A determinação da velocidade de escoamento realizada com a aplicação de corantes¹³ no fluido de modo que não alterasse a sua densidade, viscosidade e nem

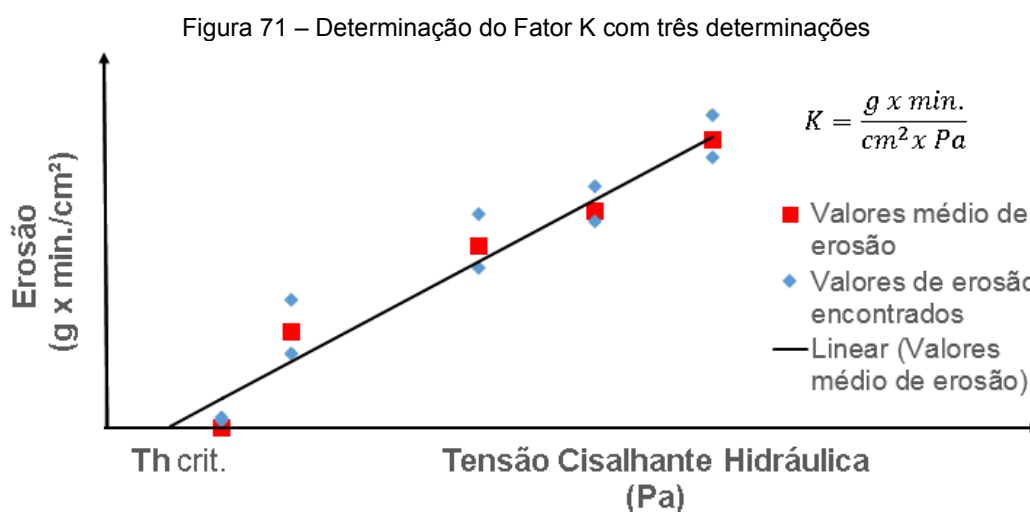
¹² A metade superior do galão plástico de consumo doméstico de água de 20 litros;

¹³ Azul de Metileno 1g do corante diluída em 5 litros de água;

promovesse perturbações ao seu escoamento e com a utilização de câmara de boa resolução e capacidade de registo de quadros de imagem por segundo¹⁴, que foram posteriormente avaliados em softwares de edição de filmagens¹⁵ para avaliar a quantidade de quadros que foram necessários ou segundos que o fluído necessitou para percorrer determinadas distâncias demarcadas¹⁶, como detalhado no Apêndice II.

Com os dados da velocidade de escoamento real encontrada, utilizando recursos apresentados no Apêndice II, determinou-se o seu respectivo coeficiente de manning com o auxílio do software livre, de estudos hidráulicos, SisCcoH 1.0, e posteriormente, a altura da lamina de escoamento para a respectiva condição e para uma condição teórica com o coeficiente de manning como apresentado no Apêndice III.

Para cada condição de ensaio foram realizadas duas vezes a determinações de erodibilidade, de modo a desenvolver o gráfico de tendência de erodibilidade do solo pelo nível de solicitação hidráulica e se determinar o Fator K, que é a sua tangente da inclinação, conforme a Figura 71.



Fonte: Autoria própria.

¹⁴ Câmera digital de 13 Megapixels com capacidade de 33 quadros por segundos;

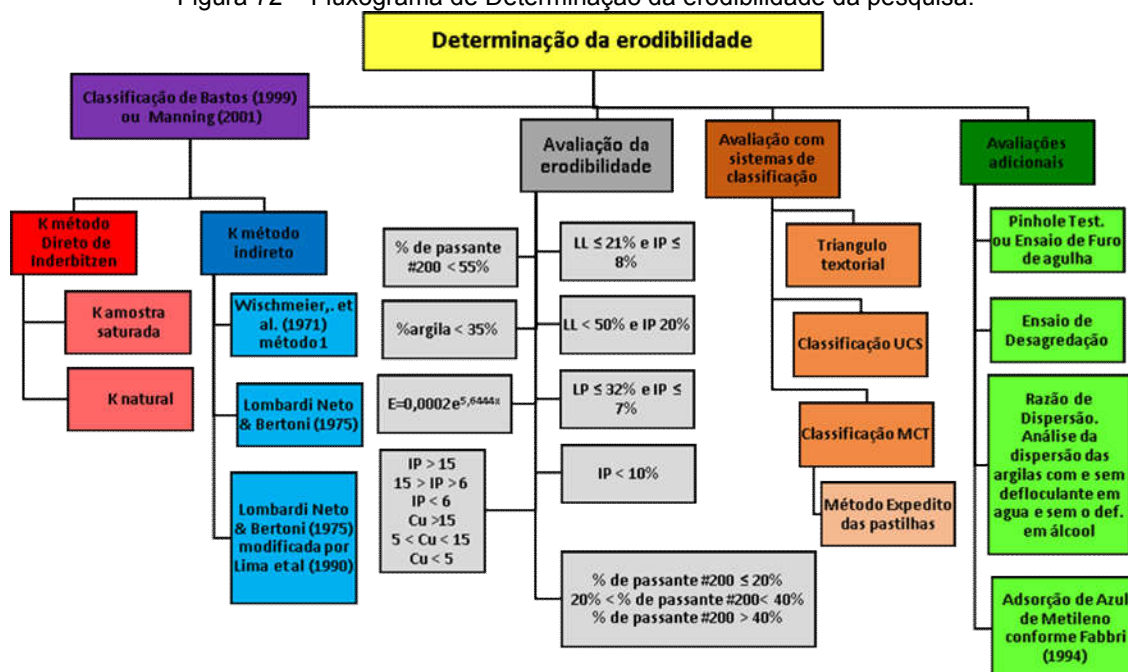
¹⁵ Software Vegas;

¹⁶ Trecho de 40 centímetros.

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS

Para cada tipo de solo, foi realizada a determinação dos parâmetros de erodibilidade direta pelo ensaio de Inderbitzen, indireta pelas equações de características físicas e avaliado a variabilidade dos diferentes fatores K através da classificação de Bastos (1999) ou Manning (2001). Além disto executou-se a determinação da erodibilidade pelas características granulométricas e de plasticidade, sendo ainda realizada a avaliação com os sistemas de classificações de solos e os ensaios de furo de agulha e desagregabilidade, conforme a Figura 72.

Figura 72 – Fluxograma de Determinação da erodibilidade da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios e métodos realizados com cada solo serão apresentados neste capítulo e foram subdivididos em Ensaios de caracterização, Método Expedito das Pastilhas, Desagregação, Inderbitzen.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

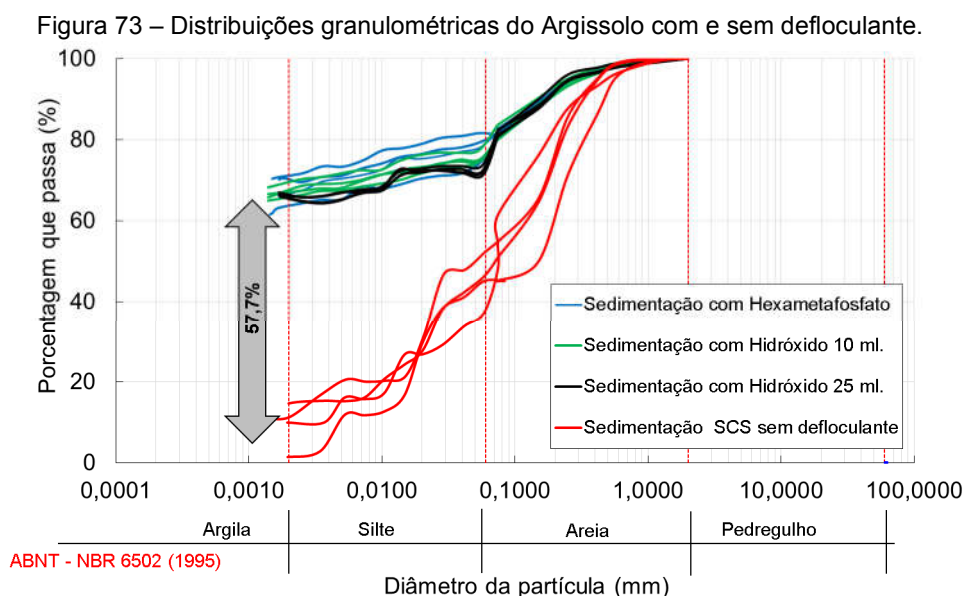
Adiante serão apresentados os resultados dos ensaios de Granulometria conjunta com sedimentação, limites de consistência, massa específica dos sólidos,

Mineralogia por DRX e Teor de matéria Orgânica e Ensaio de adsorção de Azul Metileno.

5.1.1 GRANULOMETRIA CONJUNTA COM SEDIMENTAÇÃO

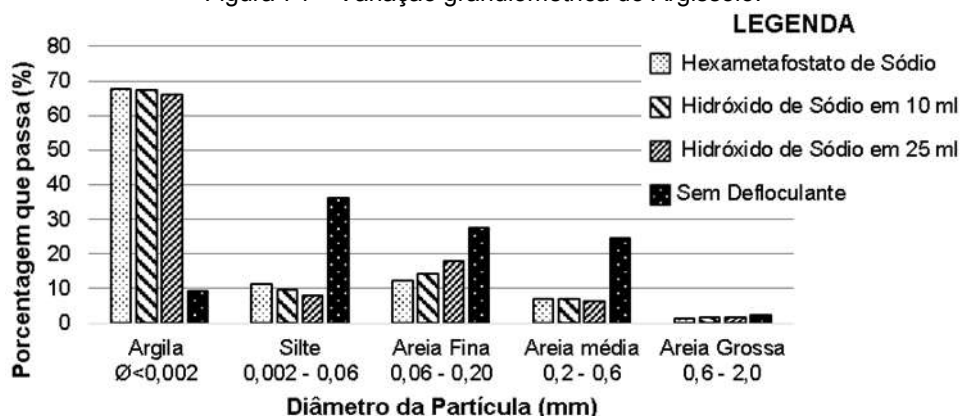
A determinação granulométrica de cada solo foi realizada com amostras de cada extremidade da trincheira de amostragem, computando em 4 determinações. Além do exposto empregaram-se distintas condições de ensaio, sendo elas com dispersante químico (defloculante) Hexametáfosfato de Sódio, Hidróxido de Sódio nas concentrações de 10 e 25 ml de solução de 0,04 g/l e Sem Defloculante.

O Argissolo apresentou melhor comportamento com a utilização do Hexametáfosfato de Sódio possuindo maiores taxas de argila, porém a utilização do Hidróxido de Sódio se apresentou melhor perante a dispersividade dos resultados, evidenciando-se que na concentração de 25 ml o comportamento menos variável, contudo, quando sem defloculante notou-se a formação de grumos (agregados), tendo uma variação média de 57,7% do teor de argila em relação à média das técnicas anteriores, conforme a Figura 73.



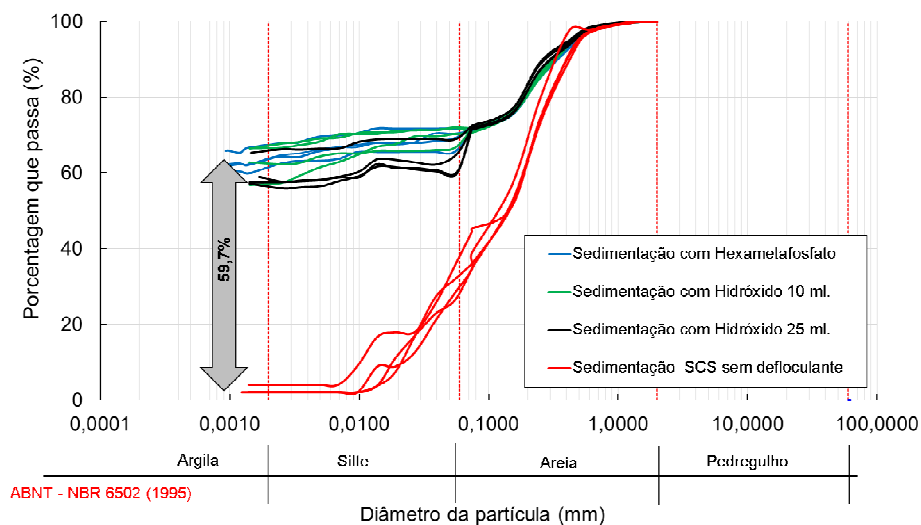
Nota-se que analisando a média das determinações granulométrica das amostras do Argissolo verificou-se que na medida em que o defloculante ia reduzindo os teores de argila e silte aferidos, aumentava o teor de areia fina demonstrando claramente a formação das agregações, como apresentado na Figura 74.

Figura 74 – Variação granulométrica do Argissolo.



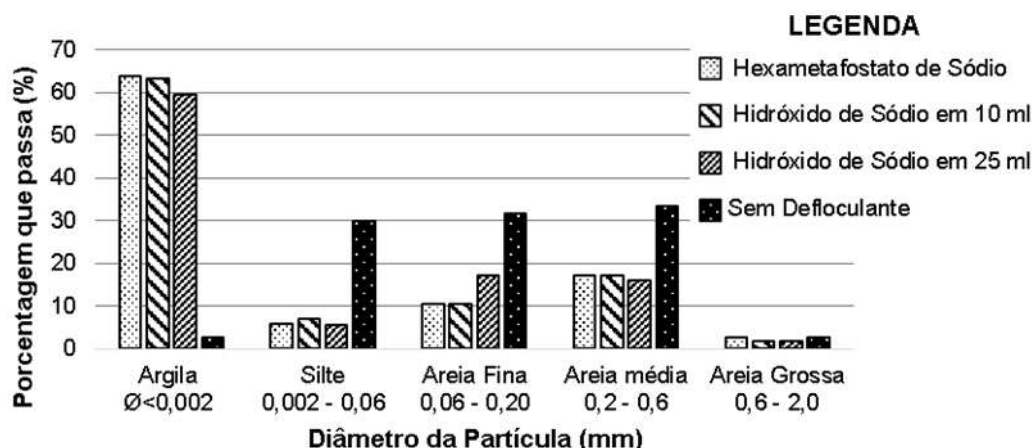
O Latossolo Amarelo demonstrou uma maior variação da atuação dos defloculantes, mas o Hexametáfostato de Sódio apresentou sutilmente uma maior atuação, o Hidróxido de Sódio promoveu valores próximos em algumas amostras e na condição sem defloculante se constatou curvas mais próximas com uma diferença média de 59,7% do teor de Argila para os ensaios com defloculante, como apresentado na Figura 75.

Figura 75 – Distribuições granulométricas do Latossolo Amarelo com e sem defloculante.



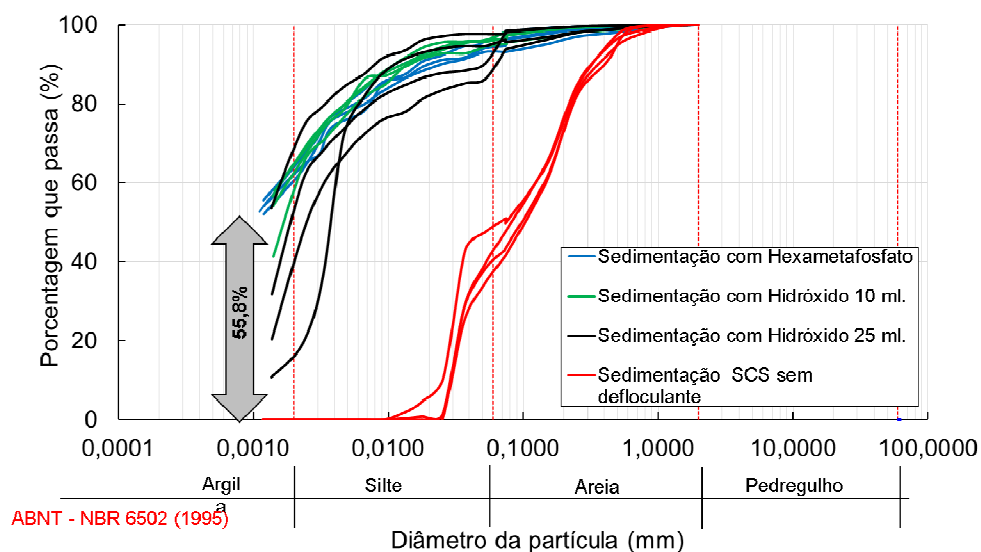
Verificando a média das determinações granulométrica das amostras do Latossolo Amarelo foi observado que na medida em que o defloculante reduzia os teores de argila aferidos, os teores de silte mantinham-se constantes, mas aumentava o teor de areia fina demonstrando claramente a formação das agregações como apresentado na Figura 76.

Figura 76 – Variação granulométrica do Latossolo Amarelo.



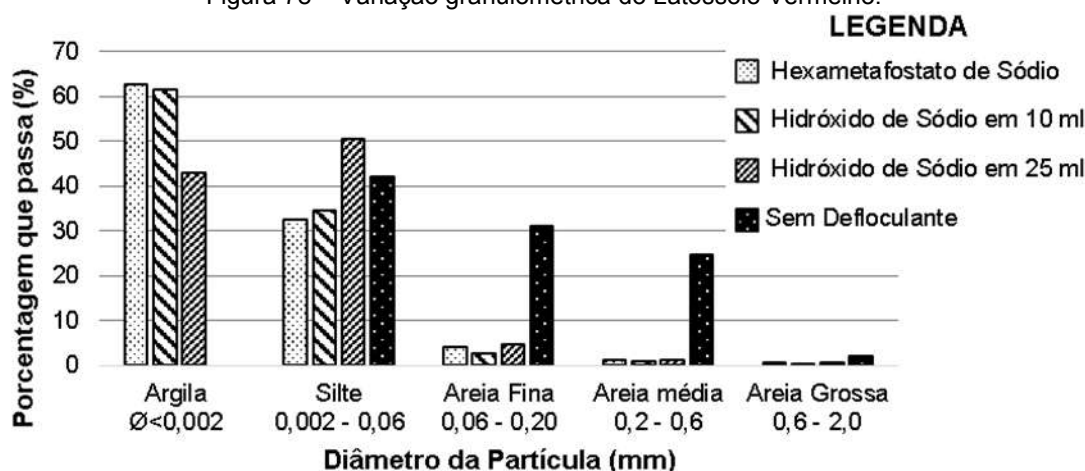
O Latossolo Vermelho apresentou, semelhantemente ao amarelo, uma leve maior taxa de dispersão do defloculante Hexametáfostato, contudo, uma menor dispersão dos resultados, o Hidróxido demonstrou uma maior variabilidade na medida em que foi aumentado a sua quantidade na solução, e na condição de sem defloculante, novamente, verificou-se curvas menos dispersas e uma variação média de 55,9% do teor de argila, conforme a Figura 77.

Figura 77 – Distribuições granulométricas do Latossolo Vermelho com e sem defloculante.



Observando a média das determinações granulométrica das amostras do Latossolo Amarelo, foi verificado que na medida em que o defloculante reduzia os teores de argila aferidos, os teores de silte aumentavam, demonstrando claramente a formação das agregações, como apresentado na Figura 78.

Figura 78 – Variação granulométrica do Latossolo Vermelho.



De modo geral nota-se que as frações granulométricas que mais sofreram variações com a formação das agregações foram as Argila, Silte e Areia Fina, e que, independentemente do tipo de solo, o defloculante Hexametáfostato de Sódio foi o que melhor promoveu a dispersão das partículas de argila, e em seguida o Hidróxido de Sódio na concentração de 10 e 25ml.

5.1.2 LIMITE DE CONSISTÊNCIA

Na Tabela 25 estão apresentados os limites de consistência encontrados para cada amostra ensaiada, observando-se que o Argissolo e Latossolo Amarelo apresentam limites de LL e LP muito próximos, já o Latossolo Vermelho teve seus limites superiores aos dos demais.

Tabela 25 – Limites de consistência das amostras analisadas.

Solo	Amostra	LL (%)	LL (média)	LP (%)	LP (média)	IP (%)	LL (R ²)
Argissolo	1a	52,16	52,66	28,26	29,26	23,40	0,92
	1b	54,93		29,84			0,91
	2a	51,41		29,68			0,98
	2b	52,14		29,24			0,99
Latossolo Amarelo	1a	52,26	51,35	27,72	26,52	24,84	0,98
	1b	50,58		26,71			0,91
	2a	50,85		26,14			0,96
	2b	51,71		25,49			0,93
Latossolo Vermelho	1a	69,46	66,48	39,85	39,21	27,28	0,97
	1b	67,03		39,50			0,99
	2a	66,03		39,49			0,98
	2b	63,41		37,97			0,98

5.1.3 ÍNDICES FÍSICOS

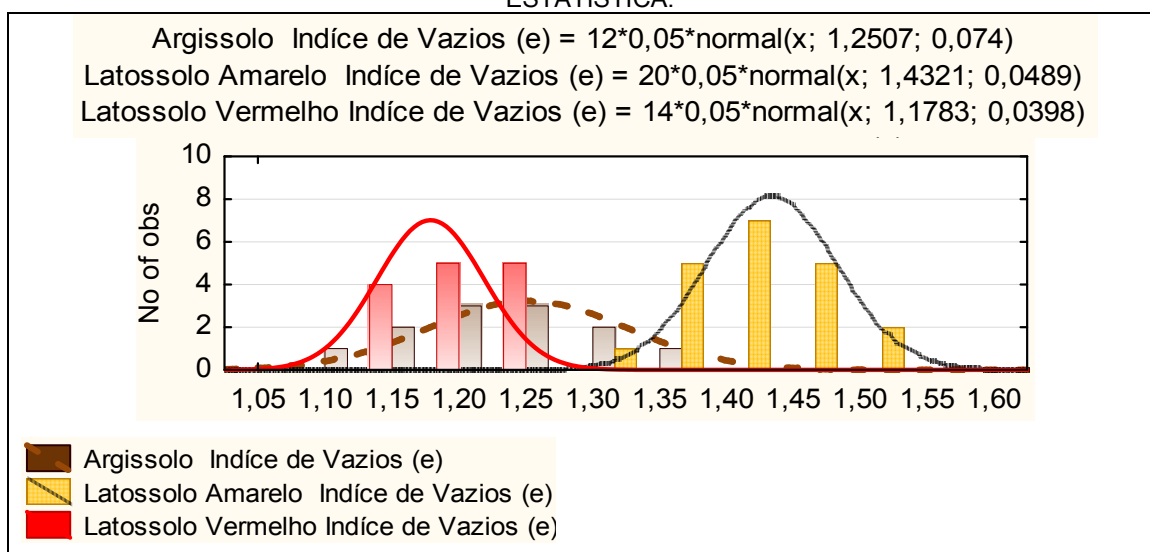
Os valores de Massa Específica dos Sólidos, Massa Específica Seca Natural e do Índice de Vazios dos três solos são apresentados de maneira mais detalhada no Apêndice IV, e de modo objetivo na Tabela 26.

Tabela 26 – Massa Específica dos Sólidos das amostras de cada solo

Solo	Amostra	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Massa Específica dos Sólidos Médio (g/cm ³)	Massa Específica Seca Natural (g/cm ³)	Índice de Vazios Médio (e)
Argissolo	1a	2,75	2,75	1,22	1,25
	1b	2,74			
	2a	2,76			
	2b	2,74			
Latossolo Amarelo	1a	2,67	2,68	1,10	1,43
	1b	2,69			
	2a	2,67			
	2b	2,69			
Latossolo Vermelho	1a	2,95	2,95	1,34	1,17
	1b	2,95			
	2a	2,94			
	2b	2,94			

Na Figura 79 são apresentados os resultados da Índice de Vazios (e) em modelo de histograma múltiplo, sendo determinados com 12 amostras para o Argissolo com desvio padrão de 0,074; determinado com 20 amostras para o Latossolo Amarelo com desvio padrão de 0,048, e determinado com 14 amostras para o Latossolo Vermelho com desvio padrão de 0,039.

Figura 79 – Histogramas de frequência do índice de vazios dos três solos analisados, Software ESTATISTICA.



5.1.4 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.

As amostras apresentaram baixos valores de matéria orgânica e muita proximidade, como apresentado na Tabela 27.

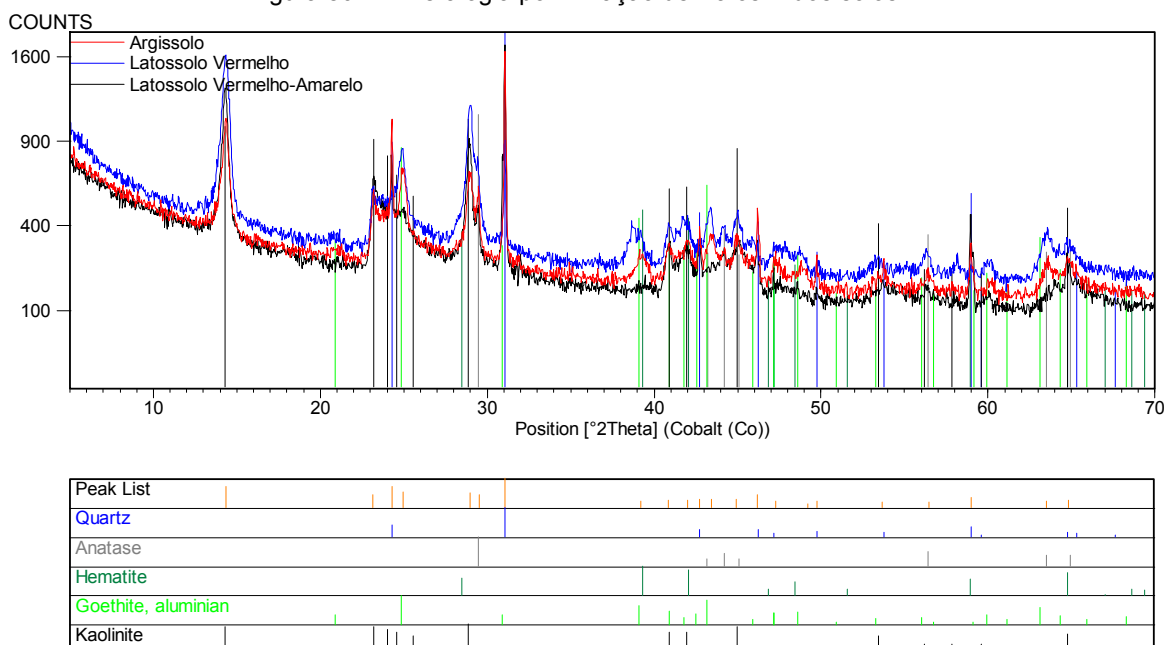
Tabela 27 – Teores de matéria orgânica dos solos analisados.

