

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

TAINÁ SILVA SÁ BRITTO

**INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARGILOSO
COMPACTADO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

CURITIBA

2023

TAINÁ SILVA SÁ BRITTO

**INFLUÊNCIA DA SUÇÃO NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARGILOSO
COMPACTADO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

**Influence of suction on the erodibility of a compacted clayey soil from the
Guabirotuba Formation**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil –
PPGEC, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo.

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



TAINA SILVA SA BRITTO

**INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO DA FORMAÇÃO
GUABIROTUBA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como
requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 27 de Julho de 2023

Dr. Ronaldo Luis Dos Santos Izzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Marcia Maria Dos Anjos Mascarenha, Doutorado - Universidade Federal de Goiás (Ufg)

Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/07/2023.

Dedico esta pesquisa aos meus pais,
José e Neusa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço imensamente aos meus pais, Neusa e José, por todo o amor, carinho, os ensinamentos e o apoio incondicional ao longo destes anos. A vocês minha gratidão eterna.

Agradecimento ao meu irmão Robson e a minha irmã Tauany pelo carinho e apoio nesta trajetória. Agradeço também a Davi, Valéria e as amigas Angélica, Ana Paula, Ariane e Kalita. A vocês que mesmo à longa distância me acolheram e apoiaram no caminho, muito obrigada.

Minha gratidão aos colegas do Laboratório de Geotecnia da UTFPR – LabGeo pelo apoio, ensinamentos, auxílio técnico nos ensaios e conhecimento compartilhado, especialmente a Yeimy, Jacqueline, Weiner e Monigleicia. A vocês muito obrigada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo pela sabedoria e atenção com que me orientou. E agradecimento a todos os membros da banca pela avaliação e contribuição desta pesquisa.

Agradecimento ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UTFPR - PPGEC pela oportunidade de participar do mestrado acadêmico, que possibilitou ampliar o conhecimento em geotecnia.

Ao laboratório de Materiais do DACOC e ao laboratório do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR por todo auxílio nos ensaios.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Processo nº 23064.043877/2020-06) pela bolsa de fomento de pesquisa, que foi essencial para a condução desta dissertação.

Humilde é aquela pessoa que sabe que não sabe
de tudo. Que sabe que outra pessoa sabe o que
ela não sabe, que ela e outra pessoa saberão
muitas coisas juntas, que ela e outra pessoa
nunca saberão tudo que pode ser sabido.
(MÁRIO SÉRGIO CORTELLA).

RESUMO

A Formação Guabirotuba possui características que a tornam suscetível ao desenvolvimento de processos erosivos, e quando acelerados pela ação antrópica têm impactos na esfera ambiental e socioeconômica. A suscetibilidade do solo à erosão pode ser representada pelo parâmetro de erodibilidade (K), que tem relação à sucção atuante na estrutura do solo não saturado. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da sucção na erodibilidade de um solo argiloso compactado da Formação Guabirotuba. O ensaio de determinação da erodibilidade do solo foi realizado com equipamento de Inderbitzen. A caracterização do solo foi realizada através dos ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de *Atterberg*, fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), e compactação nas energias normal, intermediária e modificada. Foi realizado o ensaio de permeabilidade à carga variável para a análise da condutividade hidráulica do solo compactado. As curvas características de água no solo para o material compactado nas três energias foram obtidas a partir dos ensaios do Método do Papel Filtro. O ensaio de erodibilidade foi realizado com corpos de prova compactados nas três massas específicas aparentes secas máximas das curvas de compactação ($1,48 \text{ g/cm}^3$, $1,57 \text{ g/cm}^3$ e $1,66 \text{ g/cm}^3$) e nos graus de saturação de 20%, 50% e saturação ótima. A variação da densidade de compactação do solo alterou a forma da curva característica, que apresenta tendência à forma unimodal pela redução do índice de vazios. A permeabilidade do solo diminuiu acentuadamente para graus de saturação correspondentes ao trecho de dessaturação da curva característica em $1,48 \text{ g/cm}^3$, $1,57 \text{ g/cm}^3$ e $1,66 \text{ g/cm}^3$. A perda de massa de solo foi influenciada pelo grau de saturação, densidade e inclinação, sendo o grau de saturação o fator mais significativo. A resistência do solo à erosão mostrou ser menor para o grau de saturação de 50%, que pode estar relacionado com a redução do coeficiente de permeabilidade não saturada do solo. Em síntese, confirma-se que o grau de saturação do solo tem impacto significativo na sua resistência à erosão, sendo mais suscetível a desestruturação durante a fase contínua do ar nos poros.

Palavras-chave: erodibilidade; sucção; curva característica de água no solo; Formação Guabirotuba.

ABSTRACT

The Guabirotuba Formation has characteristics that make it susceptible to the development of erosion processes, and when accelerated by anthropic action, they impact the environmental and socioeconomic sphere. Soil susceptibility to erosion can be represented by the erodibility parameter (K), which is related to the suction acting on the unsaturated soil structure. In this context, the present research aimed to evaluate the influence of suction on the erodibility of compacted clayey soil from the Guabirotuba Formation. The soil erodibility determination test was carried out with Inderbitzen equipment. Soil characterization was carried out through granulometry, real specific mass of the grains, Atterberg limits, X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and compaction tests, in standard, intermediate effort, and modified effort. The variable load permeability test was carried out to analyze the conductivity of the compacted hydraulic soil. Soil water characteristic curves for compacted soil at the three efforts were obtained from the Filter Paper Method tests. The erodibility test was carried out with specimens compacted at the three maximum dry apparent specific masses of the compaction curves (1.48 g/cm^3 , 1.57 g/cm^3 , and 1.66 g/cm^3) and at the degrees of saturation of 20%, 50%, and optimal saturation. The variation in soil compaction density altered the shape of the characteristic curve, which tends towards a unimodal shape due to the reduction in the void ratio. Soil permeability decreased markedly for degrees of saturation corresponding to the characteristic curve's desaturation stretch at 1.48 g/cm^3 , 1.57 g/cm^3 , and 1.66 g/cm^3 . Soil mass loss was influenced by the degree of saturation, density, and slope, with the degree of saturation being the most significant factor. Soil resistance to erosion was shown to be lower for the 50% saturation degree, which may be related to the reduction in the unsaturated permeability coefficient of the soil. In summary, it is confirmed that the degree of saturation of the soil significantly impacts its resistance to erosion, being more susceptible to disruption during the continuous phase of air in the pores.

Keywords: erodibility; suction; soil water characteristic curve; Guabirotuba Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia Sedimentar de Curitiba e área de abrangência da Formação Guabirotuba	22
Figura 2 – Sequências litológicas da Formação Guabirotuba	23
Figura 3 – Aspecto de empastilhamento pelo processo de retração em perfil da Formação Guabirotuba	25
Figura 4 – Curva característica de água no solo	30
Figura 5 – Tipos de curva característica de água no solo	32
Figura 6 – Tipos de medição de sucção: (a) com contato e (b) sem contato	34
Figura 7 – Equipamento Fredlund-SWCC (modelo SWC-150)	34
Figura 8 – Relação entre a SWCC e a curva de condutividade hidráulica	39
Figura 9 – Erosão laminar na bacia de contribuição da UHE Batalha (GO/MG) ..	43
Figura 10 – Erosão em sulcos no município Barra do Ribeiro (RS)	44
Figura 11 – Voçoroca situada em Buriticupu (MA)	45
Figura 12 – Nomograma para definição de K_{USLE}	49
Figura 13 – Ensaio de infiltrabilidade	51
Figura 14 – Ensaio de perda de massa por imersão	51
Figura 15 – Ensaio Crumb test	52
Figura 16 – Equipamento proposto por Inderbitzen (1961)	53
Figura 17 – Equipamento utilizado por Bastos (1999)	54
Figura 18 – Relação entre a perda de solo acumulada e o tempo	54
Figura 19 – Relação entre a perda de solo e a tensão hidráulica atuante	55
Figura 20 – Fluxograma das etapas da pesquisa	61
Figura 21 – Local de coleta do solo em estudo	63
Figura 22 – Solo da pesquisa: (a) perfil em campo; (b) Passante na peneira nº4	63
Figura 23 – Solo coletado em área da Formação Guabirotuba	64
Figura 24 – Equipamento Inderbitzen	66
Figura 25 – Ligação do sistema eletrônico	68
Figura 26 – Rotâmetro digital	68
Figura 27 – Ensaio de granulometria: (a) peneiramento grosso; (b) sedimentação; (c) peneiramento fino	71
Figura 28 – Ensaio de massa específica real dos grãos	72
Figura 29 – Materiais para ensaio: (a) Limite de liquidez; (b) Limite de plasticidade	72
Figura 30 – Equipamentos utilizados nas análises de FRX; DRX; MEV	73
Figura 31 – Ensaio de compactação	74
Figura 32 – Gráfico de classificação MCT	75
Figura 33 – Método de pastilhas: (a) pastilhas moldadas; (b) pastilhas após secagem; (c) etapa de saturação	76
Figura 34 – Gráfico de classificação do método expedito de pastilhas	77
Figura 35 – Etapas da realização do ensaio do papel filtro	78
Figura 36 – Determinação do teor de umidade após período de estabilização ..	79
Figura 37 – Ensaio de permeabilidade à carga variável	80
Figura 38 – Prensa de compactação	82
Figura 39 – Ensaio de Inderbitzen: (a) antes do ensaio; (b) após o ensaio	83
Figura 40 – Curva granulométrica do solo	88
Figura 41 – Composição mineralógica do solo	89

Figura 42 – Curva de compactação do ensaio Mini - MCV	89
Figura 43 – Classificação MCT	90
Figura 44 – Classificação expedita	91
Figura 45 – Curvas de compactação nas energias normal, intermediária e modificada	92
Figura 46 – Microestrutura do solo compactado nos parâmetros da curva de compactação de (a)EN em 500x; (b)EN em 5000x; (c)EI em 500x; (d)EI em 5000x; (e)EM em 500x; (f)EM em 5000x	93
Figura 47 – Curva característica para o solo compactado em 1,48 g/cm ³ (CC-EN)	96
Figura 48 – Curva característica para o solo compactado em 1,57 g/cm ³ (CC-EI)	97
Figura 49 – Curva característica para o solo compactado em 1,66 g/cm ³ (CC-EM)	98
Figura 50 – SWCC ajustado a partir dos resultados do método padrão do papel filtro	98
Figura 51 – Curva de condutividade hidráulica para o solo compactado em ..	102
Figura 52 – Perda de solo representada graficamente para EN	105
Figura 53 – Perda de solo representada graficamente para EI	105
Figura 54 – Perda de solo representada graficamente para EM	106
Figura 55 – Evolução da perda de solo ao longo do tempo de ensaio: (a) EN-20%; (b) EI-20%; (c) EM-20%; (d) EN-50%; (e) EI-50%; (f) EM-50%	107
Figura 56 – Superfícies de resposta relacionando perda de solo por sucção e índice de vazios	112
Figura 57 – Regressão linear para o solo compactado em: (a)1,48-20%; (b)1,48-50% e (c)1,48-91,08%	114
Figura 58 – Regressão linear para o solo compactado em: (a)1,57-20%; (b)1,57-50% e (c)1,57-93,49%	115
Figura 59 – Regressão linear para o solo compactado em: (a)1,66-20%; (b)1,66-50% e (c)1,66-95,60%	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelos de ajuste para a curva característica.....	35
Tabela 2- Modelos de ajuste para previsão da condutividade hidráulica	40
Tabela 3- Fatores de erodibilidade (K_{USLE})	50
Tabela 4 - Taxa de erodibilidade (K) obtida no ensaio de Inderbitzen.....	56
Tabela 5- Adaptações e contribuições ao ensaio de Inderbitzen	56
Tabela 6- Programa experimental	62
Tabela 7 - Equipamentos empregados nos ensaios	65
Tabela 8- Calibração do rotâmetro digital para leituras de vazão corrigidas	69
Tabela 9- Condições adversas e soluções.....	70
Tabela 10- Definição de variáveis	81
Tabela 11- Condição de moldagem dos corpos de prova	82
Tabela 12- Análise de variância (ANOVA)	85
Tabela 13- Características físico-químicas do solo utilizado	87
Tabela 14- Resultados dos ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão .	90
Tabela 15- Resultados do método expedito de pastilhas	91
Tabela 16- Características do solo compactado em EN, EI e EM.....	92
Tabela 17- A composição química obtida na análise de EDS do solo.....	94
Tabela 18- Resultados do método do papel filtro e parâmetros de ajuste CCSA	95
Tabela 19- Valor de entrada de ar e grau de saturação residual para CCAS ...	100
Tabela 20- Características das amostras e resultados do ensaio de permeabilidade	101
Tabela 21- Valores de permeabilidade saturada para solo compactado em diferentes densidades e parâmetros de ajuste da curva de condutividade hidráulica	101
Tabela 22- Perda de solo obtida em cada condição de ensaio Inderbitzen	104
Tabela 23- Análise de variância dos valores de perda de massa do solo considerando o efeito da densidade, grau de saturação e inclinação	109
Tabela 24- Valores de sucção, umidade volumétrica e coeficiente de permeabilidade não saturada referentes aos graus de saturação 20%, 50% e $S_{r\text{ótima}}$	110
Tabela 25- Parâmetros de ajuste das superfícies de resposta que relacionam a perda de solo à sucção e índice de vazios	113
Tabela 26- Valores de taxa de erodibilidade obtidos por regressão linear entre perda de solo e tensão hidráulica.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Analysis of Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCAS	Curva Característica de Água no Solo
CCH	Curva de Condutividade Hidráulica
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
CNM	Confederação Nacional de Municípios
DRX	Difratometria de Raios-X
EN	Energia Normal
EI	Energia Intermediária
EM	Energia Modificada
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
NBR	Normas Brasileiras
PS	Perda de Solo
PVC	Policloreto de Vinila
SWCC	Soil Water Characteristic Curve
SWRC	Soil Water Retention Curve
S2ID	Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VEA	Valor de Entrada de Ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Contextualização da pesquisa	18
1.4	Delimitação da pesquisa.....	19
1.5	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Formação geológica Guabirotuba	21
2.1.1	Características geológicas	21
2.1.2	Erosão e causas associadas na Formação Guabirotuba	24
2.2	Solos não saturados	25
2.2.1	Sucção	25
2.2.1.1	Sucção matricial	26
2.2.1.2	Sucção osmótica	28
2.2.2	Curva característica de água no solo	28
2.2.2.1	Ensaio para construção das curvas características.....	33
2.2.2.2	Modelos matemáticos para ajuste da curva característica	35
2.2.3	Condutividade hidráulica de solos não saturados	37
2.2.3.1	Determinação da condutividade hidráulica.....	40
2.3	Erosão de solos.....	42
2.3.1	Erosão	42
2.3.2	Erodibilidade.....	45
2.3.2.1	Ensaio diretos e indiretos	48
2.3.2.1.1	<i>Equação universal de perda de solo (USLE)</i>	48
2.3.2.1.2	<i>Ensaio de erosão - MCT</i>	50
2.3.2.1.3	<i>Ensaio de dispersibilidade (crumb test)</i>	52
2.3.2.1.4	<i>Ensaio de Inderbitzen</i>	52
2.4	Inter-relação da sucção e erodibilidade	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	Etapas da pesquisa	61
3.2	Materiais e equipamentos.....	63