Amostras	Tara (g)	Amostra seca inicial (g)	Amostra Seca Calcinada final (g)	Teor de Matéria Orgânica (%)	Teor de Matéria Orgânica Médio (%)
Argissolo	1a	38,25	100,70	94,85	9,71
	1b	35,10	99,62	93,32	
	2a	38,39	103,52	97,07	
	2b	39,83	101,11	95,10	
Latossolo Amarelo	1a	38,24	102,27	96,39	9,12
	1b	37,83	97,35	91,90	
	2a	39,83	106,32	100,32	
	2b	35,88	96,53	91,00	
Latossolo Vermelho	1a	39,24	94,25	88,16	10,63
	1b	39,83	100,16	93,58	
	2a	35,88	93,33	87,32	
	2b	38,40	95,55	89,80	

5.1.5 MINERALOGIA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS - X

A mineralogia apontou similaridade dos argilominerais e nenhum indicio da presença de argilo minerais ativos ou solúveis em água, conforme a Figura 80.

Figura 80 – Mineralogia por Difração de Raios X dos solos.



5.1.6 ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA.

Os dados experimentais primários são fornecidos no Apêndice V. Dessa maneira serão apresentados os resultados das médias das quatro aferições (1a, 1b, 2a, e 2b) de cada metodologia empregada e para cada solo analisado na Tabela 28

Tabela 28 – Dados da adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha dos solos analisados.

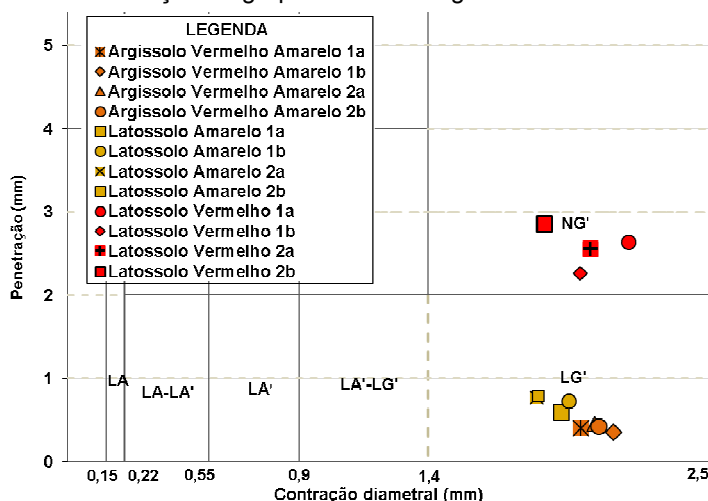
Solo	Metodologia	Condição	%Argila total do solo	Va (g/g)	VB (g/100g)	Acb (VB/%Arg.)	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)
Argissolo	Fabbri (1994) / NF - 94 068	Normal	69,98	15,47	1,37	1,55	1,37	33,59
		Calcinada a 440°C	69,98	17,35	1,54	1,73	1,54	37,66
	ASTM C 837 - 09 com Ácido Sulfúrico	Normal	69,98	17,77	1,58	1,78	1,58	38,58
		Calcinada a 440°C	69,98	15,49	1,37	1,55	1,37	33,63
Latossolo Amarelo	Fabbri (1994) / NF - 94 069	Normal	71,55	15,93	1,36	1,59	1,47	35,98
		Calcinada a 440°C	71,55	17,18	1,59	1,72	1,59	38,80
	ASTM C 837 - 09 com Ácido Sulfúrico	Normal	71,55	14,87	1,37	1,49	1,37	33,59
		Calcinada a 440°C	71,55	14,73	1,36	1,47	1,36	33,28
Latossolo Vermelho	Fabbri (1994) / NF - 94 068	Normal	78,28	22,53	1,90	2,28	1,90	46,58
		Calcinada a 440°C	78,28	16,47	1,35	1,65	1,35	33,11
	ASTM C 837 - 09 com Ácido Sulfúrico	Normal	78,28	16,55	1,38	1,65	1,38	33,77
		Calcinada a 440°C	78,28	16,43	1,37	1,64	1,37	33,54

5.2 MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS

O método Expedito das Pastilhas se demonstrou muito eficaz por analisar características comportamentais dos solos, realizando suas afirmações em função do comportamento que foi observado e tendo custo e, nível tecnológico extremamente baixo é tido como uma importante ferramenta de análise investigativa.

Os dados de contração e penetração encontradas no método expedito das pastilhas estão detalhadas no Apêndice VI e a classificação das amostras apresentada na Figura 81.

Figura 81 – Determinação do grupo da metodologia M.C.T. das amostras.



As informações de desempenho durante o processo de reabsorção são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Descrição do comportamento das amostras na execução das pastilhas do Método Expedito das Pastilhas.

Etapa	Solo		
	Argissolo	Latossolo Amarelo	Latossolo Vermelho
Comportamento durante o processo de amolgamento da amostra	Inicialmente muito coesiva e até o instante final, mas com menor intensidade	Inicialmente muito coesiva e até o instante final, mas com menor intensidade	Inicialmente muito coesiva, ao término apresentava-se com característica friável
Comportamento durante moldagem das pastilhas	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o razamento devido a leve coesão	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o razamento devido a leve coesão	Fácil moldagem, mas muita dificuldade para o razamento devido à pouca coesão da amostra, abrindo festas com facilidade
Comportamento apresentado após a desidratação da pastilha	Altos níveis de contração, mas sua distribuição é uniforme	Altos níveis de contração, mas sua distribuição é uniforme	Altos níveis de contração, mas com distribuição levemente diferencial
Comportamento após a reabsorção de água	Leves fissuras nas exterminadas da pastilha e em direção axial e tangencial	Leves fissuras superficiais e em direção radial	Leve expansão e ocorrência de um pequeno filme de água na superfície
Registro fotográfico da etapa de reabsorção			

5.3 ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

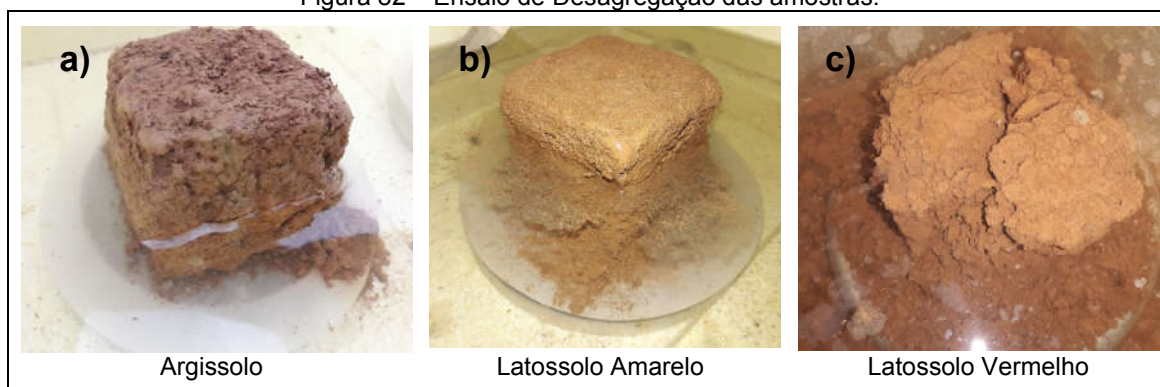
As informações da evolução dos ensaio de Desagregação de cada amostra são apresentadas no Apêndice VII, sendo destacado também a análise da variação da geometria das amostras.

O Argissolo na condição de imersão parcial e geometria cúbica se apresentou praticamente com leve abatimento, como indicado na Figura 82a, e na geometria cilíndrica com abatimento variando de muito leve a moderado. Na condição de imersão total e geometria cúbica se observou apenas um leve abatimento e na geometria cilíndrica um abatimento variável desde leve até moderado. Pode-se observar que o fato da amostra cilíndrica possuir maior aresta, possibilita uma maior área de perturbação durante a confecção do corpo de prova, e que quando imersas de modo parcial estas regiões que são lapidadas umedecem por capilaridade e adsorção, aumentando o seu peso e promovendo o seu abatimento, sem necessariamente representar o comportamento real da amostra.

O Latossolo Amarelo independentemente da condição e da geometria se apresentou intacto, demonstrando a eficácia de sua estrutura, sua coesão e sua cimentação do processo de formação com a ação do intemperismo de laterização, como apresentado na Figura 82b.

O Latossolo Vermelho na condição de imersão parcial e geometria cúbica apresentou uma dispersão muito variável, desde leve a total com faturamento moderado como apresentado na Figura 82c, e na geometria cilíndrica uma alta dispersão. Na condição de imersão total com geometria cubica também apresentou uma dispersão muito variável, desde leve com fraturamento moderado a alto; e na geometria cilíndrica uma dispersão desde leve até total. Esse comportamento muito variável das amostras se dá pelo seu tipo de estrutura, pois, possuindo elevada presença de partículas do tamanho silte, podem ocorrer processos expansivos, contudo, envolvida com partículas coesivas e cimentantes como óxidos de ferro ou alumínio, se mantêm estáveis até que sejam rompidas suas agregações, como na própria confecção da amostra.

Figura 82 – Ensaio de Desagregação das amostras.



5.4 ENSAIO DE InderBITZEN

O equipamento de Inderbitzen demonstrou-se de fácil execução, de baixo nível tecnológico e de simples manuseio, contudo, a manutenção das condições do escoamento do fluido em sua superfície é algo relativamente complexo, devido aos baixos níveis de tensão a que o fluido está sujeito, sendo facilmente influenciados por efeitos viscoso ou de interação fluido/superfície que podem comprometer as condições de contorno estabelecidas inicialmente, contudo, simulam com perfeição o fenômeno que ocorre em campo.

A Figura 83, Figura 84 e a Figura 85 apresentam os gráficos de erosão versus (Tensão cisalhante Hidráulica, número de Froude e Velocidade de escoamento), sendo verificados nos gráficos de erosão versus Tensão Cisalhante Hidráulica a definição do “Fator K” de erodibilidade e no Apêndice VIII os dados experimentais.

Figura 83 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Argissolo

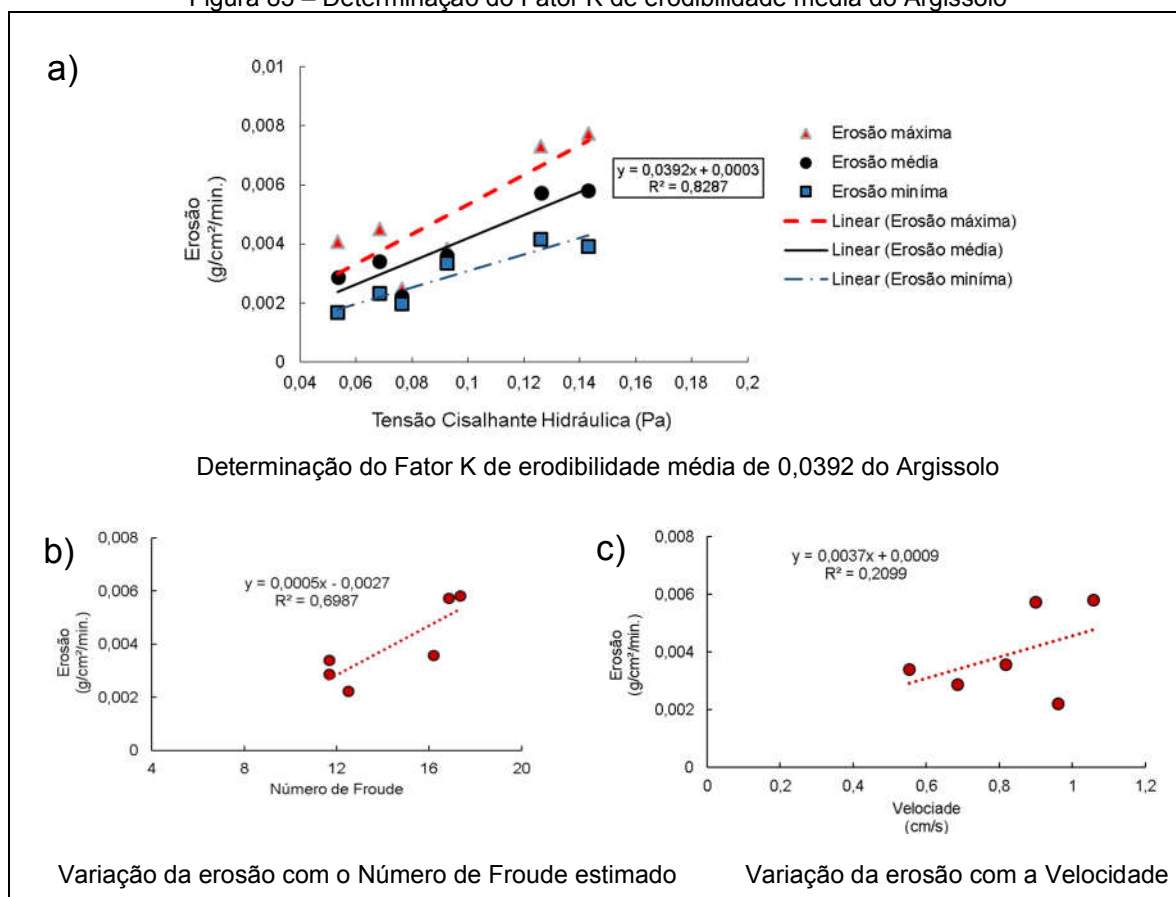


Figura 84 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Latossolo Amarelo.

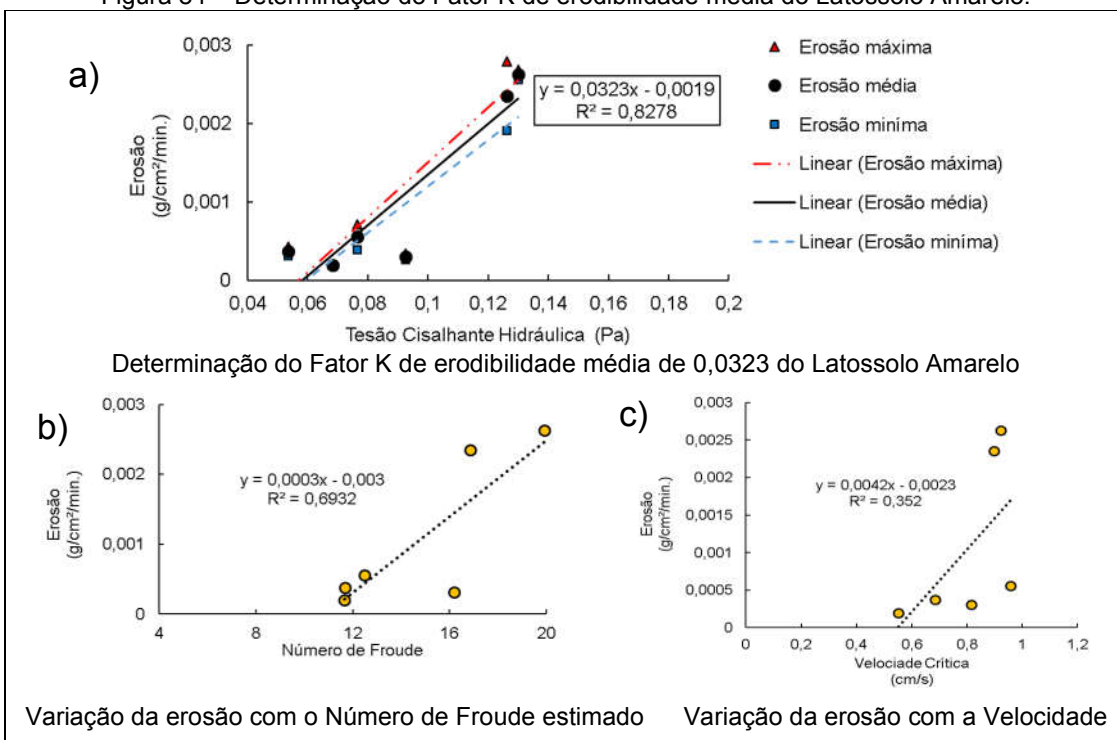
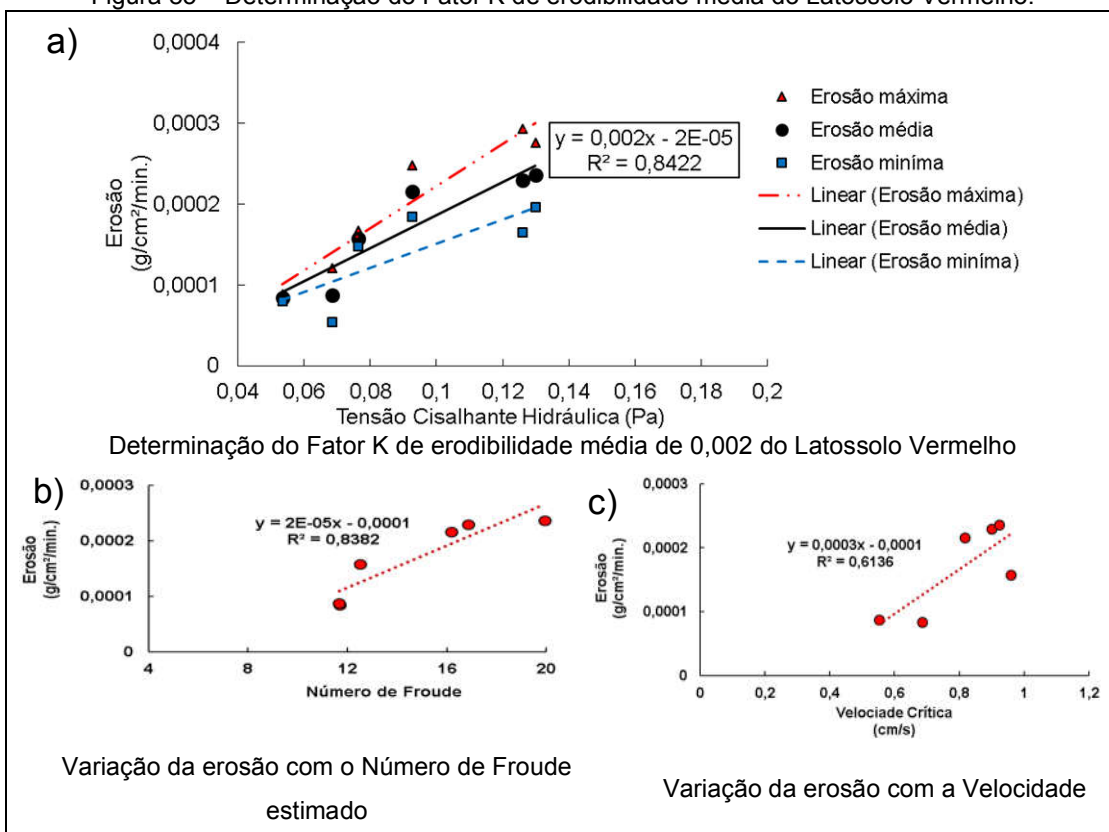
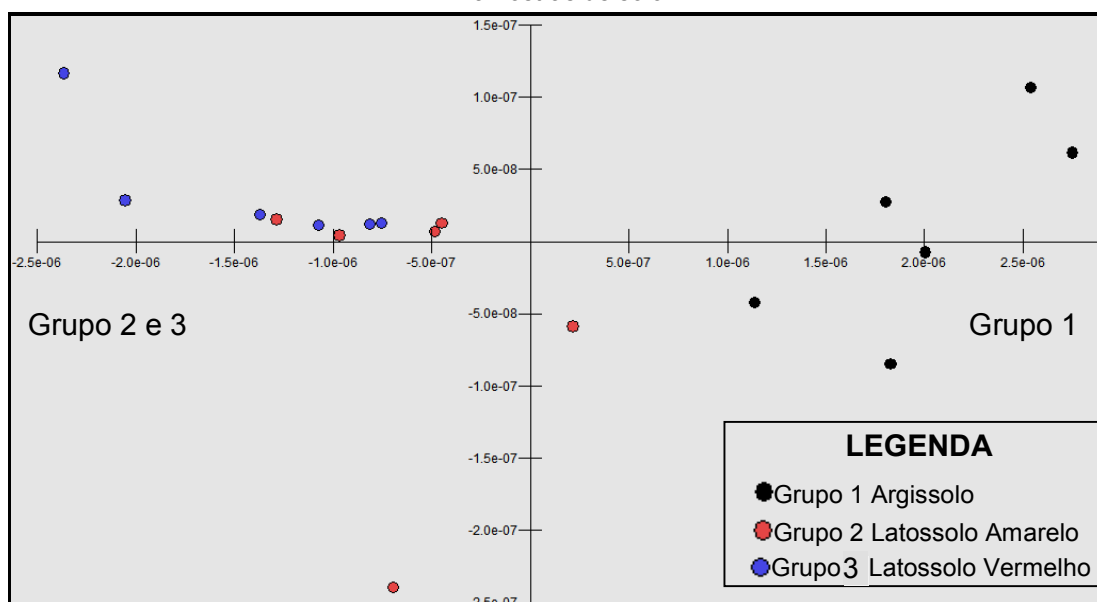


Figura 85 – Determinação do Fator K de erodibilidade média do Latossolo Vermelho.



Avaliando a dispersão dos dados de erosão por esforço cisalhante hidráulico, constatou-se que os Latossolos Amarelo e Vermelho possuíram agrupamentos menos dispersos e de semelhante tendência, diferentemente dos Argissolos que apresentaram maior dispersão. Este comportamento pode ser justificado pela pedogênese dos solos como evidenciado por Nogami e Villibor (2005), pois os solos lateríticos possuem em sua composição elementos cimentantes que propiciam maiores estabilidades físicas (como observado nas análises granulométricas com e sem dispersor químico) e em condições de hidráulicas podem desprender-se com maior uniformidade, já os Argissolo sujeitos a atuação apenas da interação de suas partículas e sua estrutura podem desprender-se de maneira menos regular, tal como evidenciada na Figura 86.

Figura 86 – Análise discriminante da características de erosão por esforço cisalhante hidráulico das amostras de solo



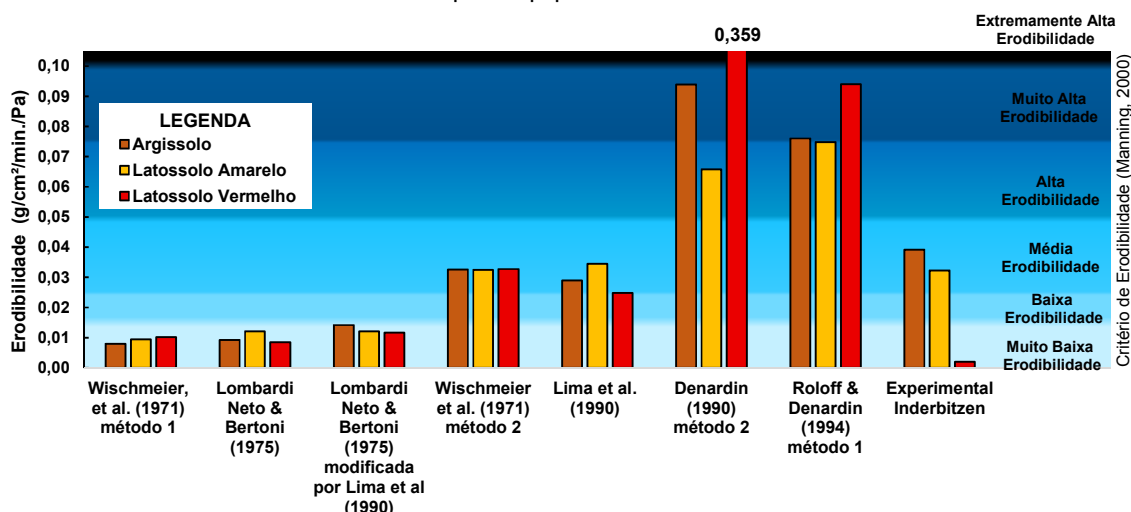
5.5 ANÁLISE INDIRETA DA ERODIBILIDADE

Os resultados da caracterização das amostras forneceram os meios para a determinação do fator K de erodibilidade com as formulações indiretas, baseadas em características físicas das amostras, tendo sua unidade expressa em $\text{Mg ha h}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ e convertida para $\text{g/cm}^2/\text{min.}/\text{pa}$ com o fator $5/3$, sendo possível compará-las com o encontrado experimentalmente com o equipamento de Inderbitzen conforme apresentados na Tabela 30 e classificados com quanto aos níveis de erodibilidade na Figura 87.

Tabela 30 – Fator K de erodibilidade determinado por formulações indiretas e o encontrado pelo equipamento de Inderbitzen

Solo	Unidade	Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	Lombardi Neto & Bertoni (1975)	Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	Lima <i>et al.</i> (1990)	Denardin (1990) método 2	Roloff & Denardin (1994) método 1	Experimental Inderbitzen
Argissolo		0,0080	0,0093	0,0141	0,0325	0,0290	0,0939	0,0760	0,0392
Latossolo Amarelo	g/cm ² /min./pa	0,0094	0,0121	0,0121	0,0325	0,0344	0,0658	0,0748	0,0323
Latossolo Vermelho		0,0102	0,0085	0,0117	0,0327	0,0248	0,3596	0,0940	0,0020

Figura 87 – Classificação do Fator K de erodibilidade determinados por formulações indiretas e com o encontrado pelo equipamento de Inderbitzen



Fazendo uma comparação entre os métodos indiretos com o utilizados nessa pesquisa experimental (Inderbitzen) é possível afirmar que pelas formulações de Denardin (1990) método 2 e Roloff & Denardin (1994) método 1 os resultados da erodibilidade dos solos estudados seriam superiores aos determinados na pesquisa; que as formulações de Wischmeier *et al.* (1971), método 2, e Lima *et al.* (1990) tiveram os resultados da erodibilidade dos solos que mais se aproximaram aos determinados na pesquisa; e que as formulações de Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima *et al.* (1990), Lombardi Neto & Bertoni (1975) e Wischmeier, *et al.* (1971) método 1 tiveram resultados da erodibilidade dos solos mais inferiores aos determinados na pesquisa.

Destaca-se que a classificação de Manning (2000) apresentou melhor ajuste para a descrição das variações entre as amostras, e que a de Bastos (1999),

embora muito bem aceita, definia quase todas as amostras como medianamente erodíveis.

Verificando a possibilidade dos resultados das formulações semi empíricas serem significativamente diferentes dos dados encontrados experimentalmente, foi constatado que 4 modelos discordam da referida verificação, apresentando dessa maneira correlação estatística entre tais métodos. Constatou-se ainda que das 3 formulações que apresentaram correlação com a hipótese adotada, sendo portanto distintas, 2 possuíam valores claramente muito elevados e distintos, dessa maneira, com respostas evidentemente diferentes. Dessa forma, observa-se que o dados experimentais obtidos pelo equipamento de Inderbitzen se ajustam a pelo menos 4 modelos de formulações da literatura como apresentado na matriz de correlação da Tabela 31.

Tabela 31 – Matriz de Correlação dos modelos das formulações semi empíricas com os dados obtidos experimentalmente

	Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	Lombardi Neto & Bertoni (1975)	Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	Lima <i>et al.</i> (1990)	Denardin (1990) método 2	Roloff & Denardin (1994) método 1	Experimental Inderbitzen
Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	1	---	---	---	---	---	---	---
Lombardi Neto & Bertoni (1975)	0,1083	1	---	---	---	---	---	---
Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	-0,1344	-0,3687	1	---	---	---	---	---
Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	-0,0596	0,0971	0,8598	1	---	---	---	---
Lima <i>et al.</i> (1990)	-0,03	0,7084	0,3381	0,6854	1	---	---	---
Denardin (1990) método 2	-0,8089	0,2194	0,2334	0,3214	0,4596	1	---	---
Roloff & Denardin (1994) método 1	-0,8074	0,1281	0,2428	0,2626	0,406	0,9517	1	---
Experimental Inderbitzen	-0,8172	0,1632	0,2421	0,2872	0,4304	0,9804	0,9936	1

Analisando as contribuições das metodologias geotécnicas de avaliação da erodibilidade temos que a média das amostras (1a, 1b ,2a e2b) de cada solo não atingiram os níveis de categorização das metodologias fundamentadas em propriedades plásticas, que para as formulações baseadas na granulometria foram quase em sua maioria tidas como resistentes a erosão ou pouco erodíveis, destacando-se que para a metodologia de Araújo (2000) os Latossolos tiveram uma

razão de dispersão tão baixas que não atingiram nem o valor mínimo para serem classificadas como Não Dispersivos com erodibilidade média, conforme a Tabela 32.

Tabela 32– Informações das avaliações geotécnicas de erodibilidade.

Pesquisas fundamentadas em propriedades de plasticidade dos solos				
Solo	Meireles (1967)	Santos e Castro (1967)	DNER (1979)	Bastos (1999)
Argissolo	-	-	-	-
Latossolo Amarelo	-	-	-	-
Latossolo Vermelho	-	-	-	-
Pesquisas fundamentadas em propriedades granulométricas dos solos				
Solo	Meireles (1967)**	Bastos (1999)	Eltz et al. (2001)	Fragassi (2001) (g/cm²)
Argissolo	Solos Pouco erodíveis	-	-	0,000282
Latossolo Amarelo	Solos Pouco erodíveis	-	-	0,000256
Latossolo Vermelho	Solos Pouco erodíveis	-	-	0,000356
Solo	DNER (1979)	Santos (2001) - %IP	Araújo (2000) - RD%	
Argissolo	-	Boa resistência a erosão	Solos não Dispersos com Erodibilidade média	
Latossolo Amarelo	Solos com boa a regular resistência a erosão	Boa resistência a erosão	-	
Latossolo Vermelho	-	Boa resistência a erosão	-	

Nota: (-) Não atingindo valores para receber afirmações das metodologias

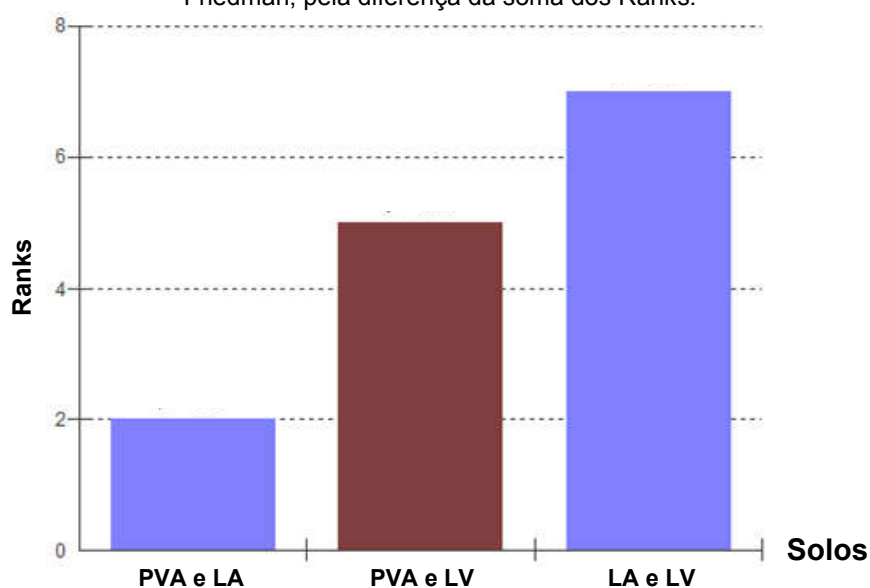
Tal motivo da dificuldade da classificação nos sistemas geotécnicos antes elencados, é a baixa correlação estatística discriminatória entre as propriedades dos solos como LL, LP, IP, Massa específica dos solos, Massa específica seca natural, índice de vazios, Porosidade e o Teor de matéria orgânica, pois realizando a análise estatística da verificação de propriedades significativamente diferentes pelo método de Friedman, não encontrou-se significância ao comparamos todas essas propriedades simultaneamente, observando-se $p > 0,05$ (não significativo) como mostra a Tabela 33.

Tabela 33 – Análise da verificação das propriedades dos solos como LL, LP, IP, Massa específica dos solos, Massa específica seca natural, índice de vazios, Porosidade e o Teor de matéria orgânica significativamente diferentes, pelo método de Friedman

	Grupo de solos		
	Argissolo PVA	Latossolo Amarelo LA	Latossolo Vermelho LV
Soma dos Ranks	15	13	20
Mediana	6,23	5,9	6,79
Média dos Ranks	1,875	1,625	2,5
Média dos valores	15,11	14,701	18,704
Desvio padrão	18,754	18,222	23,996
Friedman (Fr)	3,25		
Graus de liberdade	2		
(p)	0,1969		
Avaliação	Não significativo		

Verificando quais grupos de solos teriam menor não correlação entre si, observou-se que o Argissolo se assemelhava mais ao Latossolo Amarelo, do que o Latossolo Amarelo ao Vermelho, como mostra a Figura 88 e corroborando com a avaliação classificatória observada na carta de plasticidade de Casa Grande apresentada adiante.

Figura 88 – Avaliação da não correlação ($p > 0,05$) entre os grupos dos solos pelo método de Friedman, pela diferença da soma dos Ranks.

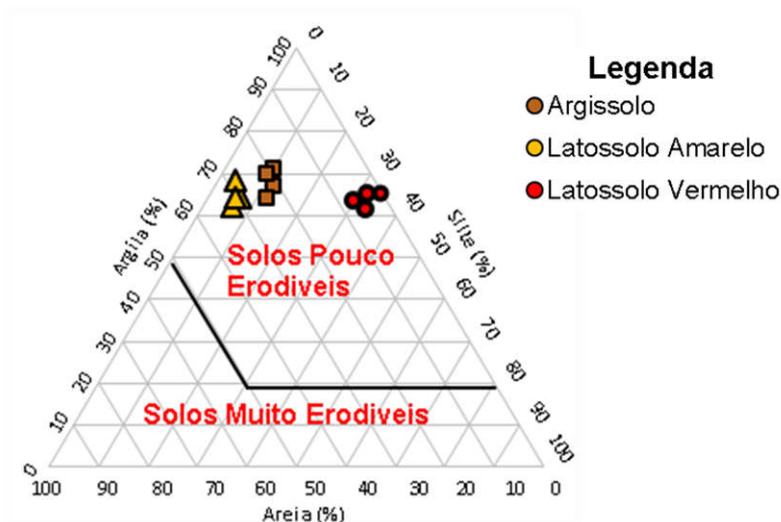


Analisando a erodibilidade das amostras pelo sistema proposto pela SEPLAN-MT com sua carta de Hierarquização dos solos de Mato Grosso, temos que ambos os Latossolo são tipos com de Baixa Erodibilidade e que apenas o Argissolo (antigo Podizólico) foi tido como de baixa a média erodibilidade.

Quando analisada sua classificação textorial pela proposta de Araújo e Campus (2013) vemos que todas as amostras são tidas como pouco erodíveis e

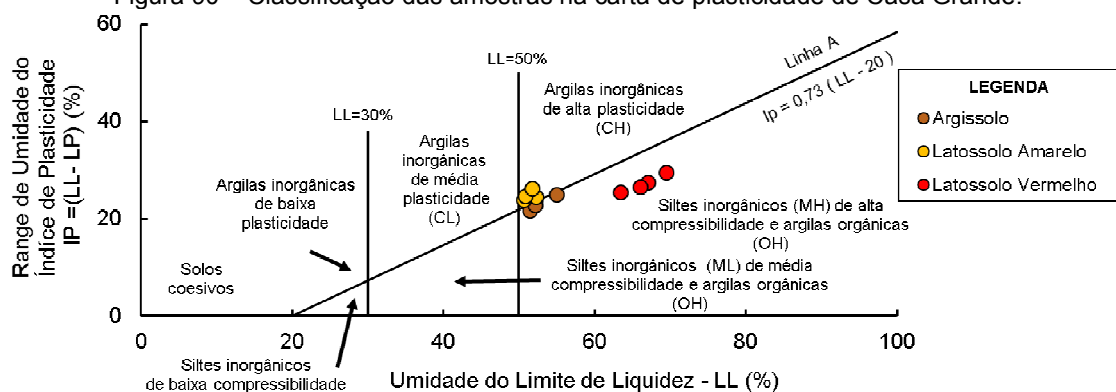
embora seja uma classificação nova, apresenta coerência com os resultados das metodologias geotécnicas e com os dados desta pesquisa, conforme a Figura 89

Figura 89 – Classificação textorial de avaliação da erodibilidade de solos proposta por Araújo e Campus (2013).



Analisando a classificação das amostras pelo Sistema de Unificado de Classificação de Solos – SUCS, em especial na carta de plasticidade de Casa Grande, vemos que o Latossolo amarelo é classificado como Argila inorgânica de alta plasticidade (CH), o Argissolo e Latossolo Vermelho como Silte inorgânico de alta compressibilidade, contudo, analisando as características granulométricas do Argissolo e a sua proximidade tanto de comportamento com o Latossolo Amarelo como de localização na carta de plasticidade será estabelecido como CH.

Figura 90 – Classificação das amostras na carta de plasticidade de Casa Grande.

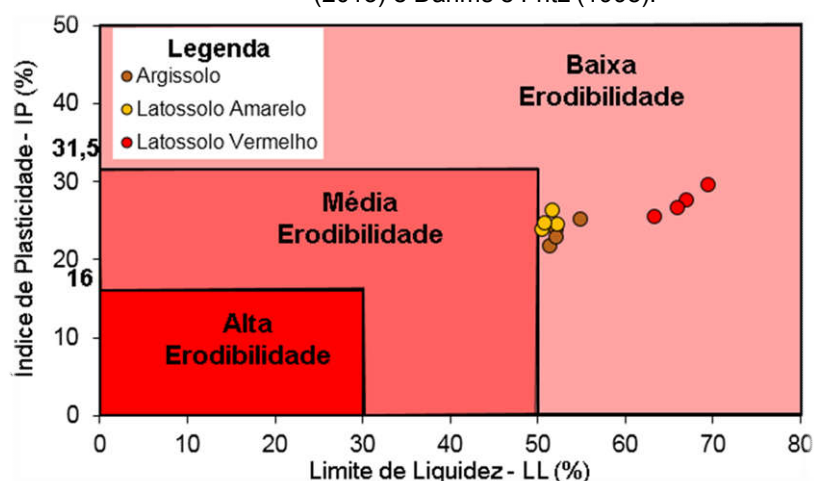


Avaliando a erodibilidade das amostras pela sua classificação SUCS apresentada por Gray e Sotir (1996), nota-se que o Latossolo Vermelho classificado

como MH é tido como mais erodível do que Argissolo e o Latossolo Amarelo classificados como CL. Cabe destacar que essa classificação considera o comportamento do solo em estado amolgado, uma vez que para a confecção de suas variáveis classificatórias as amostras são avaliadas na condição amolgada, convergindo para a constatação observada pela metodologia Miniatura Compactada Tropical em que também conferiu esta mesma hierarquização.

Analisando os níveis do índice de plasticidade e do limite de liquidez e das características de plasticidade esperadas para solos argilosos, observou-se que todas as amostras podem ser tidas como de Baixa erodibilidade, contudo tais indicações são apenas comparativas entre si e que com muita cautela podem ser extrapoladas, como apresentado na Figura 91.

Figura 91 – Classificação das amostras nas regiões de distintas tendências de erodibilidade para solos Argilosos, conforme valores de plasticidade predominantes de acordo com Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).



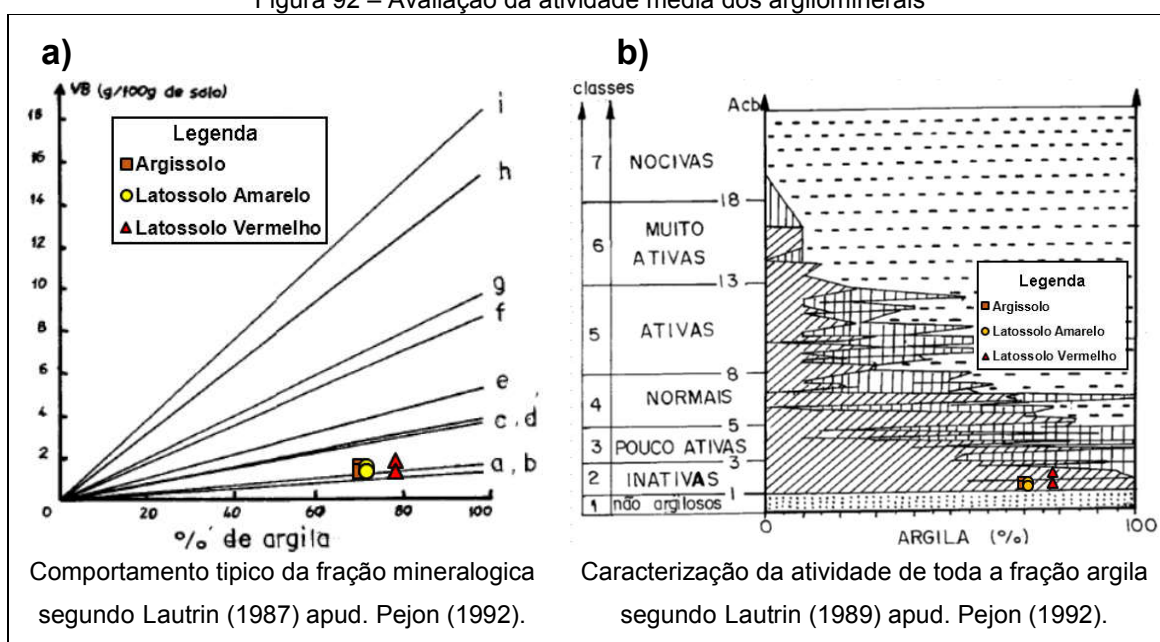
De acordo a classificação M.C.T pelo Método Expedito das Pastilhas de Nogami e Villibor (1994) o Latossolo Vermelho foi tido como de comportamento Não Laterítico Argiloso (NG') de Média a Alta erodibilidade, o Latossolo Amarelo e o Argissolo foram classificados como de comportamento Laterítico Argiloso (LG') de Baixa Erodibilidade conforme a Tabela 34. Nota-se que embora a amostra seja classificada pedologicamente como laterítica, sua textura e consistência podem lhe atribuir um comportamento de amostra não laterítica, chegando em alguns casos a manifestar comportamentos indesejados como fissuras ou expansões, como no caso do Latossolo Vermelho, e sendo o oposto também válido quando, a amostra tida como Argissolo ou (antigo Podizólico) pode apresentar uma comportamento laterítico, como no caso da amostra do Argissolo analisado neste trabalho.

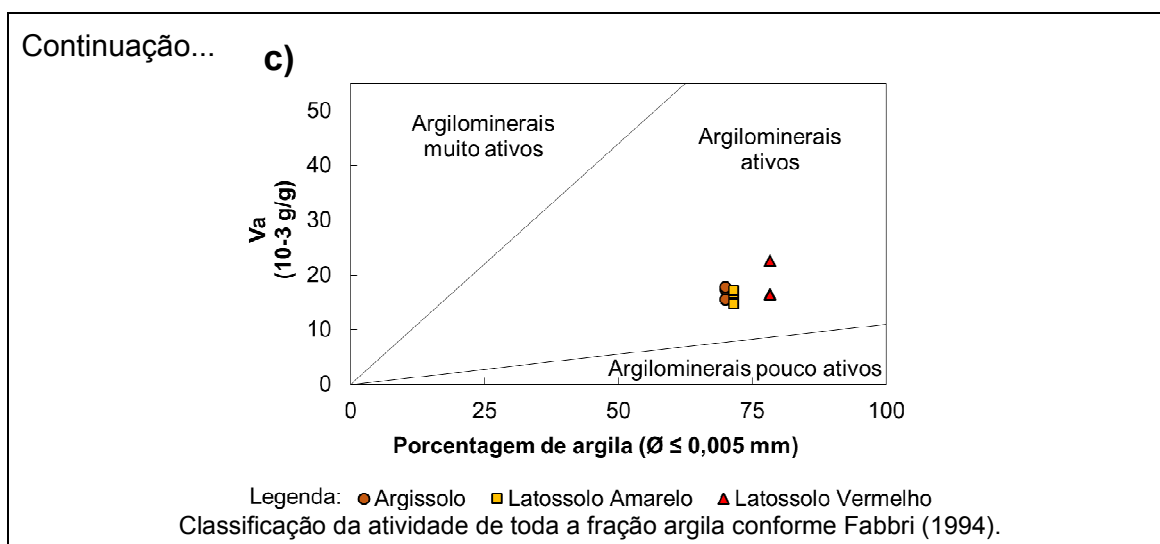
Tabela 34 – Avaliação da erodibilidade dos solos na classificação M.C.T.

Grupo M.C.T.		
	NG'	LG'
Erodibilidade	Média a Elevada	Baixa
Formas de erosão	Sulcos e Desagregações Elevadas	Desagregações Baixas
Solos	Latossolo Vermelho	Argissolo e Latossolo Amarelo

Analisando a atividade das amostras através da Difração de Raios X, constatou-se que seus argilominerais têm pouca atividade, mas, devido à sua elevada quantidade, foi realizado o ensaio de adsorção de Azul de Metileno, com o emprego das cartas de classificação de Lautrin (1989) e Fabbri (1994). Observou-se que o comportamento das amostras eram semelhantes a compostos que basicamente tinham Caulinita ou até 5% de Illita como as dos grupos a e b, conforme indicado na Figura 92, que segundo Lautrin (1989) seu grupo total de argilas eram tidas como Inativas conforme a Figura 92b, contudo, segundo Fabbri (1994) ainda assim todas eram tidas como de comportamento ativo de seus argilominerais conforme a Figura 92c.

Figura 92 – Avaliação da atividade média dos argilominerais





Dado a mineralogia por DRX não apontar elementos ativos e as cartas de Lautrin (1987 e 1989) também indicarem inatividade atividade dos argilo minerias, constata-se que o limite estabelecido por Fabbri (1994) para dividir os grupos de Argilo minerais ativos dos pouco ativos foi ineficaz na classificação dos solos desta pesquisa, recomendando-se a realização de um novo ajuste para maior efetividade classificatória, mas reconhece-se que, conforme apresentado por Fabbri (1994), um material tido como muito ativo ou apenas ativo, não significa que tenha expansões ou contrações elevadas, mas que pode apresentar em algum dado momento um comportamento indesejado em sua vida.

Na Tabela 35 encontra-se as verificações de erodibilidade com os método utilizados nesta pesquisa, constatando-se uma convergência de afirmações indicando para um baixa erodibilidade destes solos, contudo, como já apresentado a erodibilidade pode ser bruscamente modificada conforme o estado de amolgamento das amostras e por tanto destaca-se a importância de verificações em diferentes estados para avaliações mais abrangentes.

Tabela 35 – Verificações da erodibilidade dos solos pelos métodos investigativos empregados

Método	Amostra de solo		
	Argissolo – PVA	Latossolo Amarelo – LA	Latossolo Vermelho -LV
Utilização do Fator (K) e classificação de Manning. (2000)			
Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade
Lombardi Neto & Bertoni (1975)	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade
Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade
Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	Média Erodibilidade	Média Erodibilidade	Média Erodibilidade
Lima <i>et al.</i> (1990)	Média Erodibilidade	Média Erodibilidade	Baixa Erodibilidade
Denardin (1990) método 2	Muito Alta Erodibilidade	Alta Erodibilidade	Extremamente Alta Erodibilidade
Roloff & Denardin (1994) método 1	Muito Alta Erodibilidade	Alta Erodibilidade	Muito Alta Erodibilidade
Experimental Inderbitzen	Média Erodibilidade	Média Erodibilidade	Muito Baixa Erodibilidade
Fundamentadas em propriedades geotécnicas de plasticidade dos solos			
Meireles (1967)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
Santos e Castro (1967)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
DNER (1979)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
Bastos (1999)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
Fundamentadas em propriedades geotécnicas de granulométricas dos solos			
Meireles (1967)**	Solos Pouco erodíveis	Solos Pouco erodíveis	Solos Pouco erodíveis
Bastos (1999)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
Eltz <i>et al.</i> (2001)	Não classificado	Não classificado	Não classificado
Fragassi (2001) (g/cm ²)	0,000282	0,000256	0,000356
Fundamentadas em propriedades geotécnicas mistas dos solos			
DNER (1979)	Não classificado	Solos com boa à regular resistência à erosão	Não classificado
Santos (2001)	Boa resistência à erosão	Boa resistência à erosão	Boa resistência à erosão
Araújo (2000)	Solos não Dispersos com Erodibilidade média	Não classificado	Não classificado
Fundamentadas em sistemas ou cartas de classificação			
Araujo e Campus (2013)	Solos Pouco erodíveis	Solos Pouco erodíveis	Solos Pouco erodíveis
Bergaya e Lagaly (2013) e Dahms e Fritz (1998).	Baixa Erodibilidade	Baixa Erodibilidade	Baixa Erodibilidade
Seplan-MT	Baixa Erodibilidade	Baixa Erodibilidade	Baixa a Média Erodibilidade
Grupo M.C.T.	Baixa Erodibilidade	Baixa Erodibilidade	Média a Elevada Erodibilidade
Gray e Sotir (1996) Hierarquia de Erodibilidade Grupo SUCS		PVA e LA > LV	
Características de comportamento evidenciadas que influenciam na erodibilidade			
Difração de Raios X	Minerais não solúveis em água e de baixa atividade		
Adsorção de Azul de Metileno Lautrin (1987 e 1989)	Solos Inativos	Solos Inativos	Solos Inativos
Adsorção de Azul de Metileno Fabbri (1994)	Solos Ativos	Solos Ativos	Solos Ativos
Comportamento M.C.T. Reabsorção	Poucas Fissuras Laterais	Poucas Fissuras Superficiais	Expansão Volumétrica
Comportamento ensaio de Desagregação	Baixa desagregação	Baixa desagregação	Média a Alta desagregação com fraturamento

5.6 ANÁLISE DA ERODIBILIDADE DE MANEIRA DIRETA

Aos analisar os níveis de erodibilidade encontrados nesta pesquisa com os encontrados experimentalmente, nas condições de pré umedecimento, verificou-se uma similaridade com algumas amostras estudadas por Bastos (1999) e Stephan (2010) indicando um comportamento perante a condição hidráulica de cisalhamento muito próximo como ilustrado na Figura 93 e a Tabela 36 como os dados de tensão cisalhante hidráulica crítica.

Figura 93– Avaliações das níveis de erodibilidade dos solos da pesquisa e de outros autores, com a classificação de Manning (2000).

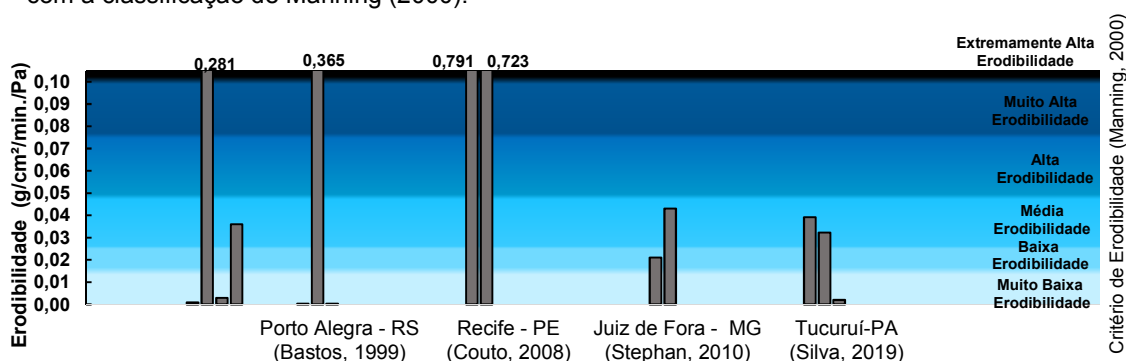


Tabela 36 – Avaliação da erodibilidade e das tensões cisalhantes hidráulicas críticas encontradas na pesquisa e em outras que utilizaram o mesmo equipamento.

Localidade e autor	Amostra	Condição	Erodibilidade - K (g x min./cm²/Pa)	Tensão Cisalhante Hidráulica Crítica (Pa)
Porto Alegre - RS (Bastos, 1999)	ALGB	Pré- umid	0,0003	indet.
	ALGC	Pré- umid	0,281	0,86
	RS239 BC	Pré- umid	0,0004	indet.
	RS239C	Pré- umid	0	indet.
	PTB	Pré- umid	0,0009	indet.
	PTC	Pré- umid	0,365	1
	CDB	Pré- umid	0,0029	indet.
Recife - PE (Couto, 2008)	CDC	Pré- umid	0,036	0,56
	P-01	Pré- umid	0,7914	0,7
	P-02	Pré- umid	0,7234	0,72
Juiz de Fora - MG (Stephan, 2010)	Morro do Alemão	Pré- umid	0	indet.
	Jardim Caiçaras	Pré- umid	0,021	0,12
	Bom Jardim	Pré- umid	0,043	0,42
Tucuruí-PA (Silva, 2019)	Argissolo	Pré- umid	0,0392	indet.
	Latossolo Amarelo	Pré- umid	0,0323	0,058
	Latossolo Vermelho	Pré- umid	0,002	0,01

O ensaio de Desagregação apontou para uma pequena erodibilidade para o Argissolo por abatimento, praticamente nenhuma erodibilidade para o Latossolo Amarelo, que se manteve intacto durante todos os testes, e para o Latossolo Vermelho uma erodibilidade muito variável, pois em sua condição natural mantinha-se com baixos níveis de abatimento, mas quando perturbado apontava altas taxas com a presença de fraturamento.