3.2.1	Solo	63
3.2.2	Equipamentos.....	65
3.2.3	Equipamento de Inderbitzen.....	65
3.2.3.1	Sensor digital.....	67
3.2.3.2	Ensaio testes	70
3.3	Métodos.....	71
3.3.1	Ensaio de caracterização	71
3.3.1.1	Granulometria.....	71
3.3.1.2	Massa específica real dos grãos	71
3.3.1.3	Limites de Atterberg	72
3.3.1.4	Fluorescência de raios-X, difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de varredura	73
3.3.1.5	Compactação	74
3.3.1.6	Metodologia MCT	74
3.3.1.7	Método expedito de pastilhas	76
3.3.2	Ensaio hidromecânicos.....	77
3.3.2.1	Método padrão do papel filtro	77
3.3.2.2	Ensaio de permeabilidade à carga variável	79
3.3.3	Ensaio de erodibilidade	81
3.3.3.1	Ensaio de Inderbitzen.....	81
3.3.4	Análise estatística.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	Ensaio de caracterização.....	87
4.2	Classificação MCT e método expedito de pastilhas.....	89
4.3	Ensaio de compactação.....	92
4.4	Análise morfológica	93
4.5	Método padrão do papel filtro	94
4.6	Ensaio de permeabilidade à carga variável	101
4.7	Ensaio de erodibilidade	104
5	CONCLUSÕES	120
	REFERÊNCIAS.....	123
	APÊNDICE 1- COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DE MÉDIAS DA PERDA DE MASSA DE SOLO (TESTE DE TUKEY)	136
	ANEXO A - CÓDIGO ARDUINO DO MEDIDOR DE VAZÃO (SILVA, 2021)	139

1 INTRODUÇÃO

A Formação Guabirotuba, principal unidade geológica de Curitiba e região metropolitana, possui características que a consideram como problemática à ocupação urbana. Os solos dessa formação são bastante estudados pelas instituições da região, que buscam o melhor entendimento do comportamento geomecânico desses materiais (FELIPE *et al.*, 2022; MUÑOZ *et al.*, 2021; BALDOVINO *et al.*, 2020). Os solos argilosos da Formação Guabirotuba sofrem retração em períodos de seca, porém, quando em contato com a água tendem a expandir. O solo em retração possibilita a infiltração de água, que resulta em processos erosivos, deslizamentos de massas e instabilidade (KORMANN, 2002).

A retração do solo pode estar ligada à presença de argilominerais que facilitam essa alteração volumétrica em períodos de seca. A formação de trincas e aspecto de empastilhamento do solo diminui a sua estabilidade, pela formação de planos potenciais de ruptura e pelo desenvolvimento de processos erosivos (FELIPE, 2011). Nos períodos de chuva, a água tende a permear pelas trincas, uma vez que essas se tornam caminhos preferenciais, possibilitando então o carregamento e desagregação (*slacking*) das partículas de solo (KORMANN, 2002).

A erosão é caracterizada pela degradação, desgaste e transporte de partículas por agentes erosivos, que provocam a transformação de paisagens terrestres. Apesar desse processo de intemperismo, que ocorre em determinado tempo geológico, ser considerado natural, pode ser acelerado e intensificado pela interferência antrópica (MASCARENHA *et al.*, 2015).

A análise de processos erosivos requer a compreensão da multiplicidade e inter-relação dos principais fatores deflagradores no fenômeno, tais como aspectos climáticos, topográficos, de cobertura vegetal e de propriedades do solo, como o parâmetro de erodibilidade. O parâmetro de erodibilidade representa a maior ou menor suscetibilidade do solo à erosão, e pode ser avaliado a partir de métodos de diretos, como o ensaio de Inderbitzen, e indiretos (BASTOS, MILITITSKY e GEHLING, 2000).

A Mecânica dos Solos é subdividida em solos saturados e não saturados, e a sua diferenciação é fundamental para compreender o comportamento do solo utilizado em obras geotécnicas. Um solo não saturado tem mais de duas fases e a pressão da água nos poros é negativa em relação à pressão do ar, diferença denominada sucção.

Desta forma, em um perfil natural a camada de solo próxima à superfície, localizada acima do nível do lençol freático, estará sujeita a possível redução do grau de saturação, e consequentemente, apresentando variação da sucção atuante (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012). Para avaliar a sucção do solo é possível empregar métodos indiretos, como a obtenção da curva característica de água no solo, através de resultados do Método Padrão do Papel Filtro (ASTM D5298-16).

De acordo com Bastos (1999) a erodibilidade de um solo pode ser influenciada pela sua estrutura interna, capacidade de infiltração e sucção atuante, que está relacionada à quantidade de água presente nos poros do solo. Neste aspecto, alguns pesquisadores avaliaram a influência do grau de saturação na erodibilidade de solos tropicais e observaram que as perdas de solo variam de acordo com o aumento ou diminuição do seu teor de umidade (Bandeira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2020; Almeida, 2014; Menezes e Pejon, 2010).

Neste contexto, a pesquisa buscou avaliar o potencial erosivo de um solo argiloso compactado pertencente a unidade sedimentar Formação Guabirotuba, sendo relacionado o parâmetro de erodibilidade à sucção. Com esse propósito, realizaram-se ensaios para construção da curva característica de água no solo, relacionada à sucção, e de Inderbitzen para determinar a erodibilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência da sucção na erodibilidade de um solo argiloso compactado da Formação Guabirotuba.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral do trabalho serão seguidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar as perdas de solo das amostras compactadas em graus de saturação de 20%, 50%, 91,08%, 93,49% e 95,60%, e massas específicas aparentes secas de 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³;
- Correlacionar os valores de taxa de erodibilidade (K) do solo compactado nos graus de saturação de 20%, 50%, 91,08%, 93,49% e 95,60%, e

massas específicas aparentes secas de 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³; à respectiva faixa de sucção atuante.

1.2 Justificativa

A erosão é um processo de intemperismo natural que impacta a esfera ambiental e socioeconômica em várias regiões do planeta, tendo suas perdas intensificadas quando o processo é acelerado pela ação antrópica (PASCOTO, FUREGATTI e PEIXOTO, 2022). Como consequência, ocorrem os problemas ambientais, pela destruição de fauna e flora, e socioeconômicos, devido a perdas de vidas humanas e danos à infraestrutura urbana (MASCARENHA *et al.*, 2015).

O estudo técnico da Confederação Nacional dos Municípios (CNM, 2022), cujo dados foram coletados do Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres do Ministério do Desenvolvimento Regional (S2ID/MDR), reportam os danos informados pelos Municípios entre 1º de janeiro de 2013 a 05 de abril de 2022, com abrangência de 93% das cidades brasileiras. Neste levantamento, cerca de 4,2% do total de decretações de desastres estão relacionadas a enxurradas.

Na zona urbana a erosão linear é responsável pela alteração do escoamento superficial, que potencializa a formação de ravinas e voçorocas, interferindo na geometria (declividade e topografia) local. Essa alteração de declividades pode impactar diretamente na estabilidade de obras de infraestrutura urbana, como rodovias, aterros e contenções (PASCOTO, FUREGATTI e PEIXOTO, 2022).

A falta de investigação das propriedades de erosão de um solo compromete o bom desempenho da obra, visto que pode ocorrer o subdimensionamento, devido à implantação de materiais e técnicas que aumentem a probabilidade de ocorrência de desastres socioambientais. Silva (2021) reforça que a engenharia geotécnica pode contribuir para projetos sucedidos, quando alinhada ao uso de ferramentas de análise, estimativas de comportamento do solo e avaliação de processos geológicos.

Existem diversos tipos de solos em cada região do país, com distintas características geológicas e geotécnicas. Devido as diferentes propriedades, cada solo apresenta comportamento variado quando em contato com a água, impactando diretamente no processo de erosão. Entender o comportamento do solo frente à ação da água é fundamental para o dimensionamento e execução de projetos de engenharia, uma vez que isso potencializa a segurança socioambiental.

Desta forma, justifica-se o desenvolvimento da presente pesquisa, a partir da análise do comportamento de um solo frente à ação de erosão superficial simulada em laboratório. Assim, a compreensão do comportamento do solo fortalece a pesquisa científica em solos não saturados, que visa o desenvolvimento de projetos e execução de obras de engenharia melhor sucedidas.

1.3 Contextualização da pesquisa

No município de Curitiba e região metropolitana, existem estudos sobre solos da Formação Guabirota, que avaliam o comportamento mecânico frente à adição de materiais para melhoramento (MUÑOZ *et al.*, 2021; BALDOVINO *et al.*, 2018) e de variabilidade volumétrica (ALMEIDA *et al.*, 2022). Todavia, há poucos estudos relacionados as propriedades de infiltração (ALMEIDA, 2022), expansão (ALMEIDA *et al.*, 2022; PEREIRA, 2004) e erodibilidade (SILVA, 2021; CHAMECKI, 2002).

A inter-relação entre as propriedades de sucção e a erodibilidade é avaliada em solos oriundos de diferentes formações geológicas (CASTRO, 2020; ALMEIDA, 2014; BASTOS, 1999). Na região Sudeste, Castro (2020) verificou a influência da sucção na erosão de solos coletados na borda do reservatório da usina hidrelétrica de Itumbiara/Rio Paranaíba. Já em Goiânia/GO, Almeida (2014) avaliou o impacto da variação do grau de saturação na erodibilidade de um Cambissolo e Latossolo. Na região Sul, Bastos (1999) determinou a erodibilidade de solos residuais tropicais e subtropicais não saturados a partir de quatro perfis envolvidos em processos erosivos na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

Já em solos da Formação Guabirota, coletados no município de Curitiba/PR, Silva (2021) verificou a erosão de canais de drenagem urbana através de ensaios Inderbitzen e Chamecki (2002), variando o grau de saturação de amostras de solo para avaliar a influência da sucção no parâmetro de erodibilidade. Os resultados das pesquisas corroboram com o levantamento de Felipe (2011).

Na esfera internacional, pesquisadores como Liu *et al.* (2022) avaliaram a influência do campo elétrico na erodibilidade de solo do planalto de Loess na China. Na pesquisa foi empregado equipamento semelhante ao desenvolvido por Inderbitzen (1961). Entretanto, é comum o uso de ferramentas como levantamento de dados de literatura e de modelos matemáticos para previsão do parâmetro de erodibilidade, observado em Quian *et al.* (2022), Romshoo *et al.* (2021) e Khan e Rahman (2021).

As pesquisas de Castro (2020), Almeida (2014), Chamecki (2002) e Bastos (2000) referem-se à avaliação das propriedades de sucção e erodibilidade de diferentes solos do Brasil, em que constataam a relação entre as propriedades avaliadas. Sendo assim, esta pesquisa buscou avaliar as propriedades de sucção e erodibilidade de um solo da Formação Guabirotuba.

1.4 Delimitação da pesquisa

A etapa experimental da presente pesquisa foi realizada nos anos de 2022 e 2023, no laboratório de geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O solo empregado é argiloso da Formação Guabirotuba, coletado no município de Curitiba/PR.

A curva característica de água no solo, para medida indireta de sucção, foi obtida a partir do Método Padrão do Papel Filtro (ASTM D5298-16). As amostras ensaiadas foram moldadas com massa específica aparente seca máxima, obtida nas energias normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM).

Na avaliação direta da erodibilidade do solo foi empregado o ensaio de Inderbitzen, em que se fixou a vazão, tempo e rugosidade (calha). Para moldagem dos corpos de prova foram empregadas as massas específicas aparentes secas máximas obtidas nos ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada.

Para o ensaio de Inderbitzen foi necessária a construção prévia do equipamento, visto que o mesmo não estava disponível no laboratório de geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Adaptações ao projeto de Silva (2021) foram realizadas e a concepção final mostrou-se apta para obtenção dos resultados de erodibilidade do solo em estudo.

O planejamento experimental elaborado passou por ajustes ao longo do desenvolvimento da pesquisa, de maneira a incorporar e resolver todas as adversidades que surgiram nas etapas experimentais. Assim, foi possível avaliar as propriedades de sucção e erodibilidade do solo, frente ao planejamento proposto.

1.5 Estrutura do trabalho

Capítulo 1 trata da introdução, que abrange os objetivos, a justificativa, a contextualização e a delimitação da pesquisa.

Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que fundamentou a pesquisa.

Capítulo 3 mostra os materiais e métodos adotados no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados.

Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os tópicos sobre a Formação Guabirotuba; solos não saturados; os principais processos e fenômenos erosivos em solos, parâmetro de erodibilidade e os principais ensaios para sua obtenção; e a inter-relação entre a erodibilidade e sucção.

2.1 Formação geológica Guabirotuba

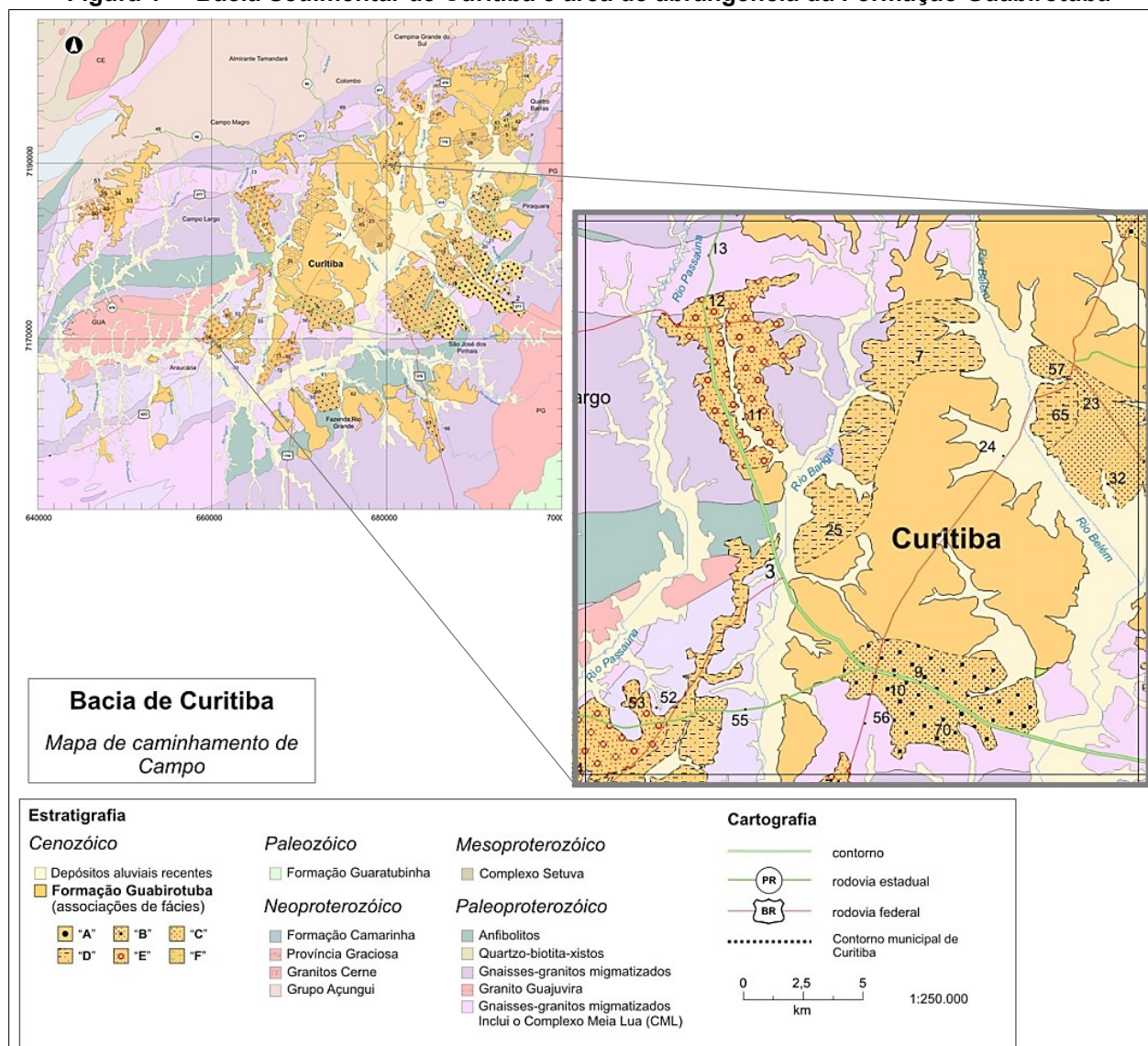
2.1.1 Características geológicas

Do ponto de vista geológico, grande parte do município de Curitiba e região metropolitana estão inseridos na Bacia Sedimentar de Curitiba (Figura 1), abrangendo uma área de aproximadamente 3000 km² (SALAMUNI *et al.*, 2013; KORMANN, 2002). Salamuni, Salamuni e Ebert (1999) retratam que a bacia sedimentar de Curitiba é composta por distintas unidades litoestratigráficas, que são representadas pelo embasamento cristalino (gnaisse, quartzito, quartzo-xisto, micaxisto, anfibolito, gnaisse-granito e granulito) e camadas sedimentares (depósitos de argilitos com lentes arenosas, arcósios e bolsões rudáceos da Formação Guabirotuba; depósitos de cascalhos e sedimentos imaturos da Formação Tinguis; e depósitos holocênicos coluvionares e aluvionares).

A Formação Guabirotuba (Figura 1) é a principal unidade sedimentar da Bacia de Curitiba, com camadas sedimentares que podem atingir espessuras de 60 a 80 metros (FELIPE, 2011).

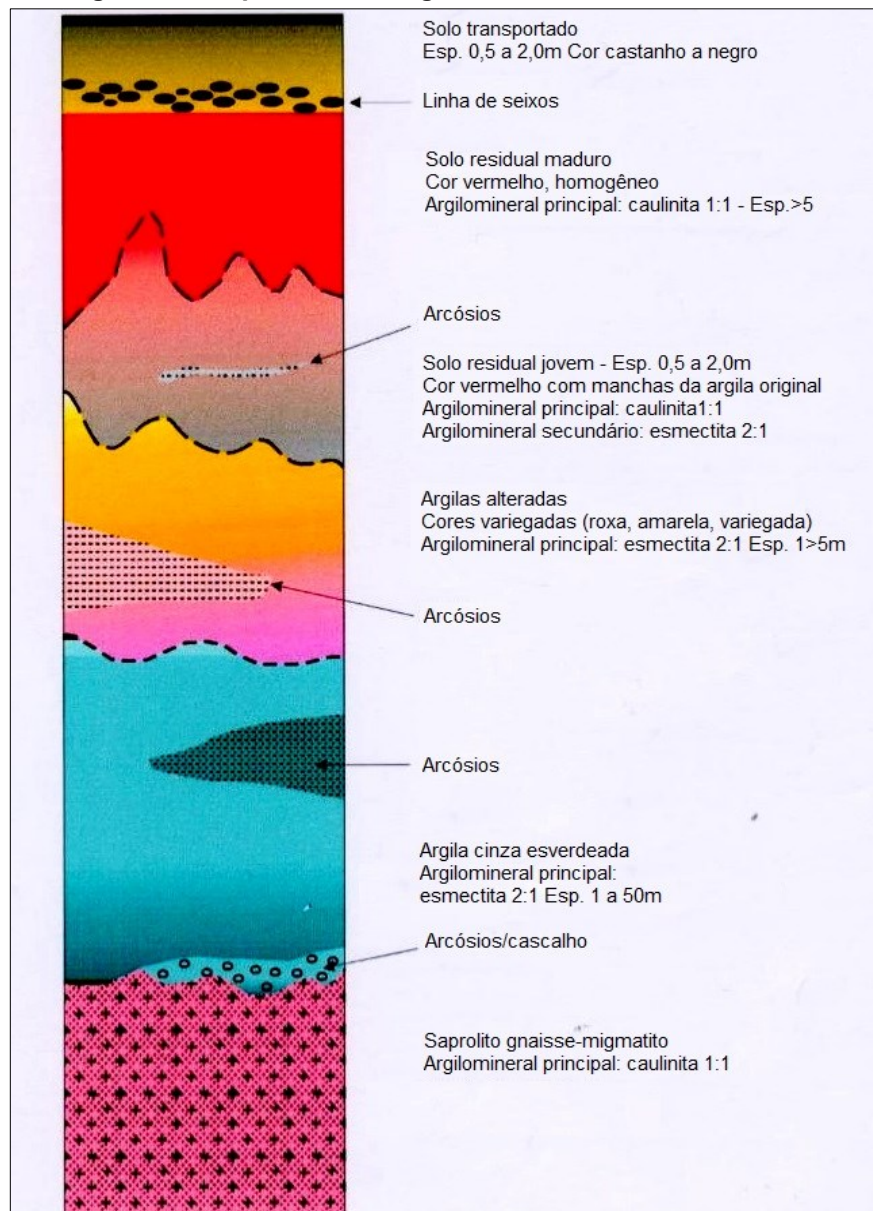
Salamuni, Salamuni e Ebert (1999) categorizam os sedimentos da Formação Guabirotuba em quatro tipos litológicos, sendo: argilas inconsolidadas e depósitos de lamais; depósitos carbonáticos (caliches); depósitos arcossianos e areias arcossianas; e depósitos rudáceos (cascalheiras). O principal grupo litofaciológico da Formação Guabirotuba é constituído por argilas, que se situam nas camadas superficiais do perfil estratigráfico e podem apresentar alterações do tipo laterização (KORMANN, 2002). Na Figura 2 é apresentado o perfil típico de alteração da Formação Guabirotuba.

Figura 1 – Bacia Sedimentar de Curitiba e área de abrangência da Formação Guabirotuba



Fonte: Adaptado de Lima (2010)

Figura 2 – Sequências litológicas da Formação Guabirotuba



Fonte: Adaptado de Felipe (2011)

O perfil típico da Formação Guabirotuba (Figura 2) estabelecido por Felipe (2011), possui como primeira camada um solo transportado de classificação argilo-arenosa e de baixa resistência à penetração. Abaixo da primeira camada, ocorre uma linha de seixos de quartzos subangulosos e com granulometria variada, seguida de uma camada constituída por um solo maduro homogêneo e de coloração avermelhada. Posteriormente, ocorrem as argilas alteradas de cor variegada, seguida por argila de cor cinza esverdeada, que pode conter grãos de quartzo e feldspato alterado, e depósitos de arcósios. As camadas de base se constituem por arcósios e

cascalhos, que geralmente estão em contato com os saprólitos dos gnaisses-migmatitos, de coloração avermelhada à cinza esbranquiçada.

2.1.2 Erosão e causas associadas na Formação Guabirotuba

Os materiais da Formação Guabirotuba em condições de equilíbrio na natureza, cobertos pelas camadas de solo residuais e transportados e com umidade natural, não apresentam instabilidades. Devido as ações antrópicas ocorrem movimentações dessas massas de coberturas, seja por obras rodoviárias, loteamentos ou para extração de material de empréstimo, que podem gerar processos de instabilidades das camadas de argila (FELIPE, 2011).

No levantamento de Felipe (2011), observa-se que as argilas alteradas e cinza esverdeadas apresentam características de expansibilidade e retração, que conferem alta erodibilidade desses solos. Essa alteração de volume pode ser causada pela combinação de vários mecanismos, podendo ser mecânicos e/ou físico-químicos (PEREIRA, 2004; TAYLOR e SMITH, 1986).