O “Pinhole Test” não pode ser executado nesta pesquisa devido à impossibilidade da confecção do corpo de prova, pois as amostras de solo eram extremamente sensíveis a esforços de esmagamento, e quando lapidadas em campo eram facilmente amolgadas ou fraturadas, o que descaracterizava a sua condição natural. Cabe mencionar que devido ao diâmetro muito pequeno (aproximadamente 35 mm) dos tubos de cravação e ensaio, ocorria que, ao serem cravados em campo, as amostras adentravam parcialmente em seu interior, aderindo-se as paredes internas e não adentrando até a cota estabelecida, semelhantemente ao comportamento da cravação de um canudo plástico de refrigerante em um solo laterítico.

O método expedito das pastilhas constatou comportamentos de leves fissuras para o Argissolo e o Latossolo Amarelo, e apontou para uma leve expansão volumétrica do Latossolo Vermelho, que foi analisada e atribuída à significativa quantidade de silte, indicando que na condição amolgada pode haver expansões e favorecer a instalação de processos erosivos.

6. CONCLUSÕES DA PESQUISA

As metodologias empregadas tanto para a análise do objeto de estudo “Reservatório da UHE Tucuruí”, quanto para a amostragem e análise das propriedades dos solos em relação ao seu comportamento e ao seu potencial desempenho frente as tensões cisalhantes hidráulicas levam a diversas conclusões que serão apresentadas ordenadamente a seguir.

6.1 AVALIAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE

A utilização de formulações semi empíricas baseadas em propriedades de caracterização pode conduzir a erros gravíssimos, desde subestimar até superestimar a erodibilidade dos solos. As formulações que mais se aproximaram dos dados experimentais foram das de Wischmeier *et al.* (1971), método 2, e Lima *et*

al. (1990). Além do exposto cabe destacar a importância da adequada escala da classificação empregada, sendo recomendada a proposta por Manning (2000) por melhor classificar os solos desta pesquisa.

Em relação as classificações geotécnicas dos solos, não foi possível classificar as amostras estudadas nos métodos propostos por Meireles (1967), Santos e Castro (1967), DNER (1979), Bastos (1999) e Eltz *et al.* (2001), enquanto nas metodologias de Meireles (1967), DNER (1979), Santos (2001) e Araújo (2000) as amostras foram tidas em sua maioria como de pouco erodibilidade.

Por meio da classificação da SEPLAN-MT (2000), os solos estudados ficaram classificados como de baixa a média erodibilidade; já pela análise de Araujo e Campus (2013) os solos foram tidos como pouco erodíveis, indicando convergência na classificação.

Analisando em hierarquia de erodibilidade a ordenação de Gray e Sotir (1996) pela classificação SUCS, nota-se uma convergência com a mesma proposição da metodologia M.C.T, sendo muito eficaz em suas proposições quanto a avaliações de materiais amolgados, contudo, na condição indeformada o solo que obteve a menor erodibilidade foi o Latossolo Vermelho.

A avaliação da atividade dos argilominerais por meio do método de adsorção de azul de metileno em todas as metodologias e condições convergiram para uma baixa atividade. As classificações de Lautrin (1987 e 1989) indicaram a presença de argilominerais de baixa atividade e de inativo grau de nocividade, enquanto que a classificação de Fabbri (1994) estabeleceu que todos os solos eram tidos de argilo minerais ativos.

De modo geral, nota-se através dos métodos investigativos empregados que os solos analisados neste trabalho, as classificações indiretas de erodibilidade demonstram ser uma excelente alternativa para a avaliação de sua erodibilidade, sendo sempre recomendado avaliações experimentais para suas validações.

6.2 AVALIAÇÃO DIRETA ERODIBILIDADE

A aferição da erodibilidade dos solos desta pesquisa com o equipamento de Inderbitzen demonstra, conforme a classificação Manning (2000), uma baixa erodibilidade para o Latossolo Vermelho e uma média erodibilidade para o Argissolo e para o Latossolo Amarelo, que se assemelham a alguns solos de Minas Gerais estudados por Stephan (2010) e do Rio Grande do Sul por Bastos (1999), contudo,

recomenda-se avaliações com outros sistemas de ensaios como os apresentados por Briaud *et al.* (2019), para conclusões mais contundentes.

A utilização do equipamento de Inderbitzen como ferramenta de investigação preliminar pode trazer inúmeros benefícios devido à sua simplicidade e baixo custo tecnológico, mas para análises mais profundas, ou na identificação de solos altamente erodíveis, sugere-se a sua utilização em paralelo à de outros equipamentos também consolidados.

O ensaio de Desagregação identificou para as amostras do argissolo um leve abatimento, independentemente do modo de imersão e sendo mais evidente para as amostras cilíndricas; o Latossolo Amarelo se demonstrou intacto no ensaio em todos os modos e geometrias e já o Latossolo vermelho apresentou uma dispersão muito variável, desde leve a total e com a presença de fraturamentos. Concluindo que o Argissolo tem maior facilidade para apresentar desagregações que o Latossolo Amarelo e que o Latossolo Vermelho pode apresentar elevados níveis de desagregação, recomendando-se utilizações que evitem a sua perturbação e exposição.

O método expedito das pastilhas constatou leves fissurações no Argissolo e no Latossolo Amarelo, e evidenciou uma leve expansão volumétrica do Latossolo Vermelho, sendo justificada pela presença de silte em sua composição granulométrica de maneira acentuada, indicando que na condição amolgada pode haver expansões e favorecer a instalação de processos erosivos.

De modo geral, pode-se concluir, em função das técnicas executadas, que os solos analisados nesta pesquisa e que compõem a área do reservatório da UHE Tucuruí, que são de baixa a média erodibilidade, sendo recomendado atenção para o tipo de uso e ocupação destes solos, sugerindo-se a manutenção da cobertura superficial dos solos de média erodibilidade e para o Latossolo Vermelho evitar usos que possam desestabilizar e amolgar sua estrutura.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De modo a expandir ou complementar a pesquisa e com base nos estudos desenvolvidos neste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros a realização das seguintes análises:

- Elaborar o Mapa Pedológico do Município de Novo Repartimento em escala de 1:300.000 ou 1:400.000 para averiguações das tipologias e suas abrangências, sendo este o único adquirido neste trabalho;
- Modelar e avaliar a Susceptibilidade a erosão laminar com as formulações de predição de perdas de massa de grandes áreas empregando os dados de erodibilidade aferidos nesse trabalho e utilizando imagens de satélite atuais, a fim de promover comparações com os estudos anteriores, como os de Macedo *et. al* (2007);
- Realizar o levantamento das condições de todos os contribuintes da área de drenagem do reservatório da UHE Tucuruí e a proposição de planos de gestão e monitoramento destes elementos e suas áreas de drenagem;
- Com o auxílio de planos de investigação, como mapas de áreas mais susceptíveis a erosões do cenário atual, realizar levantamentos de campo das condições de instauração de processos erosivos Laminares ou Lineares das áreas de drenagem, das bordas do reservatório e suas ilhas;
- Promover estudos e buscar soluções para o controle ou mitigação dos impactos das variações do nível do reservatório com as suas áreas de borda da UHE Tucuruí;
- Utilizar a metodologia e os equipamentos construídos nesta pesquisa para a avaliação dos índices de erodibilidade dos solos de mesma e de outras características pedológicas dos municípios que compõem a área de integração do lago da UHE Tucuruí, utilizando como ferramenta de auxílio os mapas pedológicos dos planos diretores municipais;
- Verificar experimentalmente as diferenças de erodibilidade apontados pelo equipamento de Inderbitzen com as de outros equipamentos como os elencados por Briaud *et al.* (2019);
- Avaliar os níveis de erodibilidade do equipamento de Inderbitzen em novas condições de geometria da amostra e de escoamento não laminares, com fluxos em regime turbulento;
- Conduzir estudos para a estabilização dos níveis de expansão do Latossolo Vermelho analisado nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização.** Rio de Janeiro, RJ, 2016a. 8p.

____. **NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 1996a.2p.

____. **NBR 13602: Solo - Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 1996b. 5p.

____. **NBR 14114: Solo - Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole test.).** Rio de Janeiro, RJ, 1998. 8p

____. **NBR 6458: Solo - Determinação da Massa Específica.** Rio de Janeiro, RJ, 2017a. 10 p.

____. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ, 2017b.5p.

____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, RJ, 2016b. 3p.

____. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ, 2018a. 12p.

____. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.** Rio de Janeiro, RJ, 2016c. 9p.

____. **NBR 9813: Solo — Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação.** Rio de Janeiro, RJ, 2016c. 5p.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios.** Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília, 2000, 106p.

ARAÚJO, A. R. O; ROCHA, G. M. Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – Anppas. **Unidades de Conservação em Tucuui/PA como instrumento de Gestão Territorial,** IV Encontro Nacional Anppas, Brasília-DF, 2008.

ARAÚJO, F. S; SALVIANO, A. A. C. NETO; M. R. H. **Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí.** SCIENTIA PLENA Vol. 7, N10, 2011 6p. Disponível <<https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/viewFile/358/206>>.

ARAUJO, R. C. **Estudo da erodibilidade de solos da Formação Barreiras.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 148p, 2000.

ARAÚJO, R. C., CAMPOS, T. M. P. **Uso dos Ensaio de Penetração de Cone, Desagregação, Sucção e Resistência à Tração para Avaliar a Erodibilidade.** Geotecnia (Lisboa), v. 128, p. 67-85. 2013.

BALEEIRO, C. B.R. *et al.* Erodibilidade de Solos Situados nas Margens do Reservatório da UHE – Furnas. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Minas Gerais. 2016, 8p.

BARRATA, A. S. N. **AMBIENTE E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO: A Questão Ambiental dos Desmatamentos em Áreas Protegidas na Amazônia. Estudo de caso na RDS (Reserva de Desenvolvimento Sustentável) ALCOBAÇA, Tucuruí – Pará-Brasil.** Universidade de Coimbra, Faculdade de Letras (FLUC), Instituto de Estudos Geográficos. Coimbra, 2011. 112p.

BASTOS, C. A. B. **Estudo Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não Saturados.** Tese de doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1999, 303 p.

BELL, F. G., **Lime stabilization of clay minerals and soils.** Eng. Geol. 42, 223–237, 1996.

BERGAYA, F., LAGALY G. **Handbook of Clay Science.** 2º Edition. — Elsevier Ltd., 2013. 1674 p.

BERTONI, J.; e NETO, F.L. **Conservação do solo.** 8 ed. São Paulo: Ícone. 2012.

BERTONI, J.; NETO, F.L.; JUNIOR, R. B. **Equação de perdas de solo.** Campinas-SP: Instituto Agrônômico, 1975. 25p.

BERTONI, J.; NETO, L. F. **Conservação do solo.** Piracicaba, Livro CERES. 1990. 392p.

Brasil, ELETRONORTE. **UHE Tucuruí: Plano de utilização do reservatório: caracterização e diagnóstico do reservatório e de sua área de influência.** TUC-10-26346-RE. Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (ELETRONORTE), Brasília, DF. 3 v., 1988.

Brasil, ELETRONORTE. **Estudos e estratégias para a utilização de sedimentos acumulados nos reservatórios de hidrelétricas de forma a resolver conflitos sócio ambientais.** 2004.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** 234 p. Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. Rio de Janeiro. 1986.

CARVALHO, J. C. *et al.* **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro.** Universidade de Brasília 1 ed. Brasília, 2006, 464p.

CASTILLO, C., Gómez, J.A. **A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches.** Earth Sci. Rev. 2016 160, 300–319.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Metodologia para o Desenvolvimento de Usinas Hidrelétricas sob o Conceito de Usinas-Plataforma. Relatório3.** Relatório Técnico nº 7953/2016. Rio de Janeiro, 2016, 181p. Disponível em < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/24216247/Produto+3-36.pdf/8a3a8337-07b1-4074-a7b6-b2b3e33a0b37>>

CHEN, J. HAIYUN, S. BELLIE, S. MERVYN, R. P. **Population, water, food, energy and dams**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. 11p.

CMB – Comissão Mundial de Barragens. **Estudo de Caso Brasileiro, UHE Tucuruí, Relatório de Escopo**. Programa de Planejamento Energético e Ambiental Instituto de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999, 47p. disponível < [http://www.ib.usp.br/limnologia/textos/Usina%20Hidrel%20E9trica%20de%20Tucuru%ED%20\(Brasil\)%20RELAT%20RIO%20FINAL%20DA%20FASE%20DE%20ESCOPO%20AGOSTO%20DE%201999.pdf](http://www.ib.usp.br/limnologia/textos/Usina%20Hidrel%20E9trica%20de%20Tucuru%ED%20(Brasil)%20RELAT%20RIO%20FINAL%20DA%20FASE%20DE%20ESCOPO%20AGOSTO%20DE%201999.pdf)>.

Comissão Mundial de Barragens – CMB. **Relatório: Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil)**. 5º Floor, Hycastle House, Vlaeberg, Cape Town, SOUTH AFRICA, 2000.

CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout do 137Cs**. Doutorado em Ciências: Área de concentração Energial Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003, 79p.

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015, 124p.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Tucuruí – Sa.22-Z-C Estado do Pará**. Departamento de Minas e Energia, Belém, 2013, 122p.

Das, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 7º ed. Cengage Learning, 2010 666 p.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. Blucher, São Paulo, 2011.

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. **Manual do Sistema de Gestão Ambiental – UHE Tucuruí**. Superintendência de Gestão de Ativos de produção da Geração – OGG, Tucuruí-PA, 2018.34 p. Disponível: < http://www.eletronorte.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/pilares/meioAmbiente/sistemaGestao/MANUAL_DO_SISTEMA_DE_GESTAO_AMBIENTAL_UHE_TUCURUx.PDF>

FABBRI, G. T. P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlo, USP. São Carlos – SP, 157p, 1994.

FARIAS, M. H. C. S.; BELTRÃO, N. E. S.; b SANTOS, C. A.; c CORDEIRO, Y. E. M.; **IMPACTO DOS ASSENTAMENTOS RURAIS NO DESMATAMENTO DA AMAZÔNIA**. Mercator, Fortaleza, v. 17, 2018.

FEARNSIDE, PHILIP M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Vol. 1. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia –INPA. Editora INPA, 2015.

FELIPE, F. O., ARAUJO, R. C. **Uso de Parâmetros Geotécnicos como Indicadores da Erodibilidade de Solos.** Geotecnia (Brasil), v. 142, p. 63-78, 2013.

FRAGASSI, P. F. M. **Estudo da Erodibilidade dos solos Residuais de Gnaiss da Serra de São Geraldo e Viçosa (MG).** Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001, 136 p.

Giordano *et al.* **Studi applicativi per la realizzazione della carta dell'erosione potenziale del territorio siciliano e del relativo sistema informativo territoriale.** Ed. Anteprema s.r.l., Palermo (in Italian). 2004.

GONÇALVES, A. L. *et al.*, **MORFOLOGIA DO SOLO E DA VEGETAÇÃO EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA ADJACENTE À USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ, PARÁ, BRASIL.** Centro Científico Conhecer. São Paulo. 2017. Disponível: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2017a/agrar/morfologia%20do%20solo.pdf>>.

GRAY D. H. SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization – A practical guide for erosion control.** New York: Wiley, 1996. 337p.

GUERRA, A. J. T.; SILVA A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** 8ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. 340p.

HENDERSON, F. M. **Open channel flow.** New York: McMillan Publishing Co. Inc., 1980 522p.

HILTMANN, W. SREIBRNY, B. Handbuch zur erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Berlin; Ed. Springer, vol. 5. **Tonmineralogie und Bodenphysik** – 1998. 316p.

IDEFLORBIO – Instituto de Desenvolvimento da Florestal e da Biodiversidade. **Área de Proteção Ambiental do Lago de Tucuruí.** Belém-PA, 2018. Disponível <<http://ideflorbio.pa.gov.br/unidades-de-conservacao/regiao-administrativa-tucuruui/apa-do-lago-de-tucuruui/>>

Instituto Nacional de Meteorologia – IMET. **GRAFICOS: Chuva Acumulada Mensal X Chuva (Normal Climatológica 61-90), anos de 2008 à 2018.** Disponível: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficoshttp://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>

Instituto Nacional de Meteorologia – IMET. **NORMAIS CLIMÁTICAS DO BRASIL: Precipitação Acumulada mês de Março Normal Climatológica 1981 – 2010.** Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>

ISHIHARA, J.H. **Conhecimento técnico e a regulação ambiental na Amazônia: a utilização da Bacia hidrográfica nos EIA/RIMA das UHE do Rio Madeira e de Belo Monte.** Doutorado em Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015, 247p.

JÚNIOR, J. A. M. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2010, 113p.

JUNIOR, O. A. C. J; GUIMARAES, R. F. EROSÃO MARGINAL DO RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ PELO EFEITO DAS ONDAS. In: IV Simpósio Nacional de Geomorfologia. Universidade Federal do Maranhão, Maranhão 2002. Disponível:< <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/4/2/136.pdf>>.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico para o entendimento do processo erosivo no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcante no Cabo de Santo Agostinho / PE**. Tese de Doutorado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife – PE, 2006.

LEMOS *et al.* **Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do rio da bucha (pr), através do Aparelho de Inderbitzen**. Geografar, v2, Curitiba, 2007. 16 p.

LEPCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de Textos. 2 ed. São Paulo, 2010, 215 p.

LIMA, J. L. M. P. **A Importância da Acção Combinada do Vento e da Chuva no Escoamento Superficial**. 5º Congresso Ibérico – Gestão e Planejamento de Água. 04-08 de Dezembro de 2006.

MACEDO, I. L; THEODORO, S. H; HERNANDEZ, H. M. O. e CAMPAGNOLI F. **Assessment of soil loss via laminar and linear erosion in the influence area of Tucuruí hydroelectric power station reservoir, Brazil**. In: Off-Site Impacts of Soil Erosion and Sediment Transport. Prague. Czech Republic. 2007.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. de P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. da R. **Fator de Erodibilidade e Tolerância de Perda dos Solos do Estado de São Paulo**. Acta Scientiarum, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MITCHELL, J. K., SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**, third ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 577 pp. 2005.

MONTEIRO, M. *et al.* **Unidades de Conservação no Pará: Desafios e perspectivas para a gestão sustentável**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. Coordenação de Pesquisa e Pós- Graduação. Cadernos Idéias e Debates, 9, 2005.

MONTOYA, A. D. V; LIMAS, A. M. M; ADAMI, M. **Mapeamento e Análise Temporal da Paisagem no Entorno do Reservatório de Tucuruí-PA**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro. 2018.

NASCIMENTO, U.; CASTRO, E. **Preventive Measures Against Slope Erosion. Criteria for Soil Selection**. Memória no. 451, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, POR, 19 p., 1974.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. trad. rev. 8º ed. Thomson Learning, São Paulo, 2007, 562p.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Identificação Expedita dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais**. In: COBRAMSEF – ABMS, 1994, Foz do Iguaçu, Anais.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor, 1995. 240 p.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor, 2009. 292 p.

NUNES, M. S. **Fundamentos de Mecânica dos Solos**. Instituto Politécnico, 15º ed. 53 p. 2010.

OLIVEIRA, P. T. S.; Wendland, E.; NEARING, M.A. **Rainfall erosivity in Brazil: A review**. *Catena*, v.100, 2012, 139-147p.

PDRS – **Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do lago de Tucuruí. 2018.** Disponível: <
http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0a6ea-c82-0b58-40bf-a60e-c80828c0ec90&groupId=10157>

PEJON, O. J. ARAUJO, T, P. ARAB, P. B. **Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests**. Elsevier: Applied Clay Science, 2015. 8 p.

PEJON, O. J. **Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 1992.

PENA, Rodolfo F. Alves. **As Maiores Hidrelétricas do Mundo**; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/as-maiores-hidreletricas-mundo.htm>>. Acesso em 30 de agosto de 2018.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009, 279p.

RIBEIRO, F. L. C. **Análise de processos erosivos superficiais na área das minas Alegria Norte e Alegria Sul**. Dissertação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016, 115p.

SAEDI, T; SHOROF, M; GORJ, M; MOGHADAM, B. K. **Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate. in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study**. *Geoderma*. 2016.

SALES, M. M. *et. al.* **Erosão em borda de reservatório**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia: Gráfica UFG, 584p. 2017.

SAMPAIO, T. V. M. **Estudo de metodologias para identificação de formas de vertentes na bacia do rio curralinho – região metropolitana de Curitiba/pr**. Geografar 2013. 25 p.

SANTOS, E. F. dos. **Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.DE

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 5^o ed. Viçosa, 2005.

SANTOS, R.M.M. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1998). Ensaio de erodibilidade em voçorocas do município de Goiânia. **in:** 11^o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Vol. 1, ABMS, Brasília, DF, pp. 581 – 588.

SANTOS, R.M.M. (1997). **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, GDM-044A/97, 120p.

SCHNEIDER, M. GHILARDI, R. J. GARCIA, M. A. **Análise da Paisagem E Da Vulnerabilidade Ambiental Na Área de Influência da UHE Tucuruí (PA)**. XXVII Seminário Nacional De Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens, Belém, 2007, 15p.

Secretaria de Estado de Integração Regional – SEIR. **Diretoria de Integração Regional**. Sistema de informações municipais. Belém 2008.

Secretaria de Planejamento de Mato Grosso – SEPLAN-MT. **Esquema geral de hierarquização dos solos do Estado de Mato Grosso, de acordo com sua erodibilidade. Classes de erodibilidade**. Horizonte subsuperficial. Disponível em <<http://www.dados.mt.gov.br/publicacoes/dsee/pedologia/pedologia/rt/DSEE-PD-RT-002-A001.pdf>>

Serviços Geológicos do Brasil – SGB/CPRM. **Sistema de Informações Geológicas da CPRM – Serviço Geológico do Brasil**. Acessado 30/09/2019.

SILVA, U. R. L.; RODRIGUES, J. O.; TAVARES, P. R. L. **Determinação do Coeficiente de Manning em Canal Experimental**. V Encontro Universitário da Universidade Federal do Cariri, 2013. 5p. Disponível: <<https://encontros.ufca.edu.br/index.php/encontros-universitarios/eu-2013/paper/download/2115/1203+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaio de Inderbitzen**. Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa-MG, 2010, 165 p.

THAPA, B. S. DAHLHAUG, O. G. THAPA, B. **Sediment erosion induced leakage flow from guide vane clearance gap in a low specific speed Francis turbine**, Renewable Energy (2017), 14p.

THEODORO, S. H. *et al.* **Estudos e Estratégias para a Utilização de Sedimentos Acumulados nos Reservatórios de Hidrelétricas de Forma a Resolver Conflitos socioambientais**. Projeto nº 145 - Eletronorte, Instituto Centro de Gestão de Tecnologias e Inovação – CGTI, In: CITENEL, 2009, Belém. V Citenel, 2009. V1. 13p. Disponível: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp->

content/uploads/2016/03/Estudos-e-Estrat%C3%A9gias-para-a-Utiliza%C3%A7%C3%A3o-de-Sedimentos-Acumulados-nos-Reservat%C3%B3rios-de-Hidrel%C3%A9tricas-de-Forma-a-Resolver-Conflitos-socioambientais.pdf.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977.

VASCONCELOS, C. H. NOVO, E. M. L. M. **Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí-PA**. ACTA AMAZONICA. Vol. 34(3), 2004, 487 - 493 p.

VILLIBOR, D.F *et al.* **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. 2ª Ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p.

WING, P. M. **Design and Application of a Recirculating Flume for the Assessment of Geotechnical and Geophysical Indicators of Cohesive Sediment Erodibility**. University of Wales. Bangor, 1994, 388 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide planning. **DC: USDA, Agriculture Handbook**, Washington, n. 537, 1978, 58 p. Disponível < <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>).

ANEXOS

ANEXO I

Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS

Conforme Pinto (2006) a classificação SUCS os solos são considerados de granulometria grossa quando mais de 50% em massa é retido na peneira de 0,075 mm e são representados da seguinte forma:

Solos grossos: GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM e SC

Solos finos: CL, ML, OL, CH, MH, OH e PT

As letras possuem os significados:

G: *gravel* (pedregulho)

S: *sand* (areia)

C: *clay* (argila)

M: *mõ* (silte em sueco)

O: *organic* (orgânico)

PT: *peat* (turfa)

W: *well* (bem graduada)

P: *poor* (mal graduada)

C: *clayer* (argiloso)

Para solos finos (indicando a plasticidade) tem-se as letras:

L: low (baixa plasticidade)

H: high (alta plasticidade)

Conforme SANTOS (2006) os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), são utilizados na classificação dos solos de granulometria grossa (maior 50% do material retido na peneira 0,074 mm) calculados conforme as Equação 15 e Equação 16.

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

Equação 15

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$$

Equação 16

Sendo:

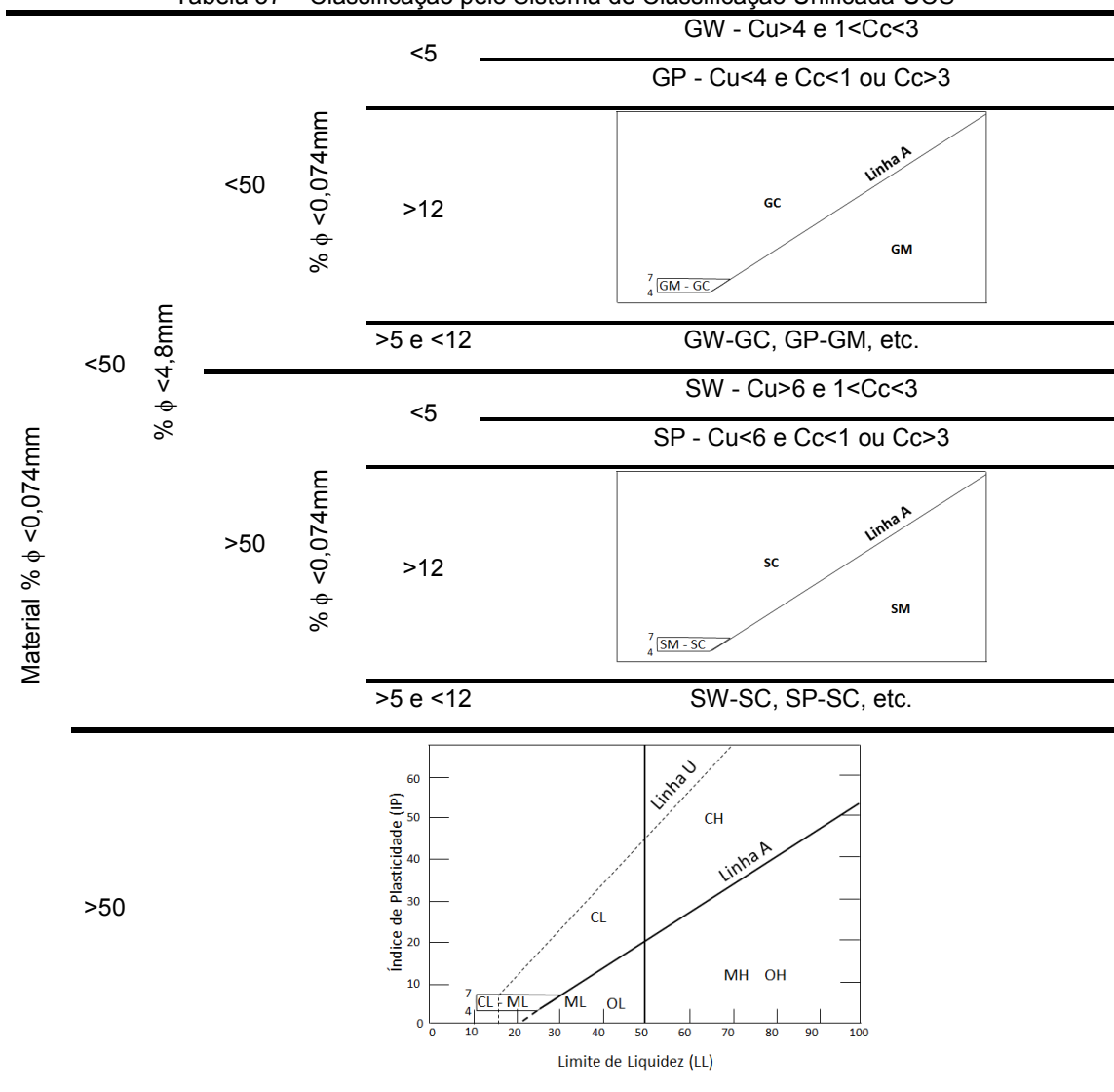
D_{60} : O maior diâmetro de 60 % das partículas do solo.