Kormann (2002) nas suas investigações de campo e laboratório verifica que algumas argilas da Formação Guabirotuba possuem argilominerais do grupo das esmectitas, que apresentam alta suscetibilidade ao comportamento expansivo. Pereira (2004) também aponta em sua pesquisa que o tipo e concentração do argilomineral presente influencia diretamente na alteração volumétrica do solo.

O perfil argiloso da Formação Guabirotuba quando exposto a atmosfera por interferência antrópica, perde água e passa pela etapa de retração, desenvolvendo trincas e empastilhamento, como apresentado na Figura 3. Nos períodos de chuva, quando o perfil em processo de retração entra em contato com a água, a argila reidrata e passa pela etapa de expansão, que contribui para a desagregação das partículas. Desta forma, durante o escoamento superficial, as partículas em processo de expansão são facilmente transportadas e podem resultar em erosões laminares, em ravinas e até mesmo evolução para voçorocas (FELIPE, 2011).

Figura 3 – Aspecto de empastilhamento pelo processo de retração em perfil da Formação Guabirotuba



Fonte: Felipe (2011)

Felipe (2011) aponta que o destacamento das partículas de solo ocorre mais por absorção da água da chuva, do que pela ação do impacto direto da gota de chuva. Além disso, também elenca que quanto maior for a declividade e extensão do perfil, maior é o escoamento concentrado e a energia erosiva da água. Desta forma, o transporte de partículas é mais acelerado e resulta em processos de sulcos e ravinas, que podem atingir grandes proporções, caso não sejam tomadas medidas mitigadoras.

2.2 Solos não saturados

2.2.1 Sucção

A Mecânica dos Solos pode ser subdividida na análise de solos saturados e de solos não saturados. Em um perfil geotécnico, o solo próximo à superfície, situado acima do lençol freático, estará na condição não saturada, enquanto àquele que está abaixo estará em condição saturada (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012). Em regiões de clima tropical, a camada não saturada do perfil do solo situada entre a superfície terrestre e a zona freática é denominada zona ativa (MASCARENHA *et al.*, 2015).

Na condição saturada, o solo é constituído por um sistema de duas fases: líquida e sólida. Nessa condição, o comportamento do solo pode ser observado através do princípio das tensões efetivas (TERZAGHI, 1943). Já na condição não saturada, o solo apresenta outra fase, a gasosa, que exige outra abordagem para análise do comportamento do solo (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012).

A análise do comportamento do solo não saturado requer a compreensão da liberação, distribuição e retenção da água presente na estrutura do solo, em situações de ordem mecânica e ambiental nas quais o material pode estar sujeito. Seja pela natureza mecânica, como alteração do estado de tensão, e/ou ambiental, como a evaporação, a água no solo poderá mover-se para o interior ou exterior, conforme as condições impostas (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

Os solos não saturados possuem três fases: sólida, líquida e gasosa, representadas, respectivamente, pelas partículas sólidas, água e ar. Fredlund e Morgenstern (1977) elencam uma quarta fase no sistema, que é representada pela interface água e ar, denominada como pele contrátil. No sistema não saturado, a água presente nos poros possui pressão negativa em relação a pressão do ar nos poros (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A água presente nos poros de solos não saturados está sujeita a diversos potenciais físicos e químicos (GITIRANA JR., MARINHO e SOTO, 2015). A sucção é a grandeza comumente empregada para representar o estado de energia da água presente na estrutura de um solo não saturado (MACHADO e VILAR, 2015).

A sucção total, que representa a energia livre da água no solo, normalmente possui duas componentes: a matricial e osmótica. Esta relação pode ser representada pela Equação 1 (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

$$\psi_{total} = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

Onde: ψ_{total} = Sucção total; $(u_a - u_w)$ = Sucção matricial; u_a = Pressão do ar nos poros; u_w = Pressão da água nos poros; e π = Sucção osmótica.

2.2.1.1 Sucção matricial

Nos solos não saturados a pele contrátil (interface água e ar) está sujeita a uma pressão de ar (u_a), que é menor do que a pressão de água (u_w). A diferença entre

as pressões atuantes nos poros ($u_a - u_w$) é referida como sucção matricial (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Durante a etapa de secagem ou drenagem, a água presente nos interstícios passa a sofrer processos de interação com a estrutura do solo, que faz com que sua energia interna seja reduzida. Nessa interação, as partículas sólidas tendem a atrair a água intersticial, devido a processos capilares e de adsorção, que podem diminuir a pressão e agitação das moléculas de água. O efeito dos fenômenos de capilaridade e de adsorção sobre a energia livre da água na estrutura do solo, corresponde ao potencial matricial da água no solo (MACHADO e VILAR, 2015; LIMA, ZORNBERG e PALMEIRA, 2015).

A seguir apresentam-se os fenômenos de capilaridade e de adsorção que são elencados na literatura (TERZAGHI, 1943; FREDLUND e RAHARDJO, 1993; MACHADO e VILAR, 2015; GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

- Capilaridade:

O fenômeno da capilaridade possibilita que a água em solos de granulometria fina tenha capacidade de se elevar a um nível considerável acima do lençol freático. Esse fenômeno ocorre devido a existência de uma força que compensa o peso da água localizada acima do lençol freático, que é denominada força capilar. Os efeitos mecânicos da força capilar podem ser calculados com base na suposição de que o ponto geométrico de atuação dessa força é a linha ao longo da qual a água, o ar e a partícula sólida se encontram (TERZAGHI, 1943).

A sucção atuante devido a interação entre as partículas sólidas e a água, por capilaridade, será maior quanto menor for o diâmetro dos poros do solo. Em virtude disso, durante o processo de secagem a água é inicialmente drenada dos poros maiores e posteriormente é drenada dos poros menores. Essa extração progressiva da água intersticial ocorre à medida que uma maior energia é aplicada ao sistema (MACHADO e VILAR, 2015).

- Adsorção:

O fenômeno de adsorção é considerado pelos distintos tipos de interação que ocorrem entre o adsorvente e o adsorvido, que se classifica em físico e químico. A adsorção física é resultado de alguns tipos de interação molecular fraca como a de Van der Waals e não possui transferência de elétrons. Enquanto a adsorção química envolve um rearranjo de elétrons entre as moléculas do adsorvido e do adsorvente, que resulta em uma ligação química (MACHADO e ZUQUETE, 2005).

A polaridade da água desempenha papel essencial nos processos de interação entre sólidos e líquido intersticial, com influência direta no fenômeno de adsorção. Desta forma, pode ser explicado a orientação e atração das moléculas de água, por meio de seus polos positivos, à superfície negativa de partículas de argila (MACHADO e VILAR, 2015).

2.2.1.2 Sucção osmótica

A sucção osmótica depende da concentração química da água nos poros do solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Devido ao gradiente de energia, a água tende a migrar da região de menor concentração para a de maior concentração de sais, até o estabelecimento de uma condição de equilíbrio energético. Condição na qual o desnível entre as colunas de água seja equivalente à diferença de sucção osmótica entre as duas regiões de concentração (MACHADO e VILAR, 2015).

A sucção osmótica pode ser considerada constante, quando são tratados de problemas de pequena amplitude de variação de umidade. Entretanto, podem ocorrer variações na sucção osmótica quando envolvem problemas de contaminação de solos ou variações significativas do teor de umidade, pela evaporação de água (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

2.2.2 Curva característica de água no solo

A curva característica de água no solo (CCAS) representa a relação entre o teor de umidade ou grau de saturação e a sucção do solo, ou seja, a quantidade de água presente nos poros e o seu estado de energia. Essa curva emprega o modelo elementar capilar para fornecer uma compreensão da distribuição da água nos poros do solo, e estima a capacidade do solo em reter água (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012).

Os processos em solos não saturados podem, em parte, ser analisados em função da curva característica, além da previsão de propriedades como a função de permeabilidade e até resistência ao cisalhamento (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

A curva característica é fundamental para determinação das propriedades de solos não saturados, sendo considerada um parâmetro chave na implantação da

Mecânica dos Solos não saturados nas práticas de engenharia (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012; FREDLUND, 2006). Gitirana Jr, Marinho e Soto (2015) retratam a importância da curva característica de água no solo e da sua complexidade de interpretação e aplicação, devido a certa quantidade de fatores que influenciam a forma da curva.

Os índices físicos dos solos são empregados para avaliar o comportamento mecânico e hidráulico dos solos. A relação entre índices físicos permite a interpretação de ensaios de resistência, compressibilidade, condutividade e retenção de água nos solos. Os índices físicos utilizados na representação da curva característica de água no solo são: teor de umidade gravimétrico, grau de saturação e teor de umidade volumétrico, apresentados abaixo (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

- Teor de umidade gravimétrico:

Representa a relação entre a massa de água e a massa de sólidos, apresentada na Equação 2.

$$w = \frac{V_w \rho_w}{V_s \rho_s} = \frac{M_w}{M_s} \quad (2)$$

Onde: w = umidade gravimétrica; V_w = volume de água; ρ_w = massa específica da água; V_s = volume de sólidos; ρ_s = massa específica dos sólidos; M_w = massa de água; e M_s = massa de sólidos.

- Teor de umidade volumétrico:

Representa a relação entre o volume de água e o volume total do solo, apresentada na Equação 3.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (3)$$

Onde: θ = umidade volumétrica; V_w = volume de água; e V_t = volume total.

O teor de umidade volumétrico é empregado na obtenção das curvas características e nos modelos de previsão da permeabilidade de solos no estado não saturado. Além disso, o teor de umidade volumétrico é comumente empregado nas análises de percolação em meios não saturados (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

- Grau de saturação:

Representa o percentual de ocupação do volume de vazios pela água, calculado pela Equação 4.

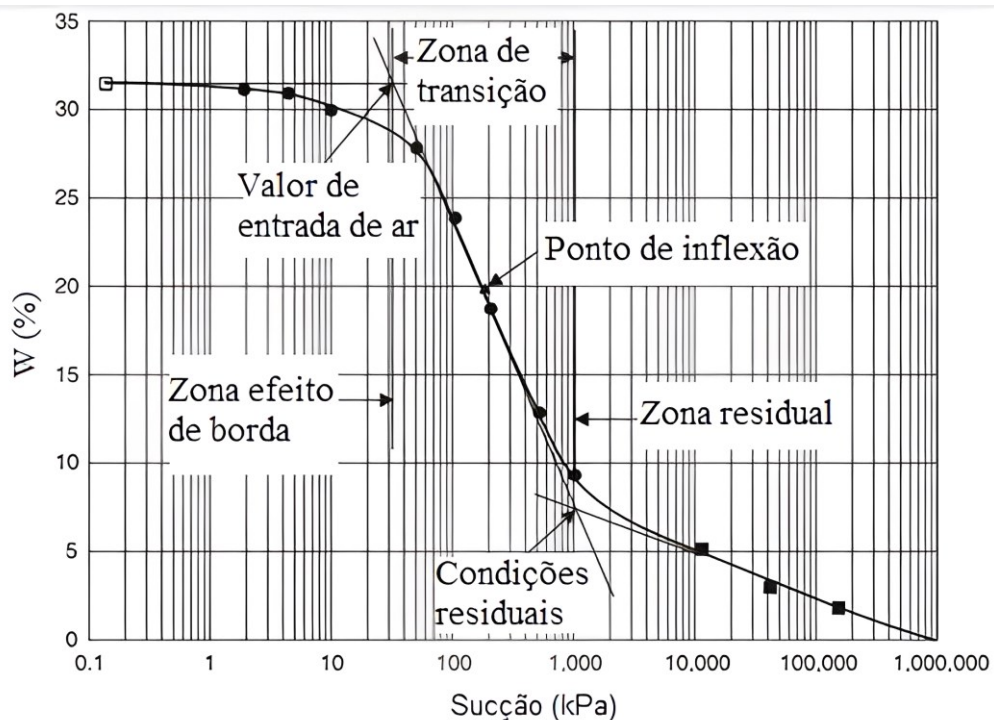
$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{V_w}{V_v} \quad (4)$$

Onde: S = grau de saturação; V_w = volume de água; V_a = volume de ar; e V_v = volume de vazios do solo.

O grau de saturação é essencial na obtenção do valor de entrada de ar na curva característica e é também usual para a previsão da permeabilidade de solos não saturados (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

A curva característica, definida a partir dos parâmetros físicos do solo em análise, apresenta diferentes formatos. A curva característica em geral pode ser interpretada em três trechos: zona de efeito de borda, zona de transição, e zona residual, apresentada na Figura 4 (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012).

Figura 4 – Curva característica de água no solo



Fonte: Adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)

Conforme ilustrado na Figura 4, após a entrada de ar ocorre a diminuição do grau de saturação do solo, que durante a zona de transição aproxima-se de uma

relação linear, e após essa transição, passa a apresentar as condições residuais de saturação e respectivos valores de sucção atuantes.

A zona de efeito de borda, primeiro trecho, corresponde ao intervalo de sucção atuante no qual o solo encontra-se completamente saturado (fase água contínua). Este intervalo estende-se até um valor de sucção, que se denomina valor de entrada de ar. O valor de entrada de ar corresponde ao valor máximo de sucção que os poros do solo são capazes de reter águam sem serem drenados (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

A zona de transição, segundo trecho, a fase ar passa a ser contínua e ocorre a drenagem progressiva da água dos poros sob o efeito do aumento da sucção. A drenagem é possível devido a condição livre da água nos poros do solo, que ocorre em termos de fluxo líquido.

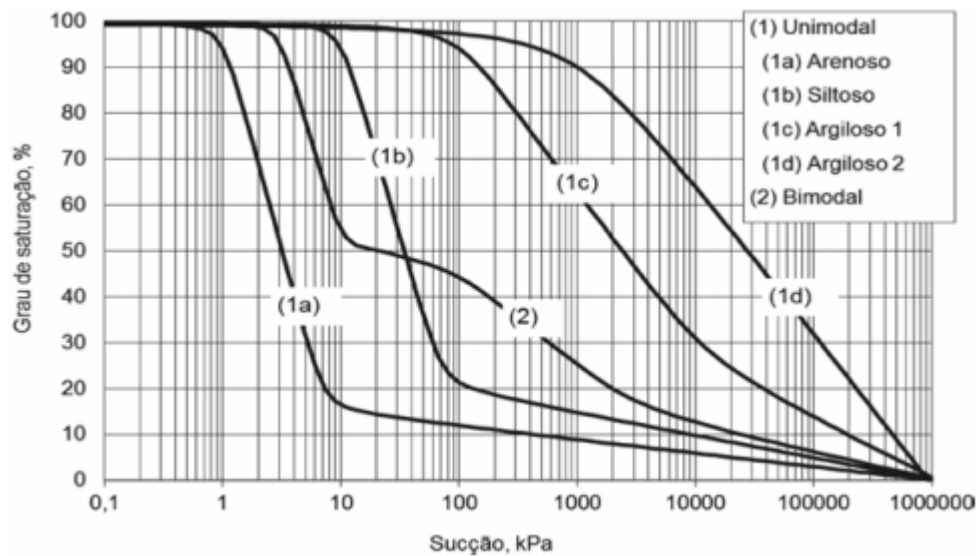
A zona residual, terceiro trecho, inicia a partir de um grau de saturação e valor de sucção residual. Nesse intervalo a fase água passa a ser descontínua. Além disso, a remoção de água dos poros exige sucções expressivas, e ocorre por processos de transferência de vapor (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

O valor de entrada de ar é obtido graficamente com a extensão do segmento linear de CCSA até a intersecção da linha horizontal correspondente à saturação de 100%. Já o teor de umidade residual é estimado a partir do prolongamento da reta correspondente ao trecho linear até interceptar a reta ajustada aos pontos de altos valores de sucção (FEUERHARMEL, 2007).

A curva característica de água no solo pode descrever o comportamento do solo frente a um processo de umedecimento ou um processo de secagem. A distinção entre curvas características, construídas por processo de secagem e de umedecimento, é necessária para compreender a histerese que pode ocorrer entre os dois ramos das curvas. Normalmente, durante o processo de secagem o solo tende a reter mais água do que em um processo de umedecimento, para um mesmo valor de sucção (LU e LIKOS, 2004).

Os solos com diferentes distribuições granulométricas, texturas e tamanho de poros apresentam distintas curvas características (GITIRANA JR e FREDLUND, 2004), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de curva característica de água no solo



Fonte: Gitirana Jr, Marinho e Soto (2015)

Como apresentado na Figura 5 as famílias de curvas típicas de diferentes solos dividem-se em dois grupos: unimodal e bimodal.

As curvas unimodais apresentam um único trecho de dessaturação e, por consequência, apenas um valor de entrada de ar (GITIRANA JR e FREDLUND, 2004). O formato da curva unimodal é em sino único, denominação dada devido a semelhança aos formatos de distribuições de frequência unimodais. A partir da função derivada da curva característica é possível analisar a distribuição de frequências de tamanho de poros do solo (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

O formato bimodal da curva característica é associado a distribuição heterogênea de poros do solo. Neste caso, esse formato de curva apresenta dois trechos de dessaturação e, consequentemente, dois valores de entrada de ar, sendo o primeiro correspondente à família de poros maiores (macroporos) e o segundo à família de poros menores (microporos) (GITIRANA JR e FREDLUND, 2004).

Solos tropicais comumente apresentam curvas características do tipo bimodal, que podem ser resultado de distribuições granulométricas descontínuas, ou da presença de estrutura de poros heterogêneas originadas pelo processo de intemperismo com predominância de lixiviamento do solo (CAMAPUM DE CARVALHO e GITIRANA JR, 2021; GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015).

2.2.2.1 Ensaio para construção das curvas características

Para construção da curva característica de água no solo existem métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos indiretos está o Método Padrão do Papel Filtro, que é normatizado pela ASTM D5298-16 (ASTM, 2016) e entre os métodos diretos está o ensaio através do equipamento Fredlund-SWCC (modelo SWC-150 da GCTS Testing Systems).

- Método Padrão do Papel Filtro:

De acordo com a D5298-16 (ASTM, 2016) o principal objetivo do ensaio é avaliar o potencial matricial e total (sucção) do solo através do uso de papéis filtro como sensores passivos. Ainda, define que sucção se caracteriza como a medida da energia livre da água dos poros ou estado de energia da água do solo.

A técnica consiste em colocar uma amostra de solo, indeformada ou remoldada, em um ambiente hermeticamente fechado, juntamente com um papel filtro específico até que seja estabelecido o equilíbrio de umidade entre eles. O valor de sucção é determinado a partir de curvas de calibração, que correlacionam a umidade do papel filtro (w_{pf}) (BASTOS, 2000).

A D5298-16 (ASTM, 2016) apresenta duas equações de calibração para o papel filtro Whatman nº42, considerando o teor de 45,3% como referência de utilização de cada equação.

Para teor de umidade superior a 45,3% deve ser utilizada a Equação (5):

$$\psi = 2,412 - 0,0135w_{pf} \quad (5)$$

Onde: ψ = sucção do solo; e w_{pf} = teor de umidade do papel filtro.

Já para teor de umidade inferior a 45,3% deve ser utilizada a Equação (6):

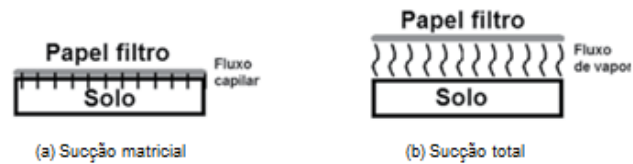
$$\psi = 5,327 - 0,0779w_{pf} \quad (6)$$

Onde: ψ = sucção do solo; e w_{pf} = teor de umidade do papel filtro.

O método, além de ser simples, oferece uma economia em sua execução, e pode medir faixas de sucção de 10 a 10^5 kPa. Entretanto, deve se ter cuidado na realização do ensaio, e sempre reduzir erros de execução (MARINHO, SOTO e GITIRANA JR, 2015).

Na Figura 6 são visualizadas as configurações que podem ser empregadas nas medições de sucção total e matricial.

Figura 6 – Tipos de medição de sucção: (a) com contato e (b) sem contato



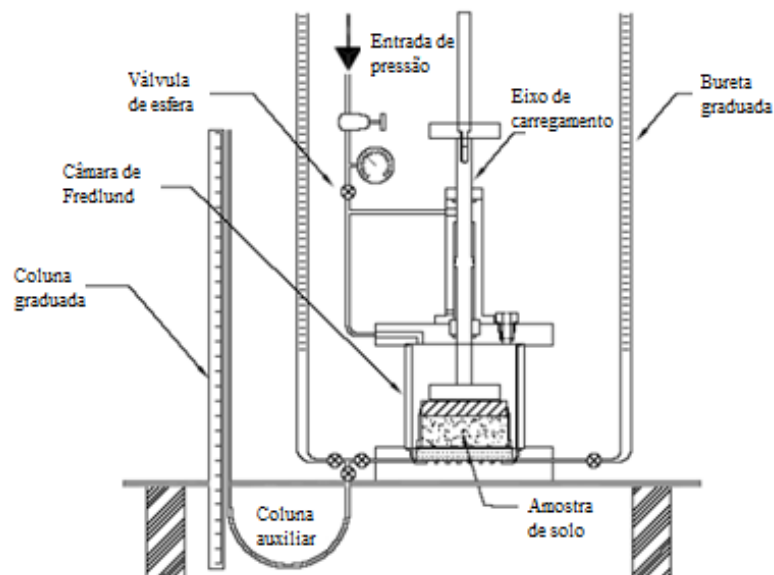
Fonte: Adaptado de Gitirana Jr., Marinho e Soto (2015)

A sucção matricial é medida através do contato direto entre o solo e o papel filtro, permitindo que o fluxo ocorra por capilaridade até que o equilíbrio de umidade seja alcançado (Figura 6a). Enquanto a sucção total é obtida sem contato entre o solo e o papel, situação em que o fluxo ocorre na forma de vapor, sendo vencidas as forças osmóticas e capilares de retenção da água, Figura 6b (MARINHO, SOTO e GITIRANA JR, 2015).

- Ensaio com equipamento Fredlund-SWCC (modelo SWC-150 da GCTS Testing Systems):

O equipamento Fredlund-SWCC (Figura 7), permite a obtenção da curva característica de solos não saturados através da aplicação de sucções matriciais, enquanto percorre vários caminhos de tensão (GCTS, 2007).

Figura 7 – Equipamento Fredlund-SWCC (modelo SWC-150)



Fonte: Adaptado de GCTS (2007)

O equipamento Fredlund-SWCC (Figura 7) empregado para determinar a curva característica do solo, permite que sejam controladas as sucções matriciais, em

faixa de zero até 1500 kPa, impostas às amostras de solo com diâmetros de até 75 mm. A câmara de Fredlund-SWCC é constituída por aço inoxidável e possui aberturas para conexão de válvulas e encanamentos para fluxo de água e de ar comprimido. O aparelho permite o uso de uma única amostra de solo por ensaio (GCTS, 2007).

O método de determinação da curva característica através do equipamento Fredlund-SWCC emprega o conceito de translação de eixo (AYALEW, 2013). Essa técnica tem como base o controle da diferença entre a pressão do ar e da água nos poros, além da determinação do teor de umidade correspondente ao equilíbrio do solo com a sucção matricial aplicada (LU e LIKOS, 2004).

A técnica tem como prática elevar a pressão do ar dos poros, mantendo a pressão da água dos poros constante à um valor de referência, baseado na pressão determinada em poros saturados de uma pedra porosa (LU e LIKOS, 2004). Desta forma, com a pressão da água dos poros mantida constante e a pressão do ar dos poros gradativamente aumentada, existe um controle direto da sucção matricial ($u_a - u_w$) (AYALEW, 2013).

O equipamento Fredlund-SWCC mostra-se eficaz na obtenção da curva característica de água no solo e possibilita a sua construção através de processo de umedecimento e de secagem (ZAMIN *et al.*, 2022; AYALEW, 2013; RAMIREZ, 2013; ZHANG *et al.*, 2010; FREDLUND, 2006).

2.2.2.2 Modelos matemáticos para ajuste da curva característica

A curva característica é representada com uso de modelos matemáticos para ajuste dos dados obtidos experimentalmente (GITIRANA JR, MARINHO e SOTO, 2015). Na Tabela 1 estão listadas algumas equações propostas na literatura para representar a curva característica de água no solo.

Tabela 1- Modelos de ajuste para a curva característica		
Referência	Modelo	Parâmetros
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$ $m = 1 - 1/n$	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n, m, \psi$ Onde: θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; α é o parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar; n é o parâmetro que tem relação com a inclinação da curva; m é o parâmetro de ajuste relacionado ao teor de umidade residual; ψ é a sucção do solo.

Referência	Modelo	Parâmetros
		$\theta_r, \theta_s, a, n, m, \psi$
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m}$ $m = 1 - 1/n$	Onde: θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; a é o parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar; n é o parâmetro que tem relação com a inclinação da curva; m é o parâmetro de ajuste relacionado ao teor de umidade residual; ψ é a sucção do solo.
		$\theta_r, \theta_s, \sigma, \psi, \psi_m$
Kosugi (1996)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ Q \left[\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right] \right\}$ $Q(x) = \text{erfc}(x/\sqrt{2})/2$	Onde: θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; σ é um parâmetro de ajuste adimensional; ψ é a sucção do solo; ψ_m é a pressão capilar no ponto de inflexão da curva; $Q(x)$ é a função de distribuição normal complementar; erfc é a função complementar de erro.
		$\theta_s, \alpha_i, n_i, m_i, \psi, w_i$
Dual-Van Genutchen (SEKI, 2007)	$\theta = \theta_s \sum_{i=1}^k w_i [1 + (\alpha_i \psi)^{n_i}]^{-m_i}$ $(0 < w_i < 1, \sum w_i = 1)$ $m_i = 1 - 1/n_i$	Onde: θ_s é a umidade volumétrica saturada; α_i é o parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar; n_i é o parâmetro que tem relação com a inclinação da curva; m_i é o parâmetro de ajuste relacionado ao teor de umidade residual; ψ é a sucção do solo; w_i é o fator de ponderação para as subcurvas.
		$\theta_s, \sigma_i, \psi, \psi_{mi}, w_i$
Dual-Kosugi (SEKI, 2007)	$\theta = \theta_s \sum_{i=1}^k w_i Q \left[\frac{\ln(\psi/\psi_{mi})}{\sigma_i} \right]$ $(0 < w_i < 1, \sum w_i = 1)$ $Q(x) = \text{erfc}(x/\sqrt{2})/2$	Onde: θ_s é a umidade volumétrica saturada; σ_i é um parâmetro de ajuste adimensional; ψ é a sucção do solo; ψ_{mi} é a pressão capilar no ponto de inflexão da curva; w_i é o fator de ponderação para as subcurvas; $Q(x)$ é a função de distribuição normal complementar; erfc é a função complementar de erro.