D_{30} : O maior diâmetro de 30 % das partículas do solo.

D_{10} : O maior diâmetro de 10 % das partículas do solo.

A Tabela 37 apresenta os critérios para a classificação dos solos no Sistema UCS.

Tabela 37 – Classificação pelo Sistema de Classificação Unificada-UCS



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

ANEXO II

Sistema de Classificação Miniatura Compactada Tropical - MCT

Conforme Nogami e Villibor (1995) para realização da classificação de solos nesta metodologia executa-se a determinação dos parâmetros c' e e' .

O parâmetro c' é denominado coeficiente de deformabilidade, obtido através do ensaio mini-MCV e que consiste na aplicação de energia crescentes, realizadas através do aumento do número de golpes do soquete compactador até obter-se a máxima densidade.

O parâmetro e' é calculado a partir do d' , que por sua vez é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes do ensaio mini-MCV e da perda de massa por imersão P_i , que corresponde ao percentual da massa que se desprende em relação à massa total do ensaio, no momento em que é submetido à imersão em água e encontrado pela Equação 17.

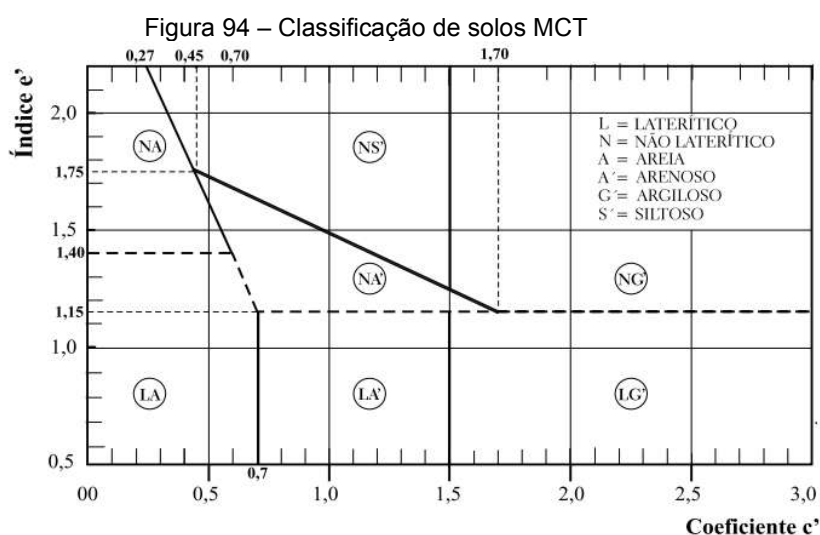
$$e' = \sqrt[3]{20/d' + P_i/100} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

P_i : é a perda da massa por imersão (%);

d' : inclinação do ramo seco da curva de compactação.

Com o valor dos parâmetros e' e c' é possível classificar o solo utilizando o ábaco abaixo demonstrado na Figura 94.



Fonte: VILLIBOR *et al.* (2009)

A metodologia MCT exige uma grande quantidade de ensaios que acaba dificultando a sua aplicação, devido a isto desenvolveu-se o Método Expedito das Pastilhas

MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS NOGAMI E VILLIBOR (1994)

O Método Expedito das pastilhas passou por várias revisões e alterações até o difundido, utilizado e atualmente apresentado proposto em Nogami e Villibor (1994).

Nesse Método Expedito das pastilhas de Nogami e Villibor (1994) foi estabelecido que a determinação do coeficiente c' seria realizada através das características de contração das pastilhas após sua secagem e a determinação do coeficiente e' , a partir da penetração de uma agulha padrão posteriormente a reabsorção de água da pastilha.

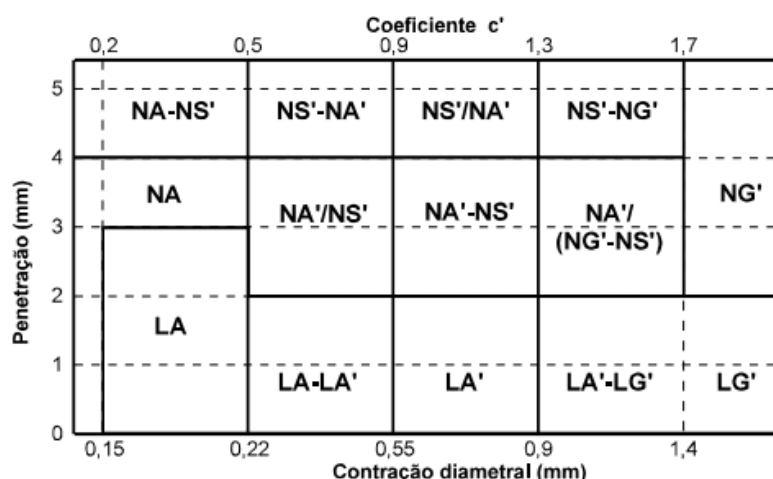
Para a determinação coeficiente c' emprega-se o valor da contração diametral (C_t) na Equação 18 caso ela estiver entre 0,1 mm e 0,5 mm, entretanto se ela for maior que 0,6 mm se utiliza a Equação 19 apresentada a seguir.

$$c' = (\log_{10} C_t + 1) / 0,904 \quad \text{Equação 18}$$

$$c' = (\log_{10} C_t + 0,7) / 0,5 \quad \text{Equação 19}$$

Com os valores de c' e e' torna-se possível a classificação através do ábaco demonstrado na Figura 95.

Figura 95 – Classificação de Solos pelo Método Expedito das Pastilhas



Fonte: NOGAMI e VILLIBOR (1994)

ANEXO III

Procedimentos de planejamento, ajuste e construção do Equipamento de Inderbitzen.

A construção do equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa foi realizada em etapas sendo elas:

1ª Construindo o projeto volumétrico no software Sketchup e a realização dos projetos e plantas de corte e cotação no software Autocad;

2ª Realizando-se o orçamento de todos os componentes utilizados para construção e adequando-se o projeto aos materiais disponíveis na cidade como no caso da chapa de acrílico inicialmente era planejada para ter espessura de 5 mm, contudo, seria possível apenas a aquisição da chapa de 4 mm na cidade;

3ª Estabelecendo-se a parceria com o Laboratório de engenharia Mecânica – LabMec e listando-se os materiais que deveriam ser adquiridos adicionalmente como lixas do aparelho de corte, eletrodos, brocas para aço, rebites, lixa tipo folha para aço, tinta spray e outros mais.

4ª De posse do material necessário para a construção, procedeu-se com a sua compra, sendo advertido ao revendedor da chapa de acrílico que disponibilizasse a que não tivesse riscos e que a transportasse com cuidado até a entrega no laboratório de mecânica;

5ª O corte da maioria dos materiais deu-se de maneira fácil, contudo, a placa de acrílico apresentou inúmeros problemas como o comportamento plástico ao entrar em contato com o disco de corte de lixa metálica, sendo substituída para o disco de corte de alvenaria;

6ª Com os elementos cortados procedeu-se com a soldagem das cantoneiras inferiores, tendo muito cuidado com o possível empenamento dos elementos devido ao endurecimento da solda;

7ª Posteriormente cortou-se uma chapa metálica de 1 mm de espessura para em conjunto com o acrílico obter a espessura de 5 mm e possibilitar o encaixe preciso do cilindro de cravação, sendo ainda que o orifício de encaixe do cilindro teve de ser realizado com o auxílio de uma pequena lixadeira amadora manual de policorte com brocas de pedra e discos de corte pequeníssimos.

8ª Realizou-se a montagem das cantoneiras inferiores, a colocação da chapa metálica de 1 mm, a chapa de acrílico e a cantoneira superior com a aplicação de

cola tipo silicone e posteriormente realizou-se a perfuração e a implementação de rebites de 1" para garantir a estabilidade do equipamento;

9ª Após o tempo de secagem foi realizado a colagem e o rebitemento das chapas internas laterais do canal de escoamento e procedeu-se com a preparação da placa de suporte;

10ª Com o equipamento pronto, procedeu-se com a construção do cavalete de suporte e em seguida com o lixamento e pintura dos elementos metálicos do equipamento construído.

De maneira breve pode-se elencar quatro principais etapas que demandaram maiores níveis de atenção conforme a Figura 96.

Figura 96 – Principais etapas da construção do equipamento de Inderbitzen.



Fonte: Autoria própria.

ANEXO IV

Avaliação da Adsorção de Azul de Metileno pelo método da Mancha

Na engenharia rodoviária e em outras, a necessidade de se avaliar a atividade superficial de solos ou outros materiais que possuam grandes quantidades de finos, levou ao desenvolvimento de ferramentas práticas que o possibilitassem obter essa informação. Existem diversas técnicas e tipos de corantes que podem ser empregados para a mesma finalidade, contudo, devido fácil reprodutibilidade e baixo nível tecnológico exigido pela técnica de Adsorção de Azul de Metileno e avaliação pelo método da mancha, estabeleceram-se instruções normativas de utilização como a Francesa¹⁷ “**NF P 94-068**”, Norte Americana¹⁸ “**ASTM C837-09**” e a Brasileira¹⁹ “**NBR 14949/2017**” entre outras.

O sistema de ensaio desta técnica é simples conforme apresentado na Figura 97 e consiste em:

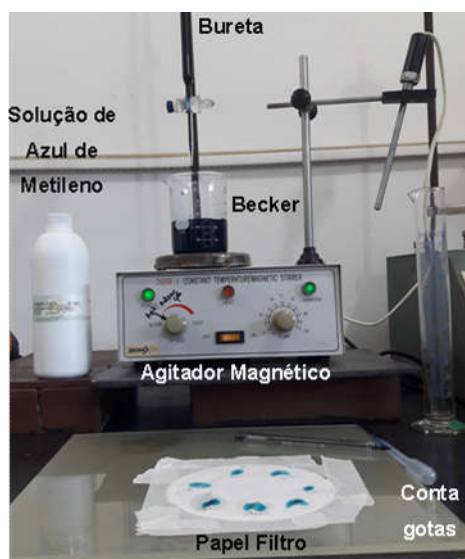
- Uma bureta graduada com escala de 1 ml
- Um Becker de 250 ml, 500 ml ou 1000 ml,
- Um agitador magnético com controle de rotação;
- Um bague de vidro ou conta gotas,
- Uma folha do papel filtro de secagem média, com diâmetro entre 120 e 150 mm, para micro-cristais, com teor de cinzas inferior a 0,01%, do tipo Reagen R-42, Whatman 42 ou similar;
- Uma solução padrão de Azul de Metileno diluído em água destilada, na concentração de 1 g/l para solos tropicais de baixa atividade ou 10g/l para solos temperados de alta atividade.

¹⁷ Instrução normativa Francesa **NF P 94-068** “Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux”

¹⁸ Instrução normativa Norte Americana **ASTM C837-09** “Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay”

¹⁹ Instrução Normativa Brasileira ABNT **NBR 14949**: 2017 “Micro revestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno”

Figura 97 – Sistema do ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo método da Mancha.



Fonte: A autoria própria.

A ABNT **NBR 14949**: 2017 “Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da adsorção de azul de metileno”, descreve a metodologia para a realização do ensaio de adsorção de Azul de metileno por titulação, avaliando-o de modo colorimétrico com o método da macha.

O procedimento de ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha descrito pela NBR 14949 é semelhante ao apresentado por Fabbri (1994), que o estudou e o aplicou em cerca 297 amostras de solos tropicais brasileiros e consiste em:

- a) separar 1,0 grama de solo passante na peneira de 0,074 mm e colocá-la em um becker de 250 ml;
- b) Inserir 100 ml de água destilada no Becker;
- c) colocar o Becker que contém o solo + água no agitador magnético e liga-lo;
- d) Inserir ao Becker, empregando uma bureta graduada 1,0 ml da solução padrão de azul de metileno e acionar o cronômetro.
- e) Aguardar o período de 1 minuto;
- f) Sem interromper a agitação da solução, introduzir a baguete de vidro na suspensão e capturar uma gota da suspensão e pingá-la em uma folha de papel

filtro, que não deve estar em contato com nenhuma superfície durante o ensaio, mas posteriormente pode ficar sobre uma superfície plana para registro fotográfico.

g) Observar a difusão da gota no papel filtro. Deverá aparecer uma mancha circular, composta de um núcleo escuro que contém as partículas sólidas da suspensão (solo), circundada por uma borda de cor mais clara, correspondendo à fase líquida da suspensão filtrada pelo papel de filtro

- Se se houver, após a difusão da água, o aparecimento de uma aura azulada ou esverdeada em torno da borda que circunda o núcleo escuro da mancha esperar por mais 3 minutos e repetir os itens f) e g). Se a aura persistir, após passados os 3 minutos, significa que há excesso de corante na solução e o ponto de viragem foi atingido.
- Caso não houver o aparecimento da aura, ou esta desaparecer após os 3 minutos de espera, repetir a operação a partir do item d), até que o teste da mancha persista por 3 minutos ou mais, conforme observado acima;

h) Registra-se o volume de solução padrão de azul de metileno (V) correspondente ao ponto de viragem do teste de mancha.

A sistemática de ensaio de adsorção do corante Azul de Metileno pelo método da Mancha das normas Francesa e Norte Americana são basicamente as mesmas detalhadas anteriormente, divergindo em alguns pontos como:

- NA instrução normativa Francesa **NF P 94-068** sugere-se a utilização de uma concentração de Azul de Metileno de 10 gramas por litro de água destilada e estabelece que o diâmetro máximo do material ensaio seja de 5mm;
- Já na instrução normativa **ASTM C837-09** indica-se a realização do ensaio em um Becker com 200 ml de água destilada, utilizando adições de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar para a correção do pH inicial da água, deixando-a em uma condição acida de pH 3,8 à 2,5 e posteriormente sugerindo a realização do ensaio com 2 gramas de solo passante na peneira de 0,074mm.

Para a apresentação dos resultados tanto a **NBR 14949**, como a **NF P 94-068** e a **ASTM C837-09** expõem que sejam apresentados em ml da solução consumida

pela quantidade em grama da fração fina do material analisado e conforme Chen *et al.* (1974) *apud.* Pejon (1992) pode ser apresentada pela Equação 20.

$$V_B = \frac{V \times C \times 100}{M} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

VB: Volume de Azul consumido para 100 g de solo, que é a Capacidade de Troca Catiônica – CTC, sendo dado em meq/100g;

V: Volume da Solução de Azul de Metileno de Azul de Metileno gasta (ml);

C: Concentração de Azul de metileno empregada (1g/1000ml);

M: Massa do solo seco utilizada (g).

Para determinação da Superfície Específica – SE, faz-se necessário a determinação da superfície recoberta por 1 ml de azul de metileno na concentração utilizada e conforme Beaulieu *et al.* (1979) *apud.* Pejon (1992) é apresentada pela Equação 21.

$$S = \frac{A \times N \times m}{M_{am} \times 1000} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

S: Superfície Adsorvida pelo Azul de metileno (m²/ml);

A: Área da face da molécula de azul de metileno (130 Å²);

N: Número de Avogadro;

m: massa de Azul de Metileno seca utilizada na preparação da solução (g);

M_{am}: Massa Molecular do Azul de metileno na forma anidra (319,9);

Resultando na seguinte expressão:

$$S = \frac{130 \times 10^{-20} \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,0}{319,9 \times 1000} = 2,44 \text{ m}^2/\text{ml}$$

Dessa maneira possibilitando a determinação da SE conforme a Equação 22:

$$SE = \frac{2,44 \times V}{M} \quad \text{Equação 22}$$

SE: Superfície Específica (m²/g);

V: Volume da solução de azul (ml)

M: massa do solo seco utilizada (g)

Outra maneira de se realizar a demonstração dos resultados do ensaio de Adsorção de Azul de metileno é conforme apresentado por Fabbri (1994) em termos de VA com conforme a Equação 23

$$VA = V \times \frac{P200}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

VA:

volume de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral;

V: volume da solução de azul de metileno adicionado à suspensão durante o ensaio (ml);

P200: porcentagem de solo passante na # 0,074 mm (%);

W: teor de umidade da amostra de solo (%).

O Coeficiente de Atividade (CA) é determinado pela relação entre a quantidade de azul de metileno consumido, em peso (gramas), por um grama de amostra de solo integral (VA) e a porcentagem PF que o solo contém de material diâmetro de partícula inferior a 0,005 mm (FABBRI, 1994) e mostrado na Equação 8.

$$Ca = 100 \frac{Va}{PF} \quad \text{Equação 24}$$

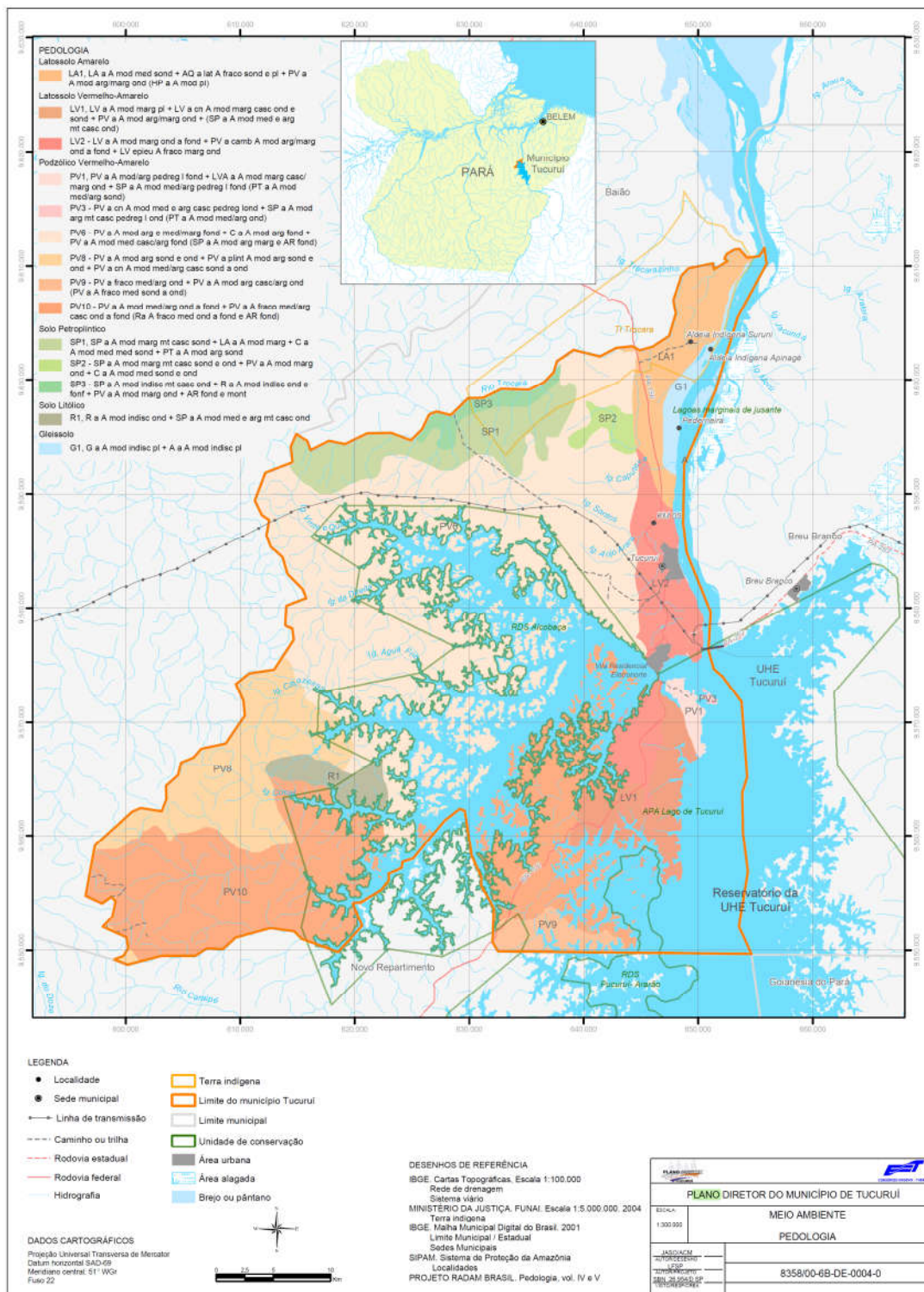
Sendo:

VA: Volume de azul de metileno consumido por 1 grama de solo (ml)

PF: Porcentagem de solo que contém granulometria < 0,005 mm.

ANEXO V

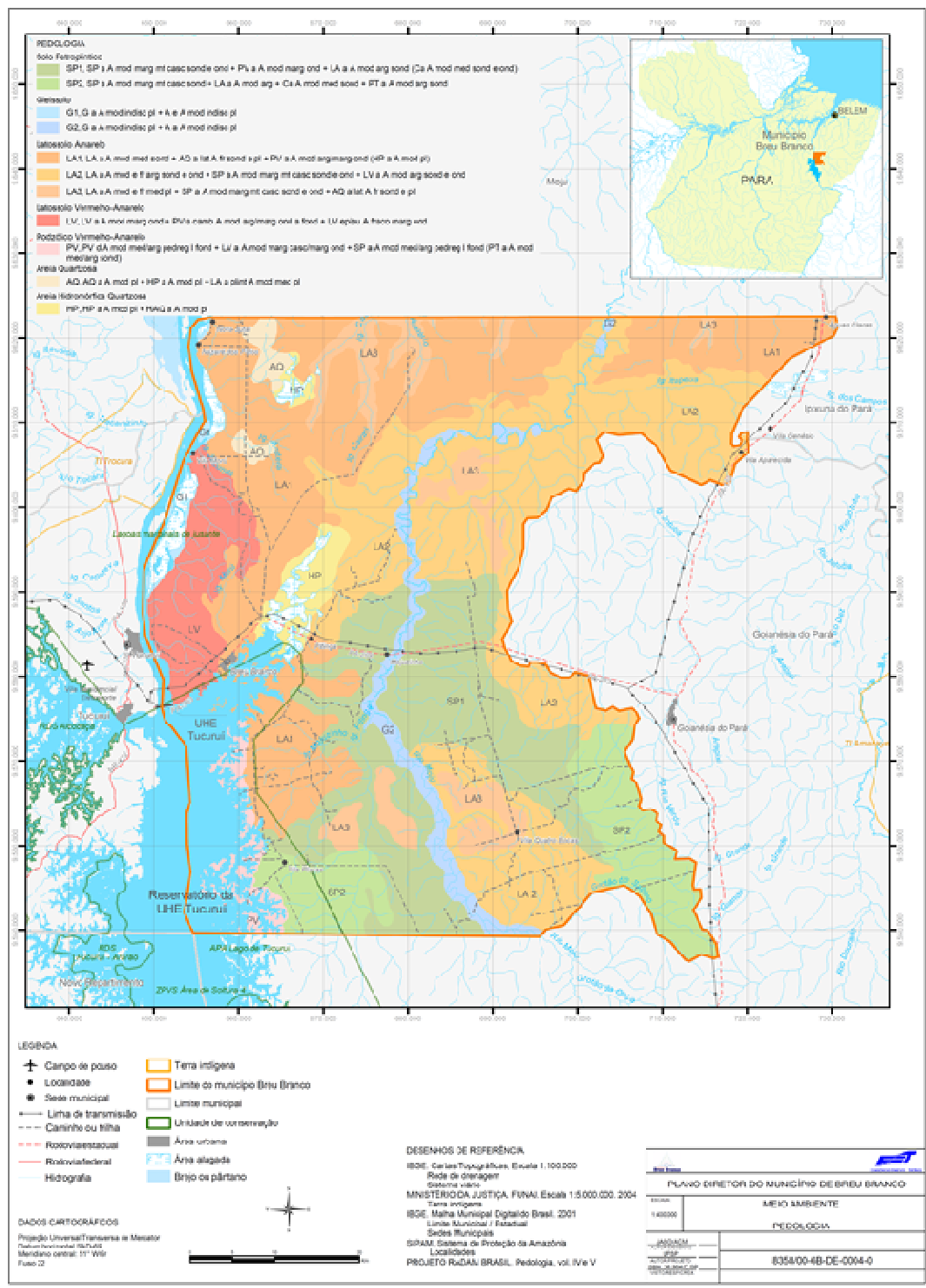
Mapa Pedológico do Município de Tucuruí - PA



Fonte: SEDOP – PA (2019)