Fonte: Autora (2023)

Dentre as equações apresentadas na Tabela 1, os modelos matemáticos desenvolvidos por Van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) possuem ampla aplicação em ajuste de curvas características de água no solo (CASTRO, SOARES e AGUIAR, 2022; ALBADRI, NOOR e ALHANI, 2021; ZHOU, REN e LI, 2021; EYO, NG'AMBI e ABBEY, 2020; AZMI *et al.*, 2019).

O modelo proposto por Kosugi (1996) assume que a distribuição de tamanho de poros do solo segue uma distribuição log-normal. Kosugi (1996) retrata que o modelo obtido pode ser utilizado nas análises de propriedades hidráulicas dos solos, como a condutividade hidráulica e o ajuste da curva característica.

As equações de Van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Kosugi (1996) são empregadas para o ajuste de curvas características unimodais. Junior, Marinho e Soto (2015) apontam que quanto mais parâmetros forem utilizados, melhor será o ajuste da equação. Contudo, o aumento da quantidade de parâmetros resulta em uma maior complexidade de análise da função.

Os modelos Dual-Van Genuchten e Dual-Kosugi para ajuste de curvas características bimodais foram propostos por Seki (2007), que se baseou no método estabelecido por Durner (1994). O método de Durner (1994) considera que a curva característica de um solo com estrutura de poros heterogênea pode ser representada através da superposição de curvas definidas para estrutura de poros homogênea.

Seki (2007) desenvolveu um programa SWRC Fit com interface Web para ajuste não linear de curvas características de água no solo. O SWRC Fit possibilita a seleção de modelos unimodais, como Van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994), Kosugi (1996), e bimodais Dual-Van Genuchten (SEKI, 2007) e Dual-Kosugi (SEKI, 2007).

O SWRC Fit permite que sejam realizados ajustes simultâneos, fornecendo os parâmetros calculados e as curvas ajustadas em gráficos. Desta forma, é possível comparar os resultados dos modelos selecionados e escolher o que fornece o melhor ajuste aos dados experimentais.

2.2.3 Condutividade hidráulica de solos não saturados

A água pode fluir através dos poros do solo devido a uma diferença de energia ou potencial entre dois pontos. A lei de Darcy descreve o fluxo de água através dos solos saturados pela relação direta entre a velocidade e o gradiente hidráulico (Equação 7) (ORÊNCIO, 2021).

$$v = k_{sat} \cdot i \quad (7)$$

Onde: v é a velocidade de descarga (cm/s); k_{sat} é o coeficiente de permeabilidade (cm/s); i é o gradiente hidráulico (cm/cm).

O gradiente hidráulico (i) representa a perda de carga (ΔH) da água pelo atrito viscoso com as partículas de solo ao longo de uma distância (L).

O coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (k_{sat}) expressa a proporcionalidade entre o gradiente (i) e a velocidade de descarga (v), sendo um indicativo da maior ou menor facilidade de percolação de um fluido através de um meio poroso. O coeficiente k_{sat} é dependente do índice de vazios, continuidade e distribuição dos poros do solo. Além disso, está relacionado com o peso específico e viscosidade do fluido em percolação (BICALHO, MACHADO e GERSCOVICH, 2015).

A determinação da condutividade hidráulica saturada pode ser realizada através de ensaios de laboratório, campo ou métodos indiretos (fórmulas empíricas). Os ensaios convencionais de laboratório empregam permeâmetros de parede rígida, que operam à carga constante (ABNT NBR 13292, 2021) ou variável (ABNT NBR 14545, 2021). Os ensaios de campo são realizados em cavas, poços, trincheiras, ou ainda associados a furos de sondagens de reconhecimento. O coeficiente de permeabilidade também pode ser obtido através do emprego de câmaras de compressão triaxial, que operam como permeâmetro de parede flexível (ORÊNCIO, 2021).

Nos solos saturados o coeficiente de permeabilidade (k_{sat}) depende da estrutura e distribuição dos poros de solo. Já em meio não saturado, além do índice de vazios, k_w depende também da quantidade de água presente nos poros (teor de umidade ou grau de saturação). Deste modo, a condutividade hidráulica pode ser expressa como função do índice de vazios, grau de saturação, teor de umidade gravimétrico e/ou volumétrico (Equações 8, 9, 10 e 11). Como a quantidade de água nos poros é diretamente relacionada à sucção, então k_w também pode ser descrita como função da sucção do solo (FREDLUND, 1981).

$$k_w = f(S_r, e) \quad (8)$$

$$k_w = f(w, e) \quad (9)$$

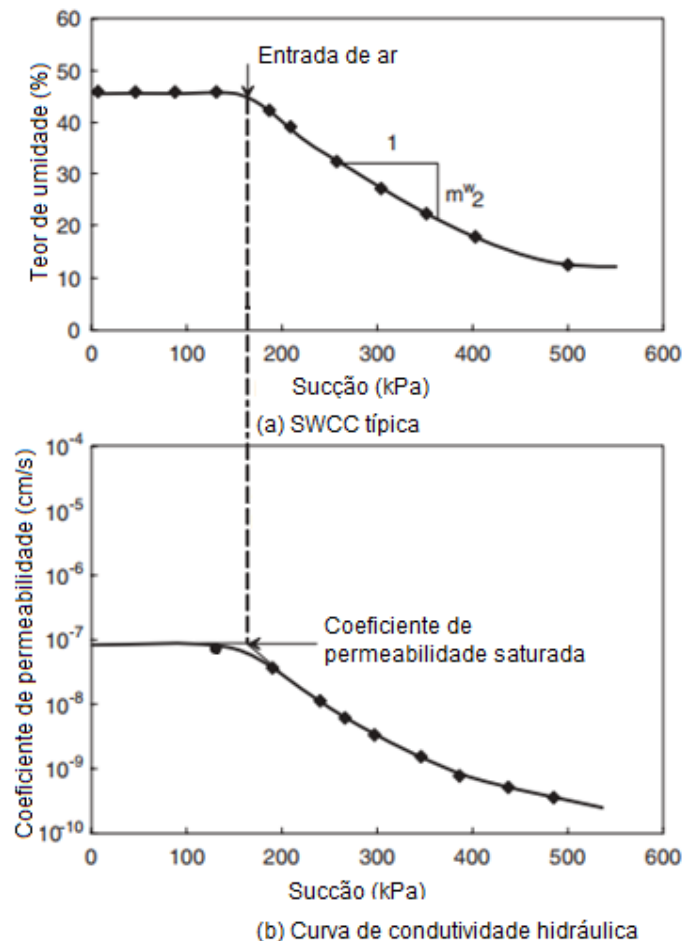
$$k_w = f(S_r, w) \quad (10)$$

$$k_w = f(\theta) \quad (11)$$

Onde: k_w é a condutividade hidráulica não saturada (cm/s); S_r é o grau de saturação; e é o índice de vazios; w é o teor de umidade gravimétrico; e θ é o teor de umidade volumétrico.

A curva de condutividade hidráulica representa graficamente a relação entre a condutividade hidráulica do solo não saturado e o correspondente conteúdo de água nos poros (grau de saturação ou teor de umidade volumétrica), ou ainda à sucção do solo (BICALHO, MACHADO e GERSCOVICH, 2015). Na Figura 8 é apresentada a relação entre a curva característica de água no solo e a função de condutividade hidráulica.

Figura 8 – Relação entre a SWCC e a curva de condutividade hidráulica



Fonte: Adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)

No trecho inicial (Figura 8), antes de atingir o VEA do solo, todos os vazios estão preenchidos por água, e a condutividade hidráulica se mantém equivalente a k_s . Após o VEA, quando a fase ar passa a ser contínua, a seção disponível para o fluxo de água tende a diminuir à medida que o ar ocupa os vazios do solo. Assim, a condutividade hidráulica tende a ser reduzida progressivamente com o aumento

gradativo da sucção. Nas condições residuais o fluxo de água ocorre essencialmente na forma de vapor, e assim a fase água passa a ser descontínua (FEUERHARMEL, 2007).

Gitirana Jr, Fredlund e Lima (2006) retratam que a fase ar pode fluir na forma de ar livre, quando dissolvido por água, ou também na condição de ar dissolvido transportado pela água em movimento. Já o fluxo da fase água pode ocorrer na forma de água no estado líquido, na forma de vapor em difusão por meio dos poros ocupados com ar, ou também no estado de vapor de água carregado pela fase ar em movimento.

A condutividade hidráulica também pode ser influenciada pelo tipo de solo, energia de compactação, índice de vazios, estado de tensões, gradiente hidráulico, líquido percolado, dentre outros. Em geral, os fatores que têm influência na forma da curva característica e coeficiente de permeabilidade saturada também influenciam na curva de condutividade hidráulica (VANAPALLI e LOBBEZOO, 2002).

2.2.3.1 Determinação da condutividade hidráulica

O coeficiente de condutividade hidráulica pode ser determinado através de métodos diretos (ensaios de laboratório ou campo) e indiretos (modelos matemáticos de ajuste ou previsão). A determinação experimental da condutividade na condição não saturada é mais complexa, uma vez que demanda equipamentos especiais e elevado tempo de execução (FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

Os modelos matemáticos propostos na literatura permitem que a curva de condutividade hidráulica seja estimada com mais facilidade e menor custo. Entretanto, a grande maioria das equações requerem dados experimentais do solo, como teor de umidade volumétrica saturada e residual, valor de entrada de ar, condutividade hidráulica saturada, e parâmetros de ajuste (BICALHO, MACHADO e GERSCOVICH, 2015). Na Tabela 2 são apresentadas alguns dos modelos propostos na literatura para estimar a curva de condutividade hidráulica.

Tabela 2- Modelos de ajuste para previsão da condutividade hidráulica

Referência	Modelo	Parâmetros
		$k_s, \theta, \theta_r, \theta_s, m$
Van Genuchten (1980)	$k_w(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2$	Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; θ é a umidade volumétrica; θ_r é a umidade volumétrica residual;

Referência	Modelo	Parâmetros
		θ_s é a umidade volumétrica saturada; m é o parâmetro de ajuste relacionado ao teor de umidade residual.
Fredlund e Xing (1994)	$k_w(\theta) = k_s \int_{\theta_r}^{\theta} \frac{\theta - x}{\psi^2(x)} dx \bigg/ \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta_s - x}{\psi^2(x)} dx$	$k_s, \theta, \theta_r, \theta_s, x, \psi$ Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; θ é a umidade volumétrica; θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; x é a variável fictícia de integração; ψ é a sucção do solo como função de θ .
Burdine (1953)	$k_w(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^2 \int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{[\psi^2(\theta)]} \bigg/ \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{[\psi^2(\theta)]}$	$k_s, \theta, \theta_r, \theta_s, \sigma, \psi$ Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; θ é a umidade volumétrica; θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; ψ é a sucção do solo.
Mualem (1976)	$k_w(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0,5} \left\{ \int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{[\psi(\theta)]} \bigg/ \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{[\psi(\theta)]} \right\}^2$	$k_s, \theta, \theta_r, \theta_s, \psi$ Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; θ é a umidade volumétrica; θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica saturada; ψ é a sucção do solo.
Gardner (1958)	$k_w = \frac{k_s}{1 + a \left(\frac{\psi}{\rho_w g} \right)^n}$	$k_s, \psi, a, n, \rho_w, g$ Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; ψ é a sucção do solo; a e n são parâmetros de ajuste; ρ_w é a densidade da água; g é a aceleração da gravidade.
Brooks e Corey (1964)	$k_w = k_s \left[\frac{\psi_{VEA}}{\psi} \right]^{2+3\lambda}$ $\psi > \psi_{VEA}$	$k_s, \psi, a, n, \rho_w, g$ Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada; ψ é a sucção do solo; ψ_{VEA} é a sucção de entrada de ar; a e n são parâmetros de ajuste; λ é o índice de distribuição de tamanho de poro.

Dentre as equações apresentadas na Tabela 2, as equações desenvolvidas por Gardner (1958) e Brooks (1964) reconhecem que há relação entre a curva característica e a função de permeabilidade e a utilizam de maneira empírica. Já os demais modelos (Tabela 2) são construídos a partir da curva característica e fazem suposições estatísticas da distribuição de poros do solo (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND, 2012).