ANEXO VI

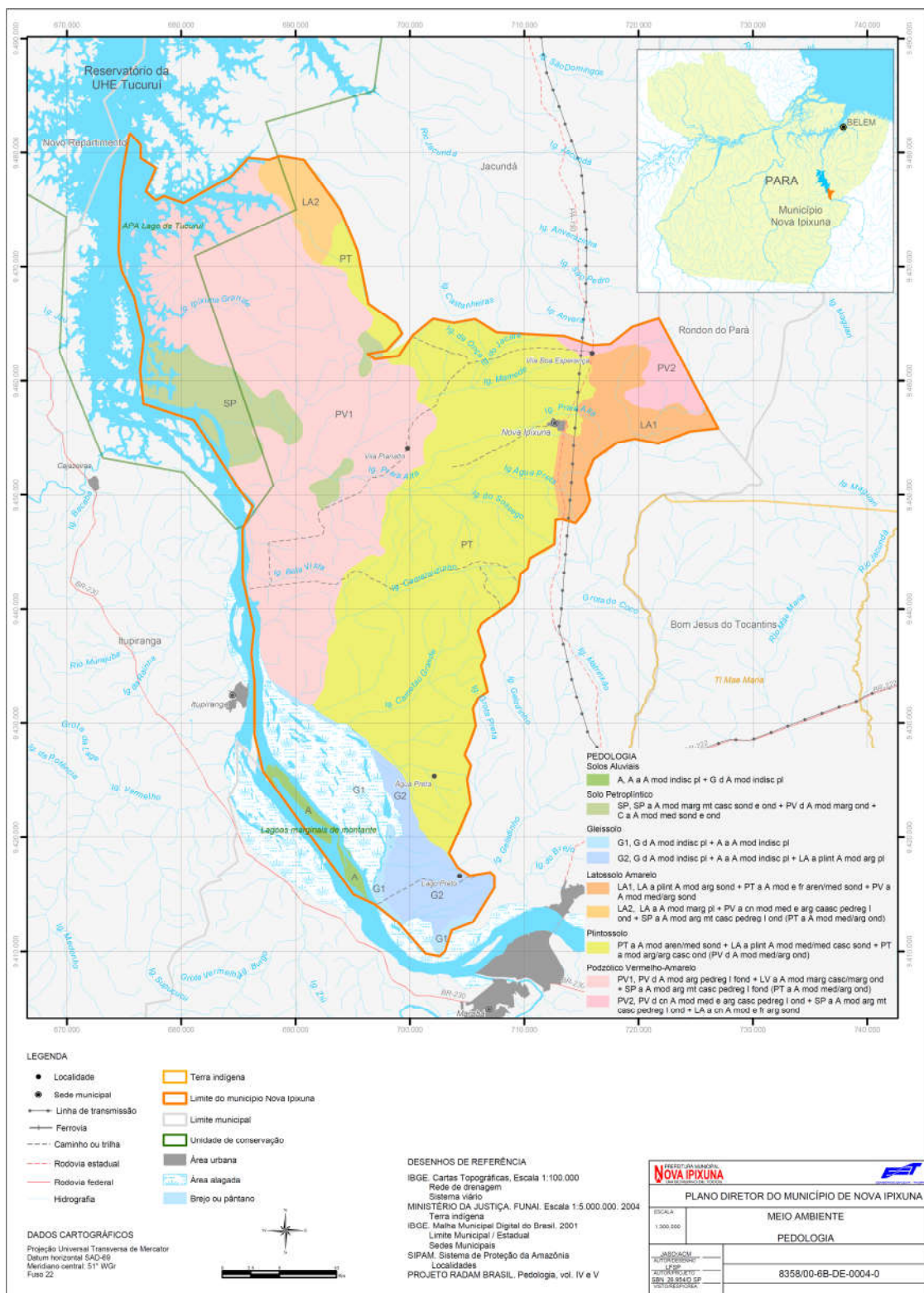
Mapa Pedológico do Município de Breu Branco - PA



Fonte: SEDOP – PA (2019)

ANEXO VII

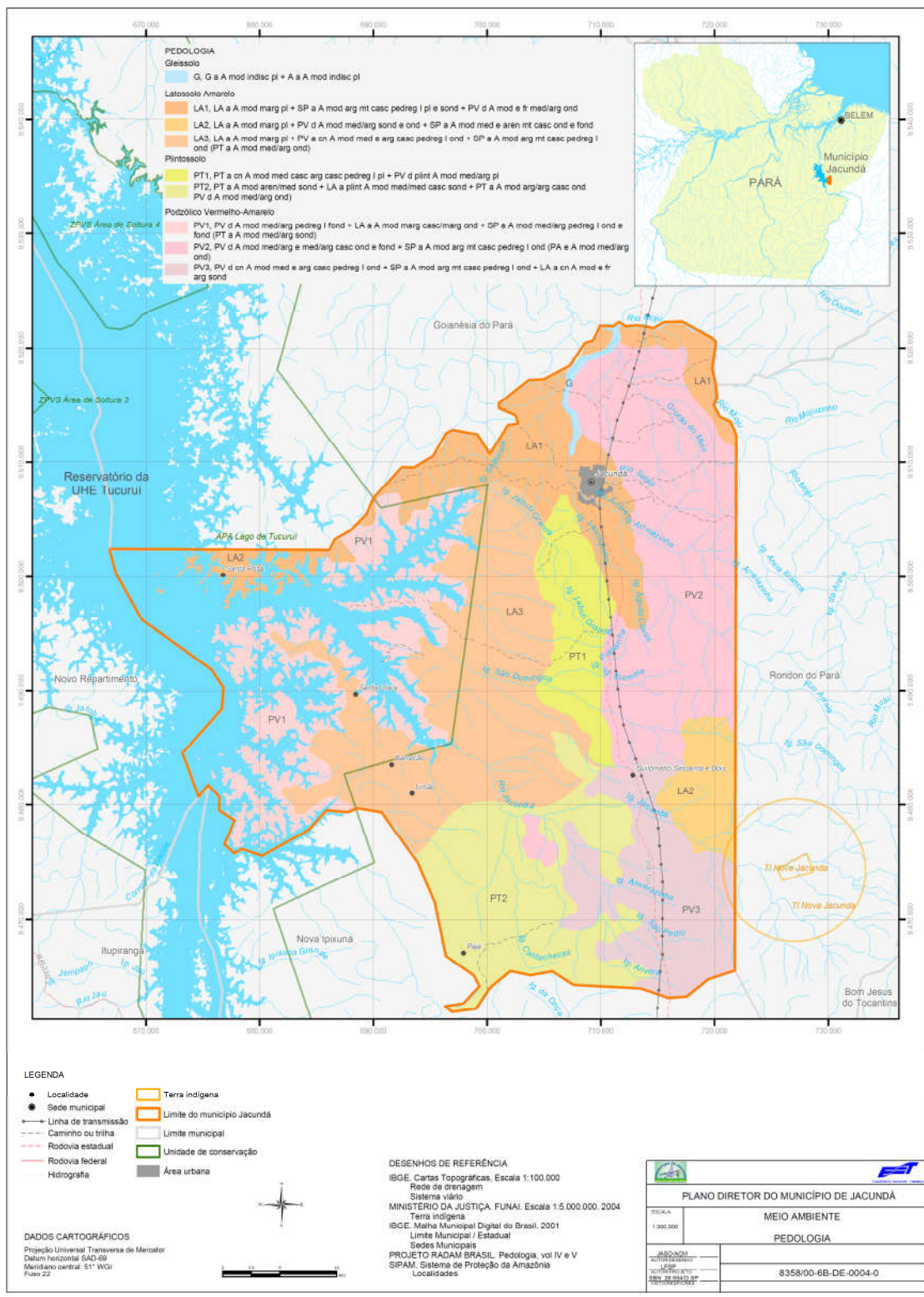
Mapa Pedológico do Município de Nova Ipixuna - PA



Fonte: SEDOP – PA (2019)

ANEXO VIII

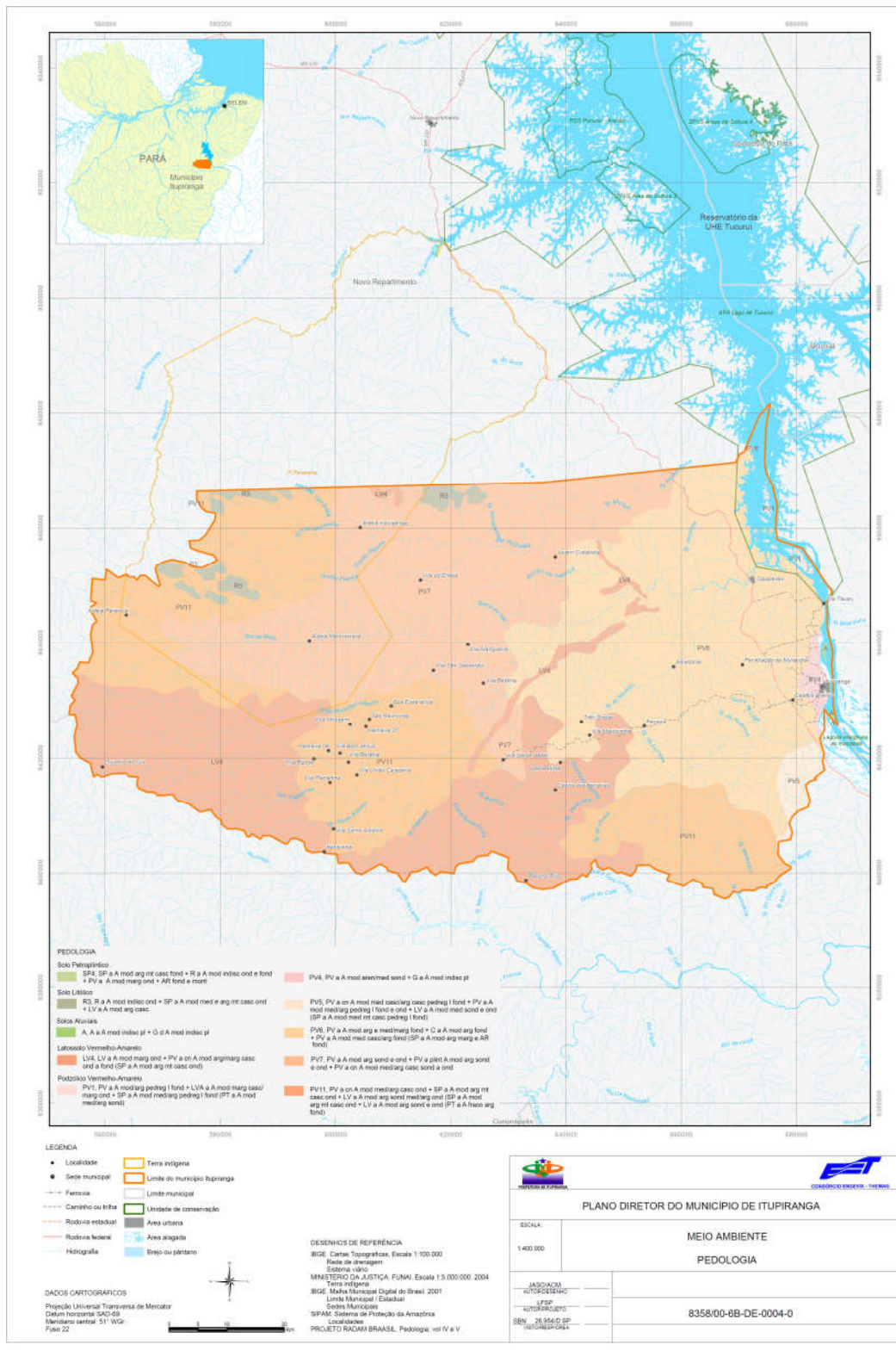
Mapa Pedológico do Município de Jacundá - PA



Fonte: SEDOP – PA (2019)

ANEXO IX

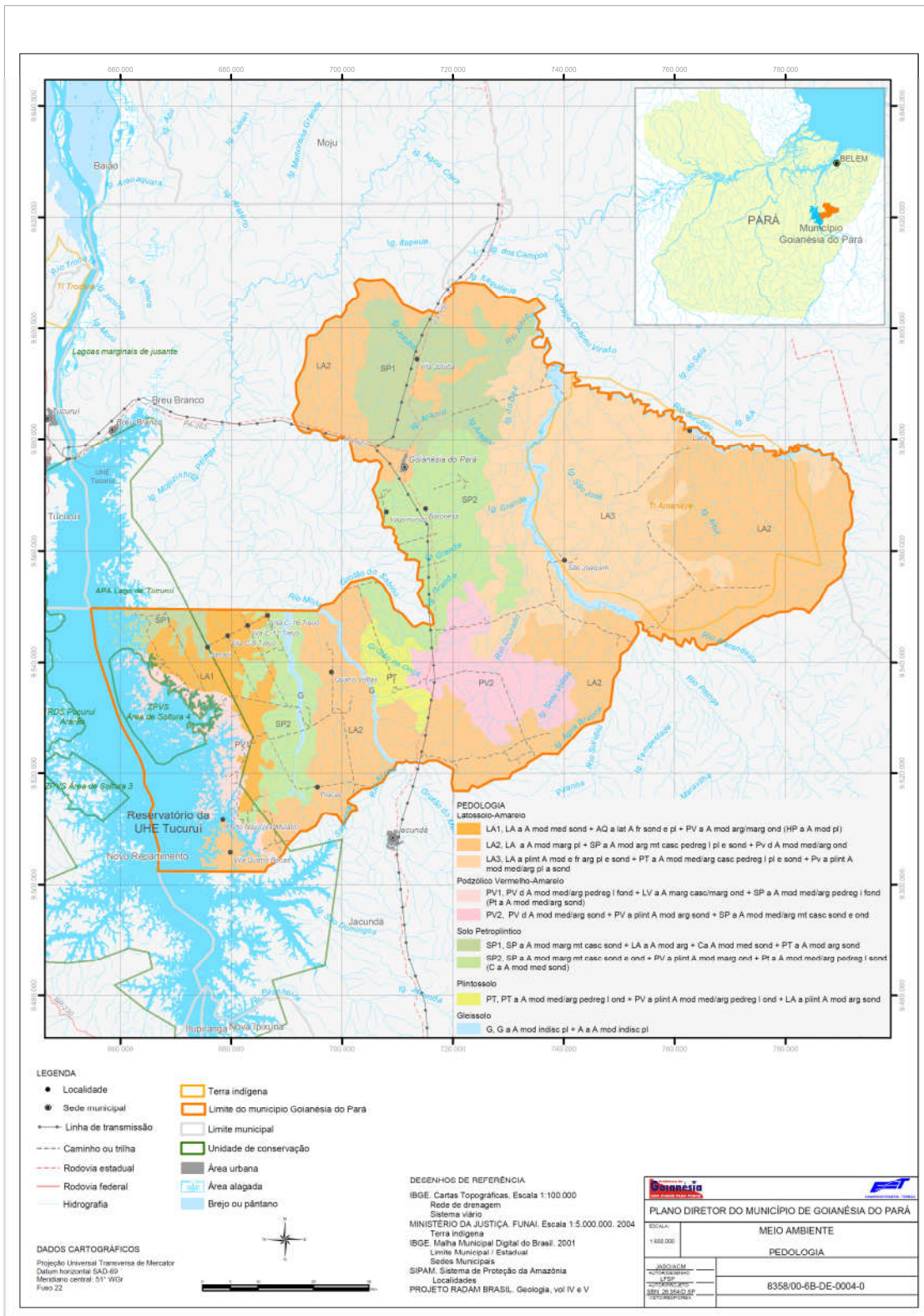
Mapa Pedológico do Município de Itupiranga - PA



Fonte: SEDOP – PA (2019)

ANEXO X

Mapa Pedológico do Município de Goianésia - PA



APÊNDICES

APÊNDICE I

Procedimentos para a adequação da distribuição da água na secção no equipamento de Inderbitzen.

Posteriormente a instalação da calha de escoamento do equipamento de Inderbitzen procedeu-se com a instalação do seu sistema de alimentação hidráulico, dessa maneira verificou-se a aplicabilidade de duas técnicas distintas, sendo a primeira com a utilização de uma caixa estabilizadora, que receberia a água e de maneira estável e uniforme à conduziria por meio de uma rampa intermediária até a calha de escoamento, e a segunda com o emprego de um barrilete perfurado por 15 furos de 3 mm, espaçados uniformemente na secção da calha como mostram as Figura 100a e Figura 100b. Ambas às técnicas de distribuição da água mostraram-se eficazes, contudo, a superfície de escoamento da calha hidráulica não permitia uma distribuição regular, demonstrando um comportamento Hidrofóbico, porém em vazões superiores à 5 l/min tornavam-se distribuídos.

Verificando que a calha de escoamento não tinha capacidade de operação em vazões mais baixas, consultou-se outros laboratórios de pesquisa que empregam o mesmo equipamento, obtendo-se recomendações de modificação da largura do canal de escoamento ou a substituição do material utilizado. Como nenhuma destas sugestões se demonstravam-se eficientes, optou-se pela avaliação metódica e minuciosa do fenômeno.

Constatando-se que o escoamento era de alta velocidade e assintótico sobre o acrílico, decidiu-se testar o aumento da rugosidade como ferramenta da redução de sua velocidade, buscando-se a sua distribuição, sendo portanto aplicado sobre a sua superfície acrílica uma de fita adesiva da marca Adere de uso comum em obras de pinturas, obtendo-se um resultado satisfatório como apresentado na Figura 100c. Entretanto, a aderência da fita era fraca, optando-se posteriormente por executar um adesivamento completo na calha de escoamento, com uma modelo de adesivo veicular com alta rugosidade e constatando-se que também ser inadequado como apresentado na Figura 100d.

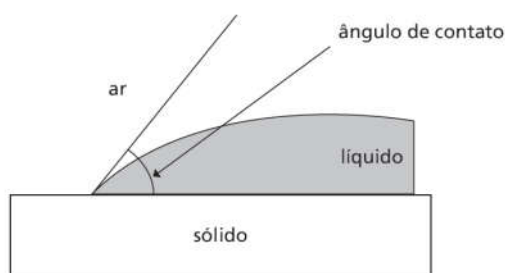
Realizou-se a substituição do modelo de adesivo veicular por dois novos adesivos, também veiculares, um com baixa rugosidade e outro com intermediária, verificando-se novamente que o fluxo não se distribuía. Antes da substituição de

cada adesivo veicular foram testadas tintas comerciais, como esmaltes sintéticos e emulsões acrílicas, verificando que nessa última o fluxo se distribuía na superfície.

Paralelo a todas as experimentações foi conduzido um estudo bibliográfico, constatando-se que a característica hidrofóbica “fobia de água” ou hidrofílica “Familiaridade com água”, de materiais e tintas utilizadas em quadras poliesportivas transformavam as superfícies em hidrofílicas, permitindo que a água se distribua sobre a superfície da maior área possível e que a sua secagem fosse mais rápida.

A característica que influencia a hidroficidade dos elementos é a sua propriedade Tenso Ativa que permite a redução do ângulo da superfície de contato com a parte exterior da gota como ilustrado Figura 98 e permita que em superfícies tenso ativas ela não fique aglomerada, ocorrendo a sua maior distribuição.

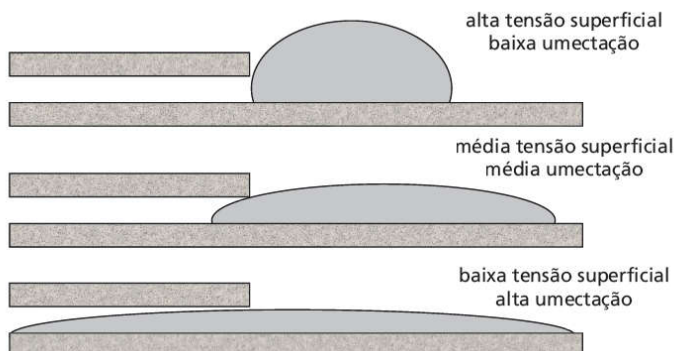
Figura 98 – Ângulo de contato entre uma gota de líquido e uma superfície sólida.



Fonte: Daltin (2011).

Um exemplo da importância dessa característica é encontrada em indústrias têxteis, cuja necessidade de altas taxas de umectação nas fibras de seus produtos, possuem a necessidade da redução da tensão intermolecular como ilustrado na Figura 99 e faz com que ela constantemente busque novas soluções.

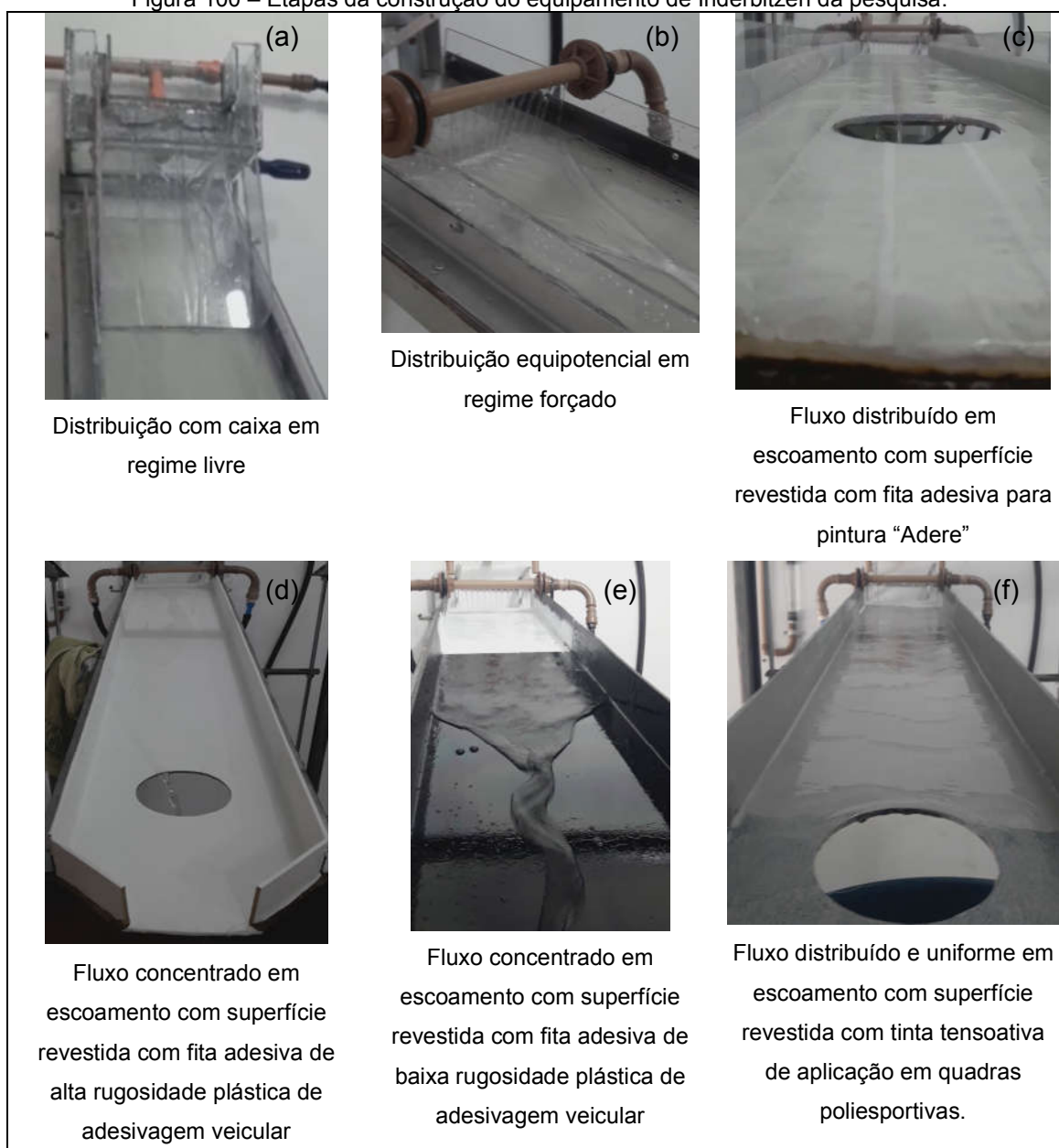
Figura 99 – A redução da tensão superficial facilita a entrada do líquido nas frestas formadas entre as fibras do tecido, o que proporciona a umectação do material por capilaridade.



Fonte: Daltin (2011).

Compreendendo o fenômeno procedeu-se com a aquisição da tinta Acrílica de uso em quadras esportivas da Marca Vertex de 3,6 L, aplicando-se a mesma em alguns últimos testes na superfície adesivada e após a confirmação da resolução do problema, prosseguiu-se com a aplicação direta no acrílico após uma leve raspagem para a garantia de uma aderência mínima da tinta na superfície, sendo consumido apenas 0,6 litros na pintura da caixa de estabilização e da calha hidráulica como mostram as Figura 100 e Figura 101

Figura 100 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 101 – Etapas da construção do equipamento de Inderbitzen da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

Com a calha de escoamento do Inderbitzen pintada e instalada, realizou-se a avaliação da técnica de distribuição da água em sua superfície de escoamento, e após avaliar minuciosamente constatou-se que a técnica do barrilete perfurado conseguia atingir valores extremamente baixos de escoamento com a distribuição satisfatória da água na ordem de 0,2 l/min., contudo, em vazões mais elevadas ele começava a interferir no escoamento, promovendo perturbações como em vazões superiores a 6,5 l/min.

A técnica da caixa estabilizadora possuía dificuldade em distribuir o fluxo em vazões inferiores a 0,5 l/min. contudo, para vazões superiores a 6,5 l/min. ela

demonstrou-se eficiente e foi adotada neste estudo por esta última característica que em casos de trabalhos futuros com fluxo em regime não laminar, poderia ser empregada sem problemas.

APÊNDICE II

Determinação das velocidades de escoamento do equipamento de Inderbitzen.

A velocidade de escoamento foi realizada com a aplicação de corantes de fácil verificação visual no fluido, de modo que não altera-se a sua densidade, viscosidade e nem promove-se perturbações ao seu escoamento e com a utilização de câmera de boa qualidade de resolução e capacidade de registo de quadros de imagem por segundo, sendo posteriormente avaliado em softwares de edição de filmagens, a quantidade de quadros que foram necessários ou segundos que o fluido necessitou para percorrer a distância 40 cm, segmentados em 4 trechos para a maior facilidade do monitoramento do deslocamento como apresentado Figura 102.

Figura 102 – Equipamento de Inderbitzen com os segmentos de análise da velocidade.



Fonte: Autoria própria.

O Materiais utilizados foram estes:

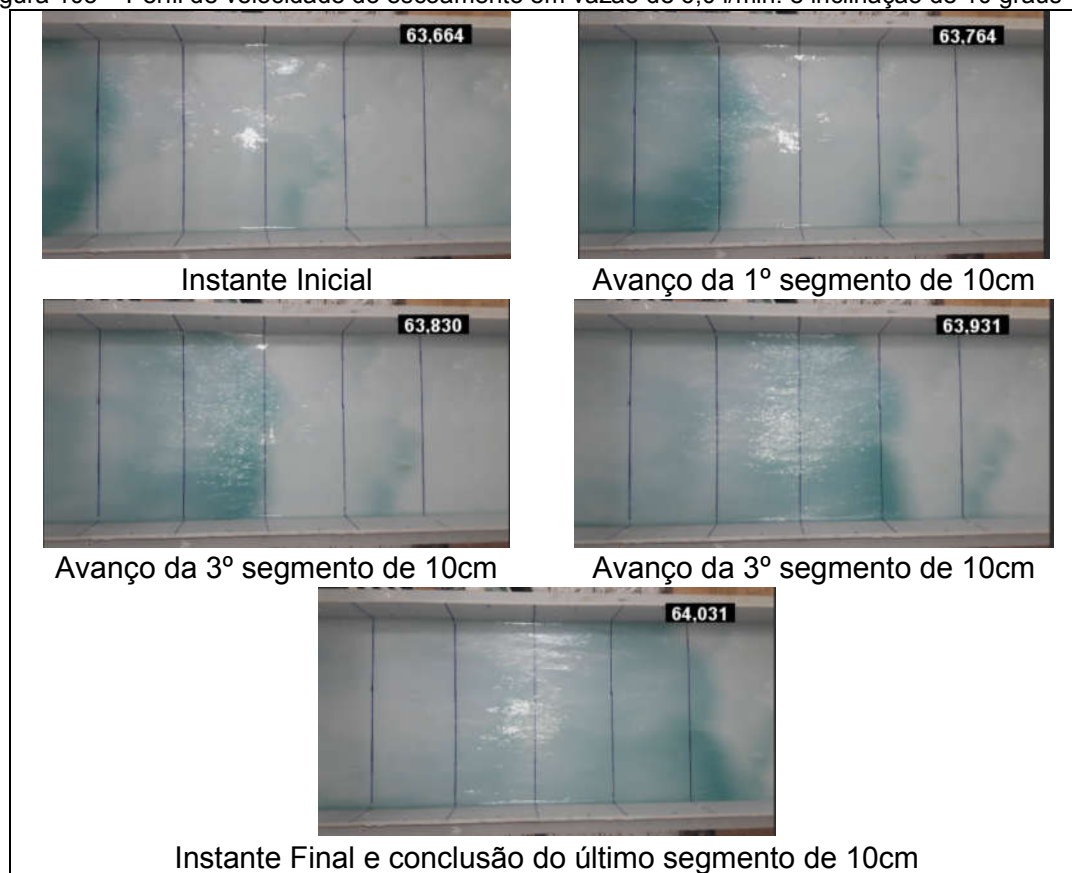
- Corante: Azul ou Alaranjado de metila e combinações na concentração de 1g do corante diluída em 5 litros de água
- Haste de suporte flexível com garra de fixação de aparelhos celulares.
- Esquadros, réguas e pincel permanente de ponta fina da marca Fábrica Castel.
- Câmera fotográfica e filmadora: Aparelho Samsung J7 Neo de 13,0 Mega pixels de resolução e capacidade de registro de 33 quadros por segundo;
- Softwares de edição de filmagens: Vegas Studio com capacidade de análise de milésimos de segundo;

A execução das aferições de velocidades utilizaram as seguintes etapas:

- Ajuste da inclinação da calha de escoamento;
- Realização do seu pré umedecimento com água;
- Substituição da água da caixa estabilizadora pela que possuía o corante diluído até o nível inferior ao de 1 cm da cota de escoamento da caixa;
- Posicionamento e acionamento da filmadora;
- Liberação da vazão a ser analisada e a gravação de 2 minutos de escoamento;
- Avaliação das filmagens e determinação do velocidade escoamento.

O perfil de velocidade registrado para a condição de vazão de 6,0 l/min. e inclinação de 10 graus foi este apresentado na Figura 103,

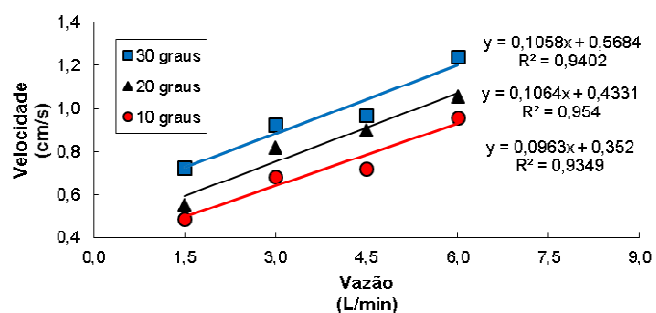
Figura 103 – Perfil de velocidade do escoamento em vazão de 6,0 l/min. e inclinação de 10 graus



Fonte: Autoria própria.

Todos os perfis de velocidade podem ser identificados na Figura 104 e analisados nas Tabela 38, Tabela 39 e Tabela 40

Figura 104 – Perfil de velocidades médias para cada inclinação.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 38 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min e 10° de inclinação

Vazão (L/min)	Inclinação (Graus)	Leitura Inicial	Leitura Final	Tempo percorrido (segundos)	Média (seg.)	Espaço percorrido (m)	Velocidade (m/s)
1,5	10	111,078	111,979	0,901	0,818	0,40	0,489
	10	125,459	126,293	0,834			
	10	115,349	116,116	0,767			
	10	115,747	116,516	0,769			
	10	151,051	151,918	0,867			
	10	181,114	181,882	0,768			
3,0	10	99,266	99,866	0,600	0,584	0,40	0,685
	10	109,977	110,611	0,634			
	10	97,631	98,165	0,534			
	10	106,306	106,873	0,567			
	10	105,906	106,540	0,634			
	10	105,772	106,306	0,534			
4,5	10	179,880	180,447	0,567	0,556	0,40	0,719
	10	184,584	185,152	0,568			
	10	181,114	181,648	0,534			
	10	181,915	182,482	0,567			
	10	183,250	183,817	0,567			
	10	183,717	184,251	0,534			
6,0	10	239,940	240,407	0,467	0,417	0,40	0,960
	10	240,407	240,774	0,367			
	10	240,708	241,074	0,366			
	10	291,491	291,958	0,467			
	10	306,606	306,940	0,334			
	10	306,940	307,440	0,500			

Nota: Técnica do corante na qual é aplicado um corante no fluido e avaliado o seu escoamento. Para a filmagem do escoamento utilizou-se uma câmera com capacidade de 33 quadros (fotos) por segundo e o software de edição de filmagens Vegas para o estudo do vídeo com velocidade em milésimos de segundo.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 39 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min. e 20° de inclinação

Vazão (L/min)	Inclinação (Graus)	Leitura Inicial	Leitura Final	Tempo percorrido (segundos)	Média (seg.)	Espaço percorrido (m)	Velocidade (m/s)
1,5	20	91,358	92,092	0,734	0,723	0,40	0,553
	20	93,527	94,261	0,734			
	20	94,361	95,062	0,701			
	20	96,263	96,997	0,734			
	20	97,064	97,798	0,734			
	20	97,664	98,365	0,701			
3	20	34,368	34,835	0,467	0,489	0,40	0,817
	20	41,575	42,075	0,500			
	20	42,442	42,943	0,501			
	20	43,210	43,710	0,500			
	20	40,340	40,841	0,501			
	20	42,075	42,542	0,467			
4,5	20	34,701	35,168	0,467	0,445	0,40	0,900
	20	36,470	36,937	0,467			
	20	38,605	39,006	0,401			
	20	46,380	46,847	0,467			
	20	46,747	47,180	0,433			
	20	48,649	49,082	0,433			
6	20	62,763	63,130	0,367	0,378	0,40	1,058
	20	64,364	64,731	0,367			
	20	64,498	64,898	0,400			
	20	41,174	41,541	0,367			
	20	48,515	48,916	0,401			
	20	50,551	50,918	0,367			

Nota: Técnica do corante na qual é aplicado um corante no fluido e avaliado o seu escoamento. Para a filmagem do escoamento utilizou-se uma câmera com capacidade de 33 quadros (fotos) por segundo e o software de edição de filmagens Vegas para o estudo do vídeo com velocidade em milésimos de segundo.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 40 – Determinação da velocidade de escoamento do Inderbitzen com vazão de 1,5 3,0 4,5 e 6,0 l/min. e 30° de inclinação

Vazão (L/min)	Inclinação (Graus)	Leitura Inicial	Leitura Final	Tempo percorrido (segundos)	Média (seg.)	Espaço percorrido (m)	Velocidade (m/s)
1,5	30	47,681	48,282	0,601	0,551	0,40	0,726
	30	48,181	48,715	0,534			
	30	48,882	49,383	0,501			
	30	51,551	52,119	0,568			
	30	52,953	53,487	0,534			
	30	53,153	53,720	0,567			
3,0	30	45,512	45,976	0,464	0,433	0,40	0,923
	30	46,647	47,080	0,433			
	30	47,814	48,248	0,434			
	30	48,515	48,916	0,401			
	30	49,850	50,250	0,400			
	30	50,217	50,684	0,467			
4,5	30	35,869	36,270	0,401	0,412	0,40	0,972
	30	36,803	37,204	0,401			
	30	39,339	39,740	0,401			
	30	35,469	35,869	0,400			
	30	36,103	36,503	0,400			
	30	38,038	38,505	0,467			
6,0	30	35,302	35,636	0,334	0,323	0,40	1,239
	30	33,734	34,067	0,333			
	30	34,834	35,168	0,334			
	30	35,235	35,569	0,334			
	30	97,030	97,331	0,301			
	30	106,506	106,807	0,301			

Nota: Técnica do corante na qual é aplicado um corante no fluido e avaliado o seu escoamento. Para a filmagem do escoamento utilizou-se uma câmera com capacidade de 33 quadros (fotos) por segundo e o software de edição de filmagens Vegas para o estudo do vídeo com velocidade em milésimos de segundo.

Fonte: Autoria própria.

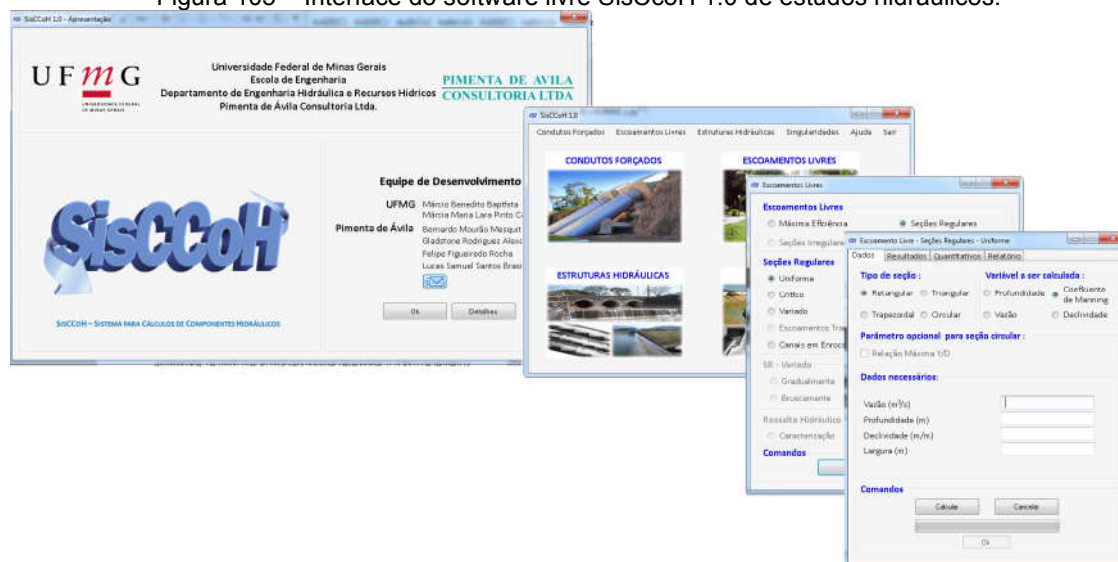
APÊNDICE III

Determinação e avaliação das alturas das lâminas de escoamento teóricas e reais.

Com os dados da velocidade de escoamento encontrada conforme o Apêndice II empregou-se Equação 14 de Chezy para se determinar o seu coeficiente de Manning de escoamento teórico para cada condição real de vazão e inclinação com o auxílio do softwares livre de estudos hidráulicos SisCcoH 1.0.

Este software foi desenvolvido inicialmente em linguagem FORTRAN em 1992 denominado HIDRO pelo professor Dr. Márcio Resende e P. Lima e após sucessivos aperfeiçoamentos e ampliações passou a ser denominado HIDROwin, sendo em 2014 apresentado em sua última versão como SisCcoH1.0 pelo Dr. Bernardo Mourão Mesquita possuindo a interface mostrada na Figura 105.

Figura 105 – Interface do software livre SisCcoH 1.0 de estudos hidráulicos.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente determinou-se os valores das suas correspondente de velocidade teórica de escoamento para o respectivo coeficiente de Manning como apresentado na Tabela 41.

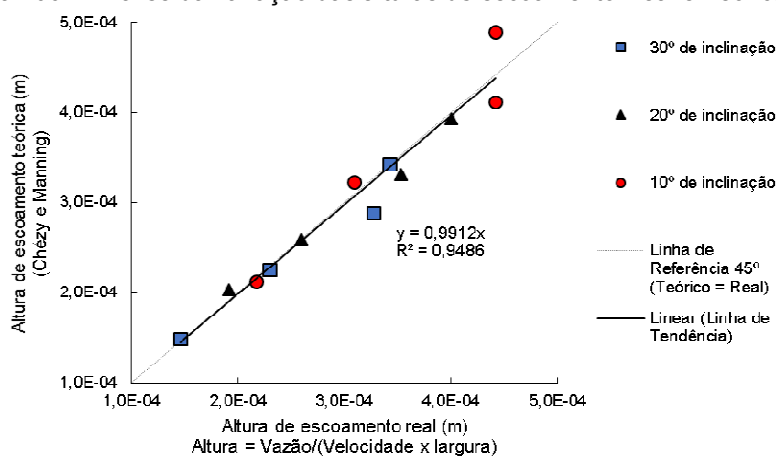
Tabela 41 – Determinações teóricas e reais da altura da lâmina de escoamento.

Determinações Teóricas de velocidade com coeficiente de Manning fixo e suas correspondentes de alturas de escoamentos teóricas com as formulações de Chezy e Manning.												
Inclinação θ	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30
Vazão (l/min)	1,5	3	4,5	6	1,5	3	4,5	6	1,5	3	4,5	6
Largura (cm)	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6
Coefficiente de Manning	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Froude	10,91	11,68	12,16	12,51	11,66	16,19	16,86	17,34	18,60	19,93	20,75	21,35
Reynolds	105,7	211,3	316,5	421,8	105,8	211,5	316,8	422,2	105,8	211,4	317,0	422,4
Velocidade (m/s)	0,498	0,657	0,772	0,866	0,521	0,817	0,96	1,077	0,711	0,938	1,103	1,237
Altura da lâmina (m)	0,00021	0,00032	0,00041	0,00049	0,0002	0,00026	0,00033	0,00039	0,00015	0,00023	0,00029	0,00034
Tensão Hidráulica (Pa)	0,375	0,569	0,725	0,862	0,740	0,944	1,204	1,432	0,860	1,304	1,663	1,977
Determinações Reais de velocidade e suas correspondentes de alturas de escoamentos com as formulações de Chezy e Manning.												
Coefficiente de Manning	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003
Velocidade (m/s)	0,489	0,685	0,719	0,960	0,553	0,817	0,900	1,058	0,726	0,923	0,972	1,239
Altura da lâmina (m)	0,00022	0,00031	0,00044	0,00044	0,00019	0,00026	0,00035	0,00040	0,00015	0,00023	0,00033	0,00034
Tensão Hidráulica (Pa)	0,037	0,053	0,076	0,076	0,068	0,093	0,126	0,143	0,083	0,130	0,185	0,194

Fonte: Autoria própria.

Com a velocidade real e a velocidade teórica realizou-se a determinação da altura do filete de escoamento em cada condição conforme a Figura 106.

Figura 106 – Análise da variação das alturas de escoamento Real e Teórica.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE IV

Determinação dos índices físicos.

Os valores da Massa Específica Natural Seca e os seus respectivos índices de vazios são apresentados nas Tabela 42, Tabela 43 e Tabela 44.

Tabela 42 – Massa Específica e índice de vazios determinadas para o Argissolo.

Amostrador	Massa Úmido do solo com cilindro (g)	Massa Úmida do Solo (g)	Massa Específica Úmida Natural (g/cm ³)	Massa Específica Seco (g/cm ³)	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Índice de Vazios (e)
I5	2735,8	1593,8	1,56	1,19	2,75	1,31
I7	2643,0	1544,4	1,51	1,15	2,75	1,39
I9	2900,5	1749,8	1,69	1,29	2,75	1,13
I10	2738,2	1632,3	1,61	1,23	2,75	1,24
I11	2763,3	1651,1	1,62	1,23	2,75	1,23
I12	2775,4	1625,6	1,60	1,22	2,75	1,26
I13	2727,1	1574,2	1,55	1,18	2,75	1,33
I14	2812,0	1684,2	1,65	1,26	2,75	1,18
I15	2767,3	1701,7	1,67	1,27	2,75	1,16
I16	2786,9	1639,2	1,61	1,23	2,75	1,24
I17	2729,9	1619,8	1,59	1,21	2,75	1,26
I33	2684,7	1563,8	1,53	1,21	2,75	1,27

Tabela 43 – Massa Específica e índice de vazios determinadas para o Latossolo Amarelo.

Amostrador	Massa Úmido do solo com cilindro (g)	Massa Úmida do Solo (g)	Massa Específica Úmida Natural (g/cm ³)	Massa Específica Seco (g/cm ³)	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Índice de Vazios (e)
49	2586,0	1475,9	1,44	1,14	2,68	1,35
60	2589,6	1439,7	1,42	1,12	2,68	1,39
29	2591,9	1463,8	1,43	1,10	2,68	1,43
63	2608,0	1457,5	1,40	1,08	2,68	1,49
96	2553,5	1433,9	1,46	1,12	2,68	1,39
39	2629,4	1481,7	1,45	1,11	2,68	1,41
28	2619,6	1426,6	1,39	1,07	2,68	1,51
42	2562,5	1467,0	1,43	1,10	2,68	1,44
5	2568,6	1429,6	1,41	1,09	2,68	1,47
69	2579,3	1526,6	1,49	1,14	2,68	1,36
55	2584,9	1443,3	1,41	1,08	2,68	1,49
8	2585,7	1470,0	1,44	1,11	2,68	1,43
3	2581,2	1458,8	1,42	1,09	2,68	1,47
2	2627,9	1453,5	1,40	1,07	2,68	1,51
40	2613,5	1507,5	1,47	1,12	2,68	1,39
46	2559,6	1460,9	1,43	1,09	2,68	1,46
57	2620,3	1462,9	1,43	1,10	2,68	1,45
15	2640,7	1475,7	1,44	1,11	2,68	1,43
68	2611,7	1499,3	1,47	1,13	2,68	1,38
45	2638,8	1490,1	1,46	1,12	2,68	1,40

Tabela 44 – Massa Específica e índice de vazios determinadas para o Latossolo Vermelho

Amostrador	Massa Úmido do solo com cilindro (g)	Massa Úmida do Solo (g)	Massa Específica Úmida Natural (g/cm ³)	Massa Específica Seco (g/cm ³)	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Índice de Vazios (e)
20	3016,0	1908,8	1,87	1,34	2,93	1,18
67	2915,5	1862,1	1,82	1,31	2,93	1,24
42	2999,2	1903,7	1,86	1,33	2,93	1,20
5	2957,0	1818,1	1,79	1,36	2,93	1,16
69	2880,4	1827,7	1,78	1,32	2,93	1,22
55	2988,7	1847,1	1,81	1,38	2,93	1,12
8	2977,7	1862,1	1,83	1,38	2,93	1,12
62	3089,9	1966,1	1,92	1,37	2,93	1,14
3	2951,9	1829,5	1,78	1,37	2,93	1,15
2	3025,0	1850,6	1,78	1,34	2,93	1,19
46	2995,8	1897,1	1,85	1,32	2,93	1,21
64	2982,9	1917,1	1,87	1,35	2,93	1,17
15	3048,9	1883,9	1,84	1,31	2,93	1,24
45	2977,0	1828,2	1,79	1,36	2,93	1,16

APÊNDICE V

Avaliação da Adsorção do Azul de Metileno pelo Método da Mancha

O Argissolo apresentou baixos valores de adsorção (consumo) de azul de metileno e conseqüentemente de atividade independentemente do método utilizado como mostram as Tabela 45 e Tabela 46.

Tabela 45 – Ensaio de Adsorção de Azul do Argissolo conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno												
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Cápsula</i>	319	184	219	287	221	63	116	293	202	44	198	314
<i>Tara</i>	17,68	17,96	17,05	19,06	16,60	18,29	14,98	17,52	17,36	13,07	17,00	16,64
<i>Peso Úmido (g)</i>	58,86	57,43	52,72	49,52	58,41	40,76	40,14	46,91	48,21	39,86	29,38	49,35
<i>Peso Seco (g)</i>	57,94	56,51	51,96	48,90	57,51	40,36	39,67	46,33	47,59	39,35	29,20	48,69
<i>Umidade (%)</i>	2,30	2,37	2,16	2,08	2,20	1,83	1,91	2,04	2,07	1,94	1,50	2,05
<i>Úmida. Média (%)</i>	2,28			2,04			2,01			1,83		
<i>Quantidade (g)</i>	1,06			1,07			1,03			1,08		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,03			1,05			1,01			1,06		
<i>Azul consumido (ml)</i>	14,00			14,00			14,00			15,00		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	89,28			86,60			90,51			88,64		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	70,35			65,21			73,31			71,06		
<i>Va</i>	15,16			15,37			15,38			15,98		
<i>VB</i>	1,35			1,33			1,39			1,42		
<i>Acb</i>	1,52			1,54			1,54			1,60		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,35			1,33			1,39			1,42		
<i>SE (m²/g)</i>	33,10			32,56			34,06			34,65		
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,03			1,04			1,03			1,06		
<i>Azul consumido (ml)</i>	16,00			16,00			16,00			16,00		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	89,28			86,60			90,51			88,64		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	70,35			65,21			73,31			71,06		
<i>Va</i>	17,41			17,75			17,17			17,07		
<i>VB</i>	1,55			1,54			1,55			1,51		
<i>Acb</i>	1,74			1,77			1,72			1,71		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,55			1,54			1,55			1,51		
<i>SE (m²/g)</i>	38,03			37,59			38,01			37,00		

Tabela 46 – Ensaio de Adsorção de Azul do Argissolo conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra seca em estufa a 100 ° C por 24 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,01	1,01	1,02	1,02
Azul consumido (ml)	16,00	16,00	16,00	16,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	89,28	86,60	90,51	88,64
Argila 0,005 (%) total do solo	70,35	65,21	73,31	71,06
Va	17,79	18,27	17,40	17,63
VB	1,59	1,58	1,57	1,56
Acb	1,78	1,83	1,74	1,76
CTC (meq/100g)	1,59	1,58	1,57	1,56
SE (m ² /g)	38,85	38,71	38,51	38,23
Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,06	1,01	1,00	1,00
Azul consumido (ml)	14,00	14,00	14,00	14,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	89,28	86,60	90,51	88,64
Argila 0,005 (%) total do solo	70,35	65,21	73,31	71,06
Va	14,82	16,04	15,40	15,72
VB	1,32	1,39	1,39	1,39
Acb	1,48	1,60	1,54	1,57
CTC (meq/100g)	1,32	1,39	1,39	1,39
SE (m ² /g)	32,35	33,97	34,10	34,08

O Latossolo Amarelo também apresentou valores baixos de adsorção e consequentemente de atividade independentemente do método utilizado como mostram as Tabela 47 e Tabela 48.

Tabela 47 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Amarelo conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno												
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Cápsula</i>	83	25	226	244	86	233	123	296	252	272	39	284
<i>Tara</i>	15,7	13,2	17,9	17,0	14,1	15,4	14,1	15,8	16,6	17,0	14,1	16,7
<i>Peso Úmido (g)</i>	40,3	41,2	65,5	55,6	49,4	55,8	46,5	50,2	50,5	41,0	55,1	41,0
<i>Peso Seco (g)</i>	39,0	39,7	62,8	53,9	47,8	54,0	45,7	49,3	49,6	40,0	53,5	40,1
<i>Umidade (%)</i>	5,6	5,8	6,1	4,7	4,7	4,8	2,8	2,8	2,8	4,1	4,1	4,0
<i>Úmida. Média (%)</i>	5,85			4,75			2,82			4,09		
<i>Quantidade (g)</i>	1,0514			1,0091			1,0282			1,0282		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	0,99			0,96			1,00			0,99		
<i>Azul consumido (ml)</i>	15			15			15			13		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	93,14			88,06			97,28			91,36		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	71			72			71			72		
<i>Va</i>	16,21			17,68			15,42			14,40		
<i>VB</i>	1,51			1,56			1,50			1,32		
<i>Acb</i>	1,62			1,77			1,54			1,44		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,51			1,56			1,50			1,32		
<i>SE (m²/g)</i>	36,94			38,09			36,69			32,19		
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,02			1,00			1,01			1,00		
<i>Azul consumido (ml)</i>	16,00			16,00			16,00			16,00		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	93,14			88,06			97,28			91,36		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	71,00			71,86			71,45			71,89		
<i>Va</i>	16,78			18,16			16,28			17,50		
<i>VB</i>	1,56			1,60			1,58			1,60		
<i>Acb</i>	1,68			1,82			1,63			1,75		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,56			1,60			1,58			1,60		
<i>SE (m²/g)</i>	38,23			39,12			38,74			39,11		

Tabela 48 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Amarelo conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra seca em estufa a 100 ° C por 24 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,01	1,02	1,01	1,04
Azul consumido (ml)	14,00	14,00	14,00	14,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	93,14	88,06	97,28	91,36
Argila 0,005 (%) total do solo	71,00	71,86	71,45	71,89
Va	14,86	15,62	14,28	14,72
VB	1,38	1,38	1,39	1,34
Acb	1,49	1,56	1,43	1,47
CTC (meq/100g)	1,38	1,38	1,39	1,34
SE (m ² /g)	33,85	33,65	33,99	32,89
Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,00	1,04	1,05	1,03
Azul consumido (ml)	14,00	14,00	14,00	14,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	93,14	88,06	97,28	91,36
Argila 0,005 (%) total do solo	71,00	71,86	71,45	71,89
Va	14,98	15,35	13,68	14,93
VB	1,40	1,35	1,33	1,36
Acb	1,50	1,53	1,37	1,49
CTC (meq/100g)	1,40	1,35	1,33	1,36
SE (m ² /g)	34,13	33,06	32,55	33,36

O Latossolo Vermelho também apresentou também baixos de adsorção, contudo levemente superior ao dos anteriores, sendo também consequentemente baixa atividade independentemente do método utilizado como mostram as Tabela 49 e Tabela 50.