2.3 Erosão de solos

2.3.1 Erosão

Bastos, Milititsky e Gehling (2001) definem a erosão como um conjunto de processos nos quais os materiais da crosta terrestre sofrem degradação, transporte e sedimentação por agentes erosivos, como os rios, mares, chuva, vento e geleiras. Esse processo natural pode ser acelerado quando a ação antrópica interfere nas condições de exposição do solo aos principais agentes erosivos (BASTOS, MILITITSKY e GEHLING, 2000; CAMAPUM DE CARVALHO e FÁCIO, 1994; PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013).

O processo de erosão pode ocorrer em duas fases, sendo elas o desprendimento das partículas individuais de solo e seu transporte por agentes erosivos, como a água da chuva. Caso a energia disponível não seja suficiente para o transporte de partículas, ocorre uma terceira fase, a deposição (MORGAN, 2005).

Os principais agentes erosivos são as águas de chuva, rios, mares, geleiras e vento. A ação desses agentes ocorre de maneira distinta em diversas regiões, resultando nos processos erosivos que dependem de fatores naturais como clima, origem geológica, geomorfologia e cobertura vegetal (PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013; OLIVEIRA e ARAÚJO, 2018).

Os agentes transportadores compreendem àqueles que agem e contribuem para a remoção de uma espessura uniforme de solo, e àqueles que concentram sua ação em canais. Além disso, aos agentes que atuam recolhendo e transportando partículas sobre a superfície do solo, deve ser somado o transporte causado por movimentações de massa como escoamentos de solo e deslizamentos, em que a água altera a resistência interna do solo (MORGAN, 2005).

De acordo com Zachar (1982), a erosão hídrica causada pela água pode ser subdividida em: erosão pluvial; erosão laminar; erosão linear; erosão fluvial; erosão lacustrina ou límica; erosão marinha.

A erosão pluvial causada pela água da chuva ocorre inicialmente pelo impacto das gotas sobre a superfície do solo e pelo escoamento superficial causado pela precipitação. O processo de desprendimento das partículas pela ação das gotas de chuva é chamado de salpicamento (*splach*). Esse processo também pode ocorrer em áreas planas, pois a energia erosiva da água é originada do movimento de queda e espalhamento das gotas de água pelo impacto sobre a superfície do solo (REZENDE *et al.*, 2017).

Já a erosão gerada pelo escoamento superficial é chamada de erosão superficial ou erosão laminar, e deve-se a ação da força trativa da água sobre o solo, no qual apresentará maior ou menor resistência em função da sua coesão e força de atrito entre as partículas (REZENDE *et al.*, 2017). Na erosão laminar o escoamento da água da chuva na superfície do solo ocorre como um todo, sem se concentrar em canais definidos (PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013). Na Figura 9 é possível observar essa forma de erosão.

Figura 9 – Erosão laminar na bacia de contribuição da UHE Batalha (GO/MG)



Fonte: Adaptado de Souza (2022)

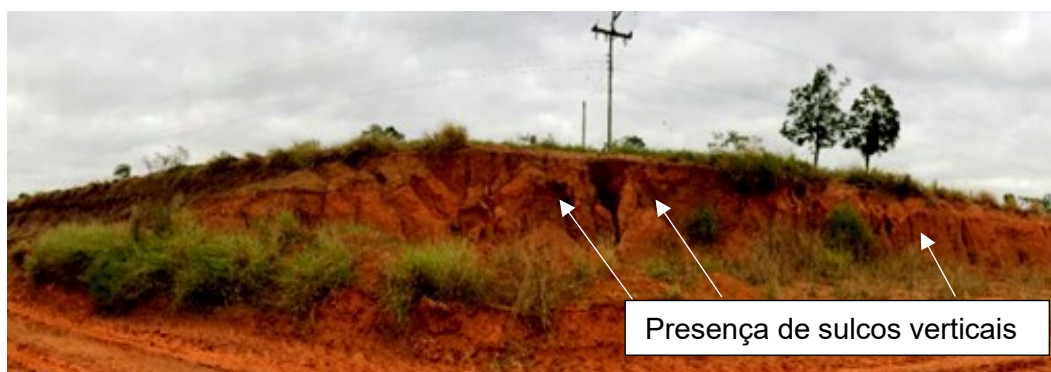
A erosão laminar observada na Figura 9 integra a pesquisa de Souza (2022), que buscou identificar e analisar os principais fatores condicionantes e deflagradores

de processos erosivos hídricos, situados na bacia de contribuição do reservatório da Usina Hidroelétrica Batalha (GO/MG).

A erosão linear ocorre devido ao fluxo concentrado de água através do solo, sendo classificada em: erosão em sulcos; erosão em ravinas; e voçorocas.

A erosão em sulcos ocorre quando o escoamento superficial de água se concentra em canais preferenciais dando origem aos sulcos, que são cavidades com profundidade de até 50 cm (Figura 10). A existência dos sulcos potencializa a energia erosiva da água, pela concentração do fluxo, que possibilita o aprofundamento e evolução desses canais para ravinas (REZENDE *et al.*, 2017).

Figura 10 – Erosão em sulcos no município Barra do Ribeiro (RS)



Fonte: Adaptado de Ziebel (2017)

Na Figura 10 pode ser observado um processo erosivo em sulcos com a tendência de evolução para erosão em ravinas. Essa forma de erosão foi classificada na pesquisa de Ziebell (2017), que classificou processos erosivos em taludes situados entre os municípios de São Lourenço do Sul/RS e Barra do Ribeiro/RS.

A erosão em ravinas é gerada pela evolução dos sulcos existentes na superfície do solo, que apresentam profundidade superior a 50cm. As ravinas caracterizam-se como canais contínuos de dimensões variáveis, de acordo com as características do solo (geológicas, químicas e mecânicas) e do potencial erosivo da água. Com o tempo, o fluxo concentrado potencializa o aprofundamento das ravinas, que atingem o lençol freático e evoluem para voçorocas (REZENDE *et al.*, 2017). A voçoroca caracteriza o estágio mais avançado e complexo do processo erosivo, observada na Figura 11. Esse estágio apresenta um alto poder destrutivo, uma vez que é possível a atuação de vários processos erosivos simultâneos, como erosão interna (*piping*), laminar e solapamentos (CARVALHO *et al.*, 2022; MASCARENHA *et al.*, 2015).

Figura 11 – Voçoroca situada em Buriticupu (MA)



Fonte: Macedo *et al.* (2019)

Na Figura 11 é possível observar o alto poder destrutivo de uma voçoroca situada na Vila Nova em Buriticupu, no Maranhão, que causou o assoreamento do curso d'água conhecido como açude (MACEDO *et al.*, 2019).

2.3.2 Erodibilidade

O parâmetro de erodibilidade é caracterizado como a propriedade do solo que retrata a facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas, frente à ação de uma tensão hidráulica (BASTOS, MILITITSKY e GEHLING, 2001; WANG *et al.*, 2013), e depende diretamente das características intrínsecas do solo (MASCARENHA *et al.*, 2015). Para Freire e Pessotti (1974), a erodibilidade é o parâmetro mais importante na seleção de práticas conservacionistas e representa a propriedade do solo que indica a suscetibilidade em sofrer erosão, uma vez que distintos tipos de solos perdem quantidades variáveis de massa, mesmo submetidos às mesmas condições de manejo, declividade, comprimento e chuva.

A erodibilidade pode ser quantificada através da perda de solo causada por agente erosivo natural, como a chuva, ou simulada em laboratório (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Bastos, Milititsky e Gehling (2000) apontam que a propriedade erodibilidade também leva em consideração as características de infiltrabilidade do solo, aspecto determinante na intensidade da ação dos agentes erosivos, relacionado ao maior ou menor escoamento superficial. Mascarenha *et al.* (2015) indica que o tipo de solo, a estrutura e a permeabilidade são características relevantes na erodibilidade.

A suscetibilidade à erosão é influenciada pelas características do solo como textura, porosidade, estabilidade dos agregados, teor de matéria orgânica, mineralogia, composição química, permeabilidade, pedologia e sucção. A permeabilidade do solo influencia na sua taxa de infiltração, que por sua vez é inversamente proporcional a suscetibilidade do solo em sofrer erosão (MASCARENHA *et al.*, 2015).

Em decorrer da precipitação, o escoamento superficial pode ocorrer quando o solo atinge a sua capacidade máxima de infiltração (poros saturados) ou devido à chuva de intensidade superior a capacidade de infiltração do solo (BORMA, GITIRANA JR e LUIZ, 2015).

Durante o escoamento superficial, a pressão da lâmina d'água provoca uma frente de percolação de água na superfície do solo. O ar presente nos poros tende a ser comprimido pela pressão exercida sobre ele, levando essa camada de ar a bloquear a percolação da água para camadas subjacentes. Desta forma, a camada superficial saturada tende a perder coesão entre partículas, consequentemente, mais suscetível à perda de material por carreamento hidráulico. Além disso, a ação conjugada do escoamento superficial com partículas carregadas pode tornar a desagregação do solo ainda mais agressiva (SALES *et al.*, 2017).

Nos períodos iniciais da precipitação o solo com fase ar contínua apresenta condutividade hidráulica muito baixa e como consequência, o gradiente hidráulico tende a aumentar na frente de umedecimento do solo. O aumento do gradiente de potencial hidráulico pode resultar em elevação da força de percolação no solo (CAVALCANTI e CAMAPUM DE CARVALHO, 2017; BORMA, GITIRANA JR e LUIZ, 2015; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). A força de percolação ou de arraste (J) é proporcional ao gradiente hidráulico com mesma direção e sentido do escoamento, sendo definida como a força aplicada pela água sobre as partículas de solo (LIMA e RODRIGUES, 2015; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* 2006).

A infiltração contínua de água no solo confere um aumento gradativo do grau de saturação, interferindo na velocidade de fluxo e na sucção atuante no solo. Com o

passar do tempo, o aumento da saturação do solo até um estágio de descontinuidade da fase ar (ar ocluso) resulta na diminuição da taxa de infiltração e como consequência, eleva-se a lâmina d'água e sua erosividade (LIMA *et al.*, 2017; CAVALCANTI e CAMAPUM DE CARVALHO, 2017).

A erosividade caracteriza o poder desagregador da chuva para erodir o solo e é, geralmente, determinada a partir das propriedades características das chuvas, como intensidade e energia da precipitação (WANG *et al.*, 2013).

A relação da erodibilidade à erosividade da água em escoamento superficial não se constitui em fator único na análise de erosão do solo frente a precipitação. Em situações de precipitação intensa a presença de menor teor de umidade no solo, pode potencializar a sua erosão. Neste caso, a água ao infiltrar no solo gera na fase ar uma pressão positiva, que resulta em alto potencial desagregador da estrutura do solo (LIMA *et al.*, 2017).

Fácio (1991) verificou a tendência de aumento da perda de solo com a redução do grau de saturação. A diminuição do grau de saturação implica no aumento da capacidade de absorção de água. Entretanto, o umedecimento do solo reduz a coesão entre as partículas, e consequentemente pode ocorrer a sua desagregação (BASTOS, 1999; FÁCIO, 1991).

Silva *et al.* (2020) também observaram que amostras de solo inicialmente secas apresentaram maior potencial de erodibilidade quando submetidas ao escoamento superficial no ensaio de Inderbitzen. Desta forma, os autores concluíram que o potencial de erodibilidade dos solos analisados aumenta com a diminuição do grau de saturação.

Nas regiões de clima tropical, o perfil de solo é dividido em zona ativa, que compreende os solos não saturados situados entre a superfície terrestre e o nível do freático, e zona freática situada abaixo do nível do lençol freático. Na zona ativa, o solo passa por constante alteração do grau de saturação e sucção, por isso grande parte dos processos erosivos podem iniciar em solos não saturados. Por essa razão, na realização de estudos sobre o comportamento e a previsão de erosões é fundamental verificar como as propriedades dos solos não saturados influenciam no processo erosivo (MASCARENHA *et al.*, 2015).

2.3.2.1 Ensaio direto e indireto

Os métodos de determinação da erodibilidade dos solos podem ser diretos: ensaio de Inderbitzen; e indiretos: emprego da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), ensaio de dispersibilidade (*crumb test*) normatizado pela NBR 13601 (ABNT, 2020), de infiltrabilidade e de perda de massa por imersão da metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979).

2.3.2.1.1 *Equação universal de perda de solo (USLE)*

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE), obtida por Wischmeier e Smith (1978), é um modelo empregado para previsões de erosão do solo (ROMSHOO *et al.*, 2021; KHAN e RAHMAN, 2021).