Tabela 49 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Vermelho conforme a Metodologia proposta por Fabbri (1994), em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno												
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Cápsula</i>	305	78	72	287	221	63	44	198	314	116	293	202
<i>Tara</i>	17,1	14,2	12,9	19,1	16,6	18,3	13,1	17,0	16,6	15,0	17,5	17,4
<i>Peso Úmido (g)</i>	42,4	41,1	47,8	49,6	47,6	51,3	43,3	42,1	48,4	44,4	39,0	49,0
<i>Peso Seco (g)</i>	42,0	40,8	47,3	49,1	47,1	50,8	42,9	41,8	48,1	44,1	38,8	48,5
<i>Umidade (%)</i>	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,5	1,3	1,2	1,3	1,1	1,3	1,5
<i>Úmida. Média (%)</i>	1,42			1,56			1,23			1,29		
<i>Quantidade (g)</i>	1,0674			1,0585			1,0705			1,0622		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,05			1,04			1,06			1,05		
<i>Azul consumido (ml)</i>	20			20			20			20		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	84,37			83,79			83,01			82,56		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	80			79			78			76		
<i>Va</i>	22,53			22,53			22,53			22,53		
<i>VB</i>	1,90			1,92			1,89			1,91		
<i>Acb</i>	2,25			2,29			2,28			2,31		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,90			1,92			1,89			1,91		
<i>SE (m²/g)</i>	46,48			46,94			46,26			46,65		
Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068												
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas												
P.h. de 4,71 normal da própria amostra em 100 ml de água e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno												
Dados Experimentais												
Amostra	1a			1b			2a			2b		
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,03			1,04			1,03			1,04		
<i>Azul consumido (ml)</i>	14,00			14,00			14,00			14,00		
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	84,37			78,90			83,01			82,56		
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	80,40			79,00			77,70			76,00		
<i>Va</i>	16,15			17,06			16,37			16,31		
<i>VB</i>	1,36			1,35			1,36			1,35		
<i>Acb</i>	1,61			1,71			1,64			1,63		
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,36			1,35			1,36			1,35		
<i>SE (m²/g)</i>	33,32			32,93			33,25			32,93		

Tabela 50 – Ensaio de Adsorção de Azul do Latossolo Vermelho conforme a Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 – 09, com amostra na condição Natural e na condição de sem matéria orgânica por calcinação.

Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra seca em estufa a 100 ° C por 24 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,01	1,02	1,02	1,01
Azul consumido (ml)	14,00	14,00	14,00	14,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	84,37	83,79	83,01	82,56
Argila 0,005 (%) total do solo	80,40	79,00	77,70	76,00
Va	16,49	16,38	16,53	16,79
VB	1,39	1,37	1,37	1,39
Acb	1,65	1,64	1,65	1,68
CTC (meq/100g)	1,39	1,37	1,37	1,39
SE (m ² /g)	34,03	33,57	33,57	33,90
Metodologia em conformidade com a Norma Americana ASTM C 837 - 09				
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas				
P.h. de 3,0 da própria amostra com água e adição de 1,1 ml de Ácido Sulfúrico na concentração de 0,1 molar e Solução Padrão do Adsorvente de 1g/1L de Azul de metileno				
Dados Experimentais				
Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade Seca (g)	1,02	1,02	1,01	1,03
Azul consumido (ml)	14,00	14,00	14,00	14,00
Argila 0,005 (%) unitária ensaiada	84,37	83,79	83,01	82,56
Argila 0,005 (%) total do solo	80,40	79,00	77,70	76,00
Va	16,19	16,38	16,70	16,46
VB	1,37	1,37	1,39	1,36
Acb	1,62	1,64	1,67	1,65
CTC (meq/100g)	1,37	1,37	1,39	1,36
SE (m ² /g)	33,42	33,57	33,90	33,25

APÊNDICE VI

Método Expedito das Pastilhas

Serão apresentados os resultados do respetivo método nas Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53.

Tabela 51 – Dados do método expedito das pastilhas do Argissolo.

Amostra	Nº	Diâmetro (mm)		Contração (mm)			Penetração (mm)			
		Inicial	Médio	Final	Médio	Individual	Média	Individual	Média Individual	Média Total
1a	1	20,09		18,08				0,40		
		19,97	20,05	18,03	18,02	2,03		0,50	0,47	
		20,09		17,96				0,50		
	2	21,13		19,15				0,30		
		21,42	21,26	19,16	19,18	2,08		0,40	0,33	
		21,24		19,23				0,30		
	3	19,97		18,26				0,40		
		20,16	20,11	18,21	18,23	1,89	1,99	0,50	0,40	0,41
		20,21		18,21				0,30		
	4	20,24		18,05				0,50		
		19,98	20,10	18,09	18,02	2,08		0,60	0,50	
		20,08		17,93				0,40		
	5	20,20		18,26				0,40		
		19,98	20,09	18,10	18,19	1,90		0,30	0,33	
		20,10		18,22				0,30		
1b	1	20,23		18,05				0,50		
		20,24	20,16	18,16	18,11	2,05		0,30	0,37	
		20,00		18,12				0,30		
	2	21,21		19,00				0,70		
		21,17	21,19	19,11	19,07	2,12		0,60	0,60	
		21,19		19,10				0,50		
	3	20,18		17,92				0,30		
		20,16	20,18	18,15	18,02	2,16	2,12	0,20	0,23	0,35
		20,19		17,99				0,20		
	4	21,29		19,10				0,20		
		21,28	21,28	19,27	19,14	2,14		0,20	0,17	
		21,27		19,05				0,10		
	5	21,24		18,97				0,30		
		21,20	21,23	19,04	19,08	2,14		0,50	0,40	
		21,24		19,24				0,40		
2a	1	20,16		18,21				0,20		
		20,24	20,18	18,15	18,17	2,01		0,50	0,40	
		20,13		18,14				0,50		
	2	20,15		18,20				0,50		
		20,22	20,19	18,13	18,17	2,02		0,40	0,47	
		20,20		18,18				0,50		
	3	19,97		18,07				0,50		
		20,17	20,03	18,12	18,11	1,92	2,05	0,30	0,43	0,45
		19,95		18,14				0,50		
	4	21,25		19,03				0,50		
		21,30	21,24	19,11	19,03	2,21		0,50	0,47	
		21,18		18,95				0,40		
	5	20,24		18,16				0,50		
		19,98	20,12	17,95	18,04	2,08		0,50	0,50	
		20,14		18,02				0,50		
2b	1	21,12		19,07				0,50		
		21,26	21,20	19,00	19,02	2,18		0,30	0,40	
		21,23		19,00				0,40		
	2	20,19		18,06				0,40		
		20,02	20,09	18,06	18,07	2,02		0,40	0,43	
		20,07		18,10				0,50		
	3	20,21		18,35				0,40		
		20,27	20,21	18,30	18,32	1,89	2,06	0,30	0,33	0,43
		20,15		18,31				0,30		
	4	21,36		19,16				0,60		
		21,09	21,16	19,17	19,09	2,07		0,50	0,47	
		21,03		18,94				0,30		
	5	20,15		17,79				0,70		
		20,20	20,16	18,19	18,00	2,16		0,30	0,50	
		20,13		18,01				0,50		

Tabela 52 – Dados do método expedito das pastilhas do Latossolo Amarelo.

Amostra	Nº	Diâmetro (mm)			Contração (mm)			Penetração (mm)		
		Inicial	Médio	Final	Médio	Individual	Média	Individual	Média individual	Média Total
1a	1	21,33		19,24				0,80		
		21,13	21,24	19,43	19,30	1,94		0,50	0,60	
		21,26		19,24				0,50		
	2	20,01		18,20				0,70		
		20,18	20,13	18,31	18,21	1,92		0,80	0,73	
		20,21		18,12				0,70		
	3	20,26		18,20				0,40		
		20,13	20,21	18,37	18,21	2,00	1,92	0,50	0,40	0,60
		20,24		18,06				0,30		
	4	20,23		18,36				0,70		
		20,27	20,21	18,37	18,32	1,89		0,70	0,57	
		20,14		18,24				0,30		
	5	21,20		19,30				0,70		
		21,28	21,19	19,38	19,35	1,84		0,70	0,70	
		21,08		19,36				0,70		
1b	1	21,31		19,49				0,50		
		21,27	21,26	19,38	19,40	1,86		0,60	0,57	
		21,20		19,34				0,60		
	2	20,29		18,26				1,00		
		20,13	20,22	18,27	18,19	2,03		1,30	0,93	
		20,24		18,05				0,50		
	3	20,14		18,31				0,50		
		20,25	20,19	18,16	18,26	1,93	1,95	0,80	0,70	0,73
		20,19		18,31				0,80		
	4	21,46		19,24				0,80		
		21,18	21,30	19,31	19,27	2,03		0,60	0,77	
		21,27		19,27				0,90		
	5	20,14		18,29				0,60		
		20,17	20,10	18,27	18,21	1,89		0,90	0,67	
		20,00		18,07				0,50		
2a	1	21,21		19,29				0,70		
		21,47	21,28	19,16	19,23	2,05		1,00	0,80	
		21,17		19,25				0,70		
	2	21,27		19,23				0,70		
		21,14	21,26	19,32	19,30	1,97		0,60	0,57	
		21,38		19,33				0,40		
	3	20,15		18,37				1,00		
		20,25	20,12	18,44	18,44	1,69	1,82	0,90	1,00	0,77
		19,97		18,49				1,10		
	4	20,02		18,40				0,50		
		20,15	20,14	18,37	18,38	1,76		0,90	0,77	
		20,25		18,35				0,90		
	5	21,18		19,50				0,90		
		21,27	21,18	19,51	19,54	1,64		0,80	0,73	
		21,09		19,60				0,50		
2b	1	19,99		18,45				0,90		
		19,84	19,95	18,36	18,35	1,60		0,80	0,93	
		20,03		18,25				1,10		
	2	20,11		18,32				0,60		
		20,05	20,05	18,13	18,21	1,84		0,80	0,70	
		19,99		18,18				0,70		
	3	20,10		18,11				0,40		
		20,06	20,09	18,14	18,13	1,96	1,83	1,00	0,70	0,79
		20,12		18,15				0,70		
	4	21,25		19,37				0,90		
		21,27	21,25	19,31	19,37	1,88		0,70	0,73	
		21,23		19,43				0,60		
	5	20,23		18,07				1,00		
		20,03	20,14	18,33	18,27	1,87		0,90	0,90	
		20,17		18,41				0,80		

Tabela 53 – Dados do método expedito das pastilhas do Latossolo Amarelo.

Amostra	Nº	Diâmetro (mm)			Contração (mm)			Penetração (mm)		
		Inicial	Médio	Final	Médio	Individual	Média	Individual	Média individual	Média Total
1a	1	20,05		18,10				2,50		
		20,11	20,13	18,28	18,20	1,93		2,50	2,83	
		20,22		18,22				3,50		
	2	20,22		18,32				1,90		
		20,15	20,52	18,25	18,24	2,28		2,50	2,30	
		21,18		18,15				2,50		
	3	21,36		19,12				1,80		
		21,18	21,32	18,35	18,44	2,88	2,18	2,50	2,27	2,64
		21,42		17,84				2,50		
	4	21,42		19,02				2,70		
		21,16	20,91	19,00	18,97	1,94		2,50	2,80	
		20,15		18,90				3,20		
	5	20,15		18,37				3,10		
		20,18	20,16	18,30	18,27	1,88		3,20	3,00	
		20,14		18,15				2,70		
1b	1	20,20		18,17				2,60		
		20,17	20,12	18,14	18,11	2,01		1,50	2,17	
		19,98		18,01				2,40		
	2	20,08		18,20				1,90		
		20,10	20,14	18,24	18,21	1,94		2,00	2,13	
		20,25		18,18				2,50		
	3	21,46		19,23				1,50		
		20,99	21,27	19,30	19,24	2,02	1,99	1,90	1,80	2,27
		21,35		19,20				2,00		
	4	20,23		18,09				1,60		
		20,17	20,17	18,08	18,07	2,10		2,50	2,20	
		20,11		18,05				2,50		
	5	20,14		18,35				3,50		
		20,01	20,13	18,15	18,23	1,90		2,50	3,03	
		20,24		18,20				3,10		
2a	1	21,22		19,04				2,60		
		21,20	21,21	18,93	19,02	2,19		2,10	2,37	
		21,21		19,09				2,40		
	2	20,13		18,24				2,50		
		20,25	20,16	18,44	18,32	1,84		2,80	2,70	
		20,10		18,29				2,80		
	3	20,23		18,10				2,90		
		20,17	20,21	18,07	18,09	2,12	2,03	3,10	2,87	2,56
		20,24		18,10				2,60		
	4	20,18		18,17				2,00		
		20,13	20,14	18,18	18,12	2,02		2,00	2,13	
		20,11		18,00				2,40		
	5	20,15		18,20				3,00		
		20,12	20,15	18,13	18,16	1,99		2,80	2,73	
		20,18		18,16				2,40		
2b	1	21,19		19,11				2,40		
		21,23	21,25	19,07	19,14	2,11		2,60	2,67	
		21,33		19,25				3,00		
	2	21,22		19,46				3,20		
		21,28	21,24	19,43	19,44	1,79		2,90	2,87	
		21,21		19,44				2,50		
	3	20,19		18,51				3,30		
		20,12	20,15	18,45	18,45	1,71	1,85	2,80	3,17	2,85
		20,15		18,38				3,40		
	4	20,22		18,43				2,30		
		20,14	20,17	18,30	18,37	1,79		2,60	2,63	
		20,14		18,39				3,00		
	5	20,15		18,33				3,00		
		20,19	20,17	18,28	18,31	1,87		3,30	2,93	
		20,18		18,31				2,50		

APÊNDICE VII

Ensaio de Desagregação

Serão apresentados os resultados do ensaio de Desagregação com amostras cúbicas de 6 cm e cilíndricas com altura de 6 cm e diâmetros do de 8 cm nas Tabela 54, Tabela 55 e Tabela 56.

Tabela 54 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Argissolo.

Metodologia proposta por Santos (1997)					
Imersão Parcial em meio de água destilada					
Dados experimentais com amostra cúbica					
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
Inicial	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
30 min.	Abatimento Leve	Intacta	Intacta	Abatimento leve	Abatimento leve
60 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
90 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
180 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
24 horas	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
Dados experimentais com amostra cilíndrica					
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
Inicial	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
30 min.	Abatimento muito leve	Abatimento muito leve	Abatimento muito leve	Intacta	Abatimento muito leve
60 min.	Abatimento muito leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
90 min.	Abatimento muito leve	Abatimento Leve	Abatimento Moderada	Abatimento Leve	Abatimento Leve
180 min.	Abatimento muito leve	Abatimento Leve	Abatimento Moderada	Abatimento Leve	Abatimento Leve
24 horas	Abatimento muito leve	Abatimento Leve	Abatimento Moderada	Abatimento Leve	Abatimento Leve
Metodologia proposta por Santos (1997) e em conformidade com a NBR 13601					
Imersão Total em meio de água destilada					
Dados experimentais com amostra cúbica					
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
Inicial	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Intacta	Fraturamento Leve	Abatimento Leve
30 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
60 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
90 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
180 min.	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
24 horas	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve	Abatimento Leve
Dados experimentais com amostra cilíndrica					
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
Inicial	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado
30 min.	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado
60 min.	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado
90 min.	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado
180 min.	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado
24 horas	Abatimento leve	Abatimento leve	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado	Abatimento Moderado

Tabela 55 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Latossolo Amarelo.

Ensaio de Desagregação Slaking Test				
Metodologia proposta por Santos (1997)				
Imersão Parcial em meio de água destilada				
Dados experimentais com amostra cúbica				
<i>Fase do ensaio</i>	<i>Amostra 01</i>	<i>Amostra 02</i>	<i>Amostra 03</i>	<i>Amostra 04</i>
<i>Inicial</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>30 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>60 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>90 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>180 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>24 horas</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
Dados experimentais com amostra cilíndrica				
<i>Fase do ensaio</i>	<i>Amostra 01</i>	<i>Amostra 02</i>		
<i>Inicial</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>30 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>60 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>90 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>180 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>24 horas</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
Metodologia proposta por Santos (1997) e em conformidade com a NBR 13601				
Imersão Total em meio de água destilada				
Dados experimentais com amostra cúbica				
<i>Fase do ensaio</i>	<i>Amostra 01</i>	<i>Amostra 02</i>	<i>Amostra 03</i>	<i>Amostra 04</i>
<i>Inicial</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>30 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>60 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>90 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>180 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
<i>24 horas</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>
Dados experimentais com amostra cilíndrica				
<i>Fase do ensaio</i>	<i>Amostra 01</i>	<i>Amostra 02</i>		
<i>Inicial</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>30 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>60 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>90 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>180 min.</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		
<i>24 horas</i>	<i>Intacta</i>	<i>Intacta</i>		

Tabela 56 – Ensaio de Desagregação por imersão parcial e total de amostras cúbicas e cilíndricas do Latossolo Vermelho.

Ensaio de Desagregação Slaking Test Metodologia proposta por Santos (1997) Imersão Parcial em meio de água destilada				
Dados Experimentais com amostra cúbica				
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04
Inicial	Dispersão Leve	Dispersão Moderada	Dispersão Leve	Dispersão Leve
30 min.	Dispersão Leve	Dispersão Moderada	Dispersão Leve	Dispersão Leve
60 min.	Dispersão Leve	Dispersão Total	Dispersão Leve	Dispersão e Fraturamento Moderados
90 min.	Dispersão Leve	Dispersão Total	Dispersão Leve	Dispersão e Fraturamento Moderados
180 min.	Dispersão Leve	Dispersão Total	Dispersão Leve	Dispersão e Fraturamento Moderados
24 horas	Dispersão Leve	Dispersão Total	Dispersão Leve	Dispersão e Fraturamento Moderados
Dados Experimentais com amostra cilíndrica				
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02		
Inicial	Dispersão leve	Dispersão leve		
30 min.	Dispersão Alta	Dispersão Moderada		
60 min.	Dispersão Alta	Dispersão Moderada		
90 min.	Dispersão Alta	Dispersão Alta		
180 min.	Dispersão Alta	Dispersão Alta		
24 horas	Dispersão Alta	Dispersão Alta		
Metodologia proposta por Santos (1997) e em conformidade com a NBR 13601 Imersão Total em meio de água destilada				
Dados Experimentais com amostra cúbica				
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04
Inicial	Dispersão Moderada	Dispersão Leve	Dispersão Leve	Dispersão Leve
30 min.	Dispersão Moderada	- Dispersão Leve - Fraturamento Moderado	Dispersão Moderada	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto
60 min.	Dispersão Moderada	- Dispersão Leve - Fraturamento Moderado	Dispersão Moderada	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto
90 min.	Dispersão Moderada	- Dispersão Leve - Fraturamento Moderado	Dispersão Moderada	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto
180 min.	Dispersão Moderada	- Dispersão Leve - Fraturamento Moderado	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto
24 horas	-Dispersão Elevada -Fraturamento Elevado	- Dispersão Leve - Fraturamento Moderado	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto	- Dispersão Moderada - Fraturamento Alto
Dados Experimentais com amostra cilíndrica				
Fase do ensaio	Amostra 01	Amostra 02		
Inicial	Dispersão Moderada	Dispersão Leve		
30 min.	Dispersão Alta	Dispersão Leve		
60 min.	Dispersão Alta	Dispersão Leve		
90 min.	Dispersão Alta	Dispersão Leve		
180 min.	Dispersão Alta	Dispersão Leve		
24 horas	Dispersão Total	Dispersão Leve		

APÊNDICE VIII

Ensaio de Inderbitzen

São apresentados os resultados dos ensaios de Inderbitzen de cada amostra de solo nas Figura 107, Figura 108 e Figura 109, sendo possível observar que a estabilização da erosão ocorre em quase sua totalidade no tempo de 10 minutos e dessa maneira sendo adotada a erosão do respectivo ensaio correspondente a taxa da erosão dívida por 10 minutos, como proposto por Bastos (1999).

Figura 107 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Argissolo.

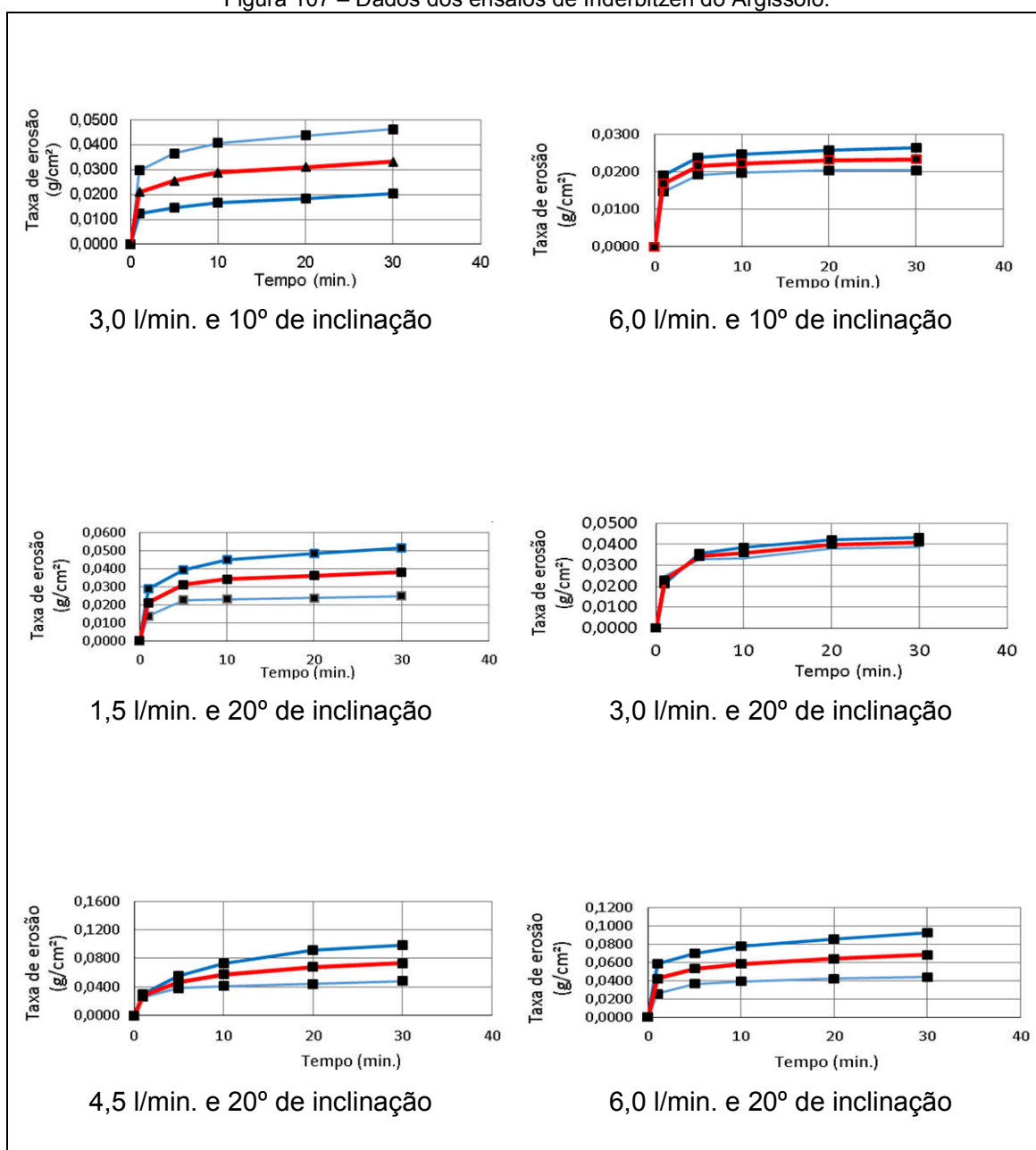


Figura 108 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Latossolo Amarelo.

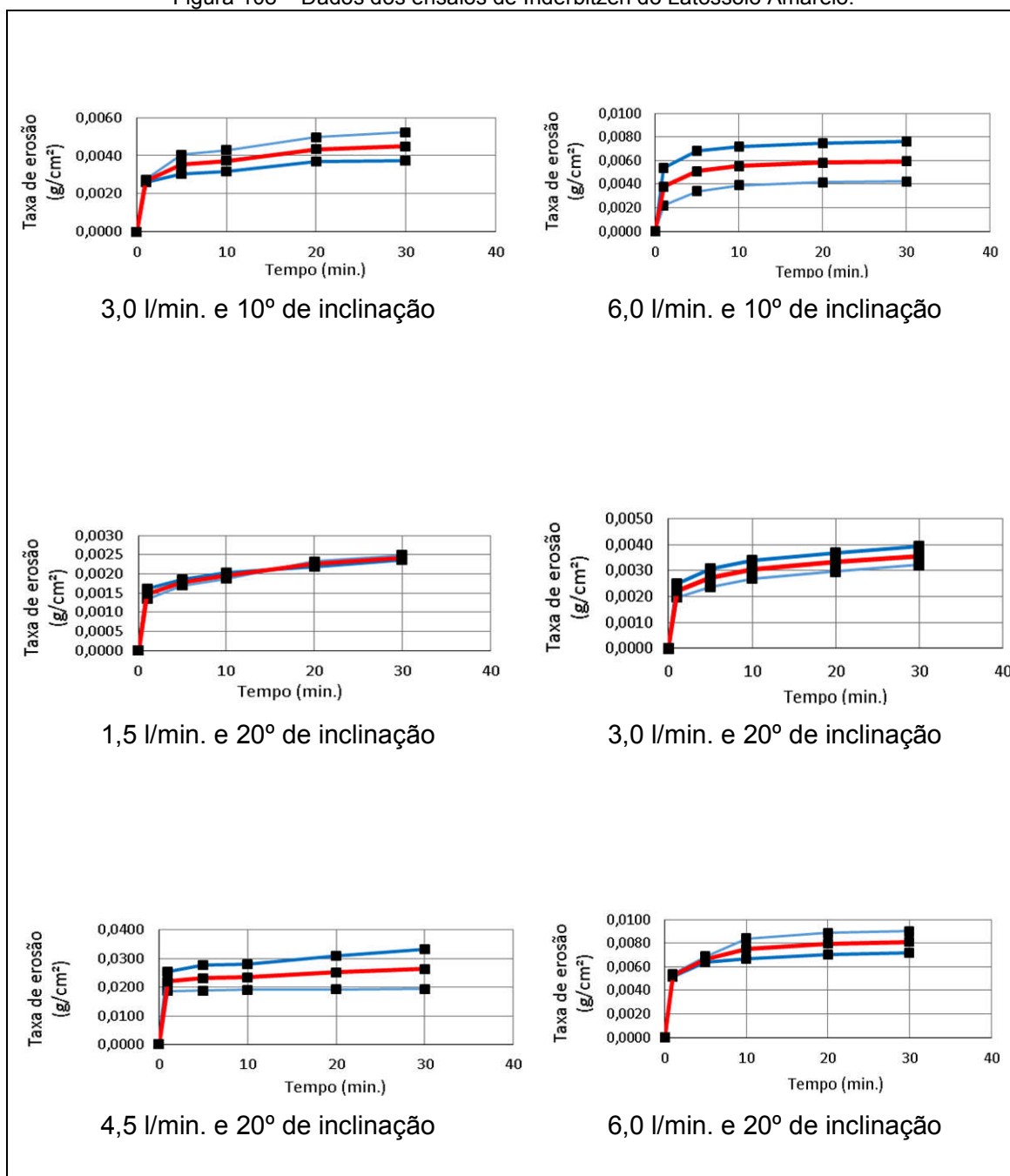


Figura 109 – Dados dos ensaios de Inderbitzen do Latossolo Vermelho.