A USLE é definida pela multiplicação de fatores que representam a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, a inclinação e comprimento do trecho analisado, a cobertura do solo e às práticas conservacionistas do local. O modelo é apresentado pela Equação 12 (SILVA, 2021).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (12)$$

Onde: A = perda média anual de solo (t/há.ano); R = fator de erosividade da chuva (MJ.mm/h.ha.ano); K_{USLE} = fator de erodibilidade do solo (T.h/MJ.mm); LS = índice topográfico (adimensional); C = fator de cobertura do solo (adimensional); e P = fator de prática conservacionista (adimensional).

O fator de erosividade da chuva (R) na USLE representa o efeito do impacto das gotas de chuva e da quantidade e taxa de escoamento pluvial (RENARD *et al.*, 1997).

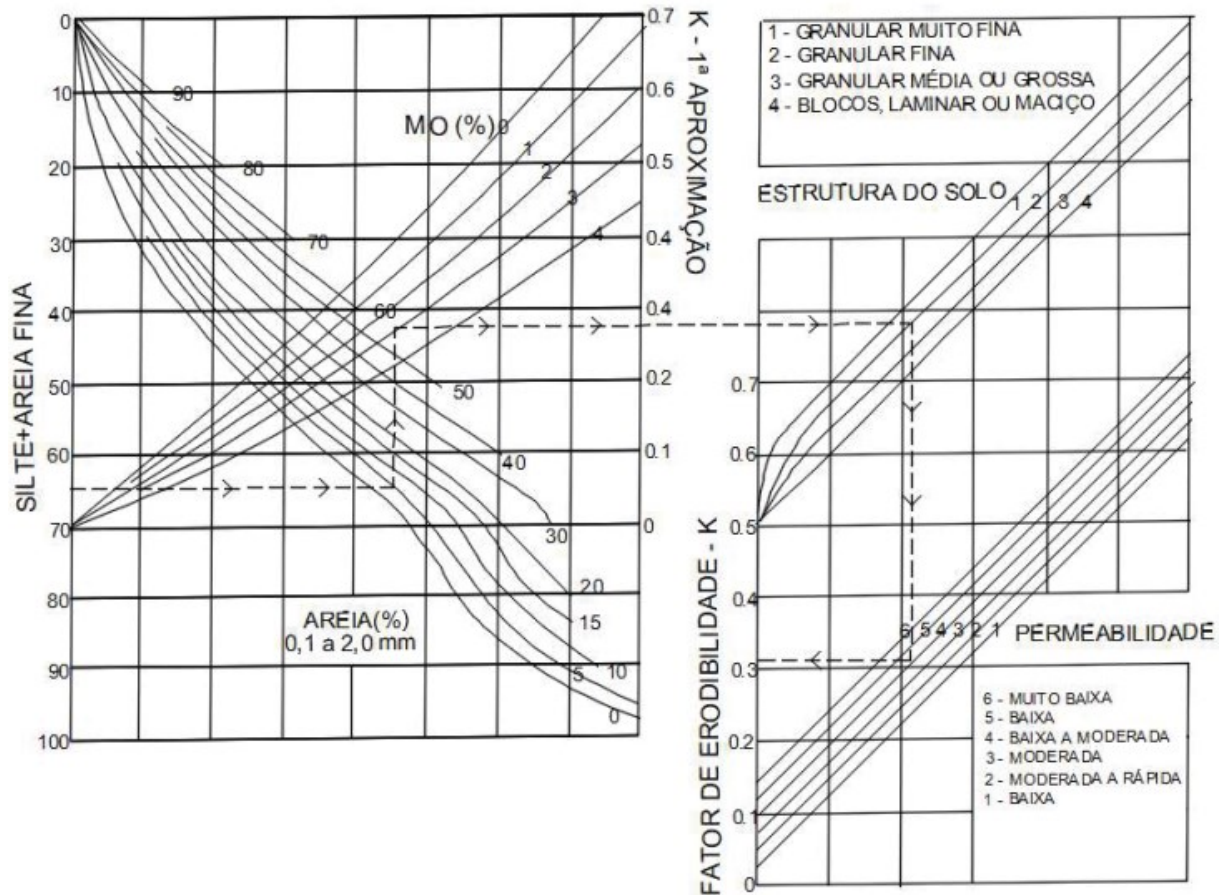
O fator (LS) na USLE representa o efeito da topografia na erosão. O fator (L) é o comprimento da inclinação e o fator (S) reflete a influência do gradiente da inclinação na erosão. Com o aumento de LS ocorre aumento da erosão (MCCOOL, FOSTER e WEESIES *et al.*, 1997).

O fator (C) na USLE reflete o efeito da cobertura do solo nas taxas de erosão (YODER *et al.*, 1997). O fator (P) na USLE representa o efeito das práticas conservacionistas desenvolvidas no local (FOSTER *et al.*, 1997).

O fator de erodibilidade do solo (K_{USLE}) na USLE representa a facilidade com que o solo é desprendido por respingos durante as chuvas e ou pelo fluxo superficial. O fator K_{USLE} pode ser estimado através do nomograma desenvolvido por Wischmeier,

Johnson e Cross (1971) (Figura 12), obtido a partir de experimentos de simulação de chuva e validados com dados de erosão do solo a longo prazo sob precipitação natural (ROMKENS *et al.*, 1997). Na utilização do nomograma são necessários o percentual de silte, areia fina (0,02 – 0,1 mm), areia, matéria orgânica e classificação da estrutura e coeficiente de permeabilidade.

Figura 12 – Nomograma para definição de K_{USLE}



Fonte: Wischmeier, Johnson e Cross (1971)

Bastos (1999) estimou alguns fatores de erodibilidade K_{USLE} da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) através do nomograma de Wischmeier, Johnson e Cross (1971). Na Tabela 3 estão dispostos os resultados do K_{USLE} para os solos analisados pelo autor: ALGB (Solo argilo arenoso); ALGC (Solo saprólítico areno-siltoso); RS239BC (Solo areno-argiloso); RS239C (Solo saprólítico arenoso); PTB (Solo argilo arenoso); PTC (Solo saprólítico areno-siltoso); CDB (Solo areno-argiloso); CDC (Solo saprólítico arenoso).

Tabela 3- Fatores de erodibilidade (K_{USLE})

SOLO	PARÂMETROS DE ENTRADA NO NOMOGRAMA DE WISCHMEIER et al.(1971)					K_{USLE}
	Silte + areia muito fina 0,002 a 0,1mm (%)	Areia 0,1 a 2 mm (%)	Teor de matéria orgânica (%)	Tipo de estrutura	Classe de permeabilidade do perfil	
ALGB	27	37	0	Blocos	Moderada a rápida	0,18
ALGC	26	59	0	Blocos		0,22
RS239BC	22	62	0	Maciça	Moderada a rápida	0,19
RS239C	27	65	0	Maciça		0,25
PTB	18	29	0	Blocos	Moderada a rápida	0,10
PTC	31	64	0	Blocos		0,29
CDB	21	24	0	Blocos	Moderada a rápida	0,12
CDC	29	41	0	Blocos		0,21

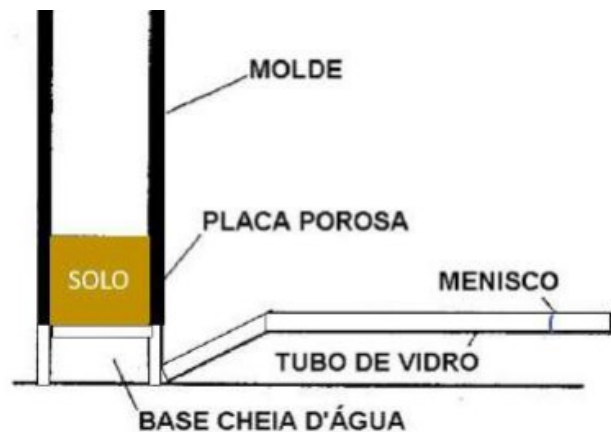
Fonte: Bastos (1999)

2.3.2.1.2 Ensaio de erosão - MCT

A metodologia de classificação MCT (Miniatura, compactado, tropical) desenvolvida por Nogami e Villibor (1979) tem como principal objetivo corrigir e substituir os índices tradicionais, desenvolvidos para solos de clima temperado, de maneira a incluir as características dos solos tropicais. O método foi iniciado com o ensaio Mini - CBR, de dimensões reduzidas e, posteriormente, ampliado para estudos de outras propriedades relevantes, como a contração, permeabilidade e infiltrabilidade. Baseado no sistema desenvolvido, Nogami e Villibor (1979) também incluíram procedimentos de previsão da erodibilidade dos solos tropicais a partir de amostras compactadas. A previsão da erodibilidade é obtida com a determinação de duas propriedades dos solos: a infiltrabilidade e a erodibilidade específica (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

O ensaio de infiltrabilidade (Figura 13) mede a infiltrabilidade dos solos não saturados, sendo definida pela quantidade de água que penetra pela superfície do solo, quando em contato com água livre. A penetração d'água é principalmente motivada pela tensão de sucção do solo, mas que, em certas circunstâncias, também é fundamental avaliar outros fenômenos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Figura 13 – Ensaio de infiltrabilidade

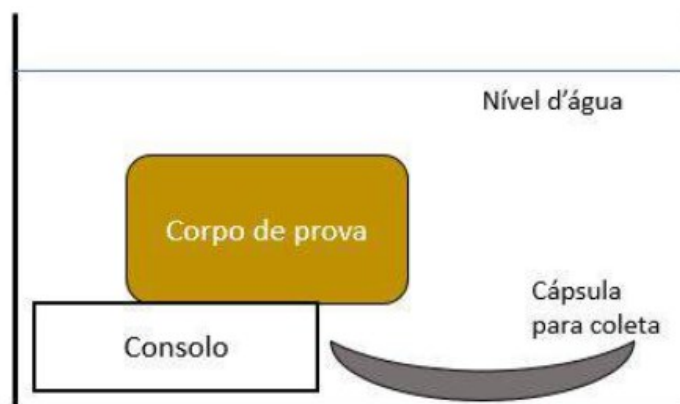


Fonte: Silva (2021)

Para a realização do ensaio, amostras cilíndricas de solo em confinamento lateral são submetidas a um fluxo ascendente, originado pela ascensão capilar, como observado na Figura 13. O fluxo é medido a partir do menisco do tubo horizontal conectado a amostra. Os resultados são expressos no formato de curva, que representa a variação de deslocamento de água no tubo (L) pela raiz quadrada do tempo ($t^{1/2}$) (SILVA, 2021).

O ensaio de perda de massa por imersão (Figura 14) determina a propriedade de erodibilidade específica. Neste ensaio é possível avaliar qualitativamente a desagregação do solo sob a ação de secagem e molhagem, que é fator responsável pela erosão de muitas obras de corte em solos argilosos sedimentares (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Figura 14 – Ensaio de perda de massa por imersão



Fonte: Silva (2021)

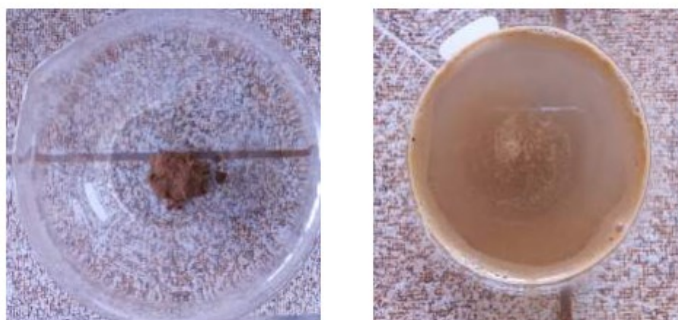
Na execução do ensaio de perda de massa por imersão, os corpos de prova a serem ensaiados são previamente submetidos ao ensaio de infiltrabilidade. Em

seguida são parcialmente extraídos, cerca de 10 mm, e imersos em cuba preenchida com água, como visto na Figura 14, pelo período de 24 horas. A massa desprendida é coletada por cápsulas instaladas abaixo do corpo de prova e posteriormente secas, para obter o percentual de perda de massa em função da massa total do corpo de prova (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

2.3.2.1.3 Ensaio de dispersibilidade (*crumb test*)

O ensaio de avaliação da dispersibilidade de solos argilosos (*crumb test*) (Figura 15) foi inicialmente proposto por Sherard, Dunnigan e Decker (1976) e atualmente é normatizado pela NBR 13601 (ABNT, 2020). O objetivo do ensaio é avaliar a dispersão de solos argilosos quando imersos em água destilada ou hidróxido de sódio (NaOH), sendo classificado como dispersivo ou não dispersivo.

Figura 15 – Ensaio Crumb test



Fonte: Silva (2021)

Na execução do ensaio são empregadas amostras indeformadas, moldadas em formato esférico de diâmetro 6 mm a 10 mm, submetidas a imersão em béquer com água destilada ou solução de NaOH, e realizada avaliação visual da dispersão, como observado na Figura 15. As leituras são enquadradas em quatro classes de dispersibilidade, de acordo com a NBR 13601 (ABNT, 2020). O ensaio de dispersibilidade é recomendado apenas para investigações iniciais, devido ao método consistir apenas de avaliação visual das reações.

2.3.2.1.4 Ensaio de Inderbitzen

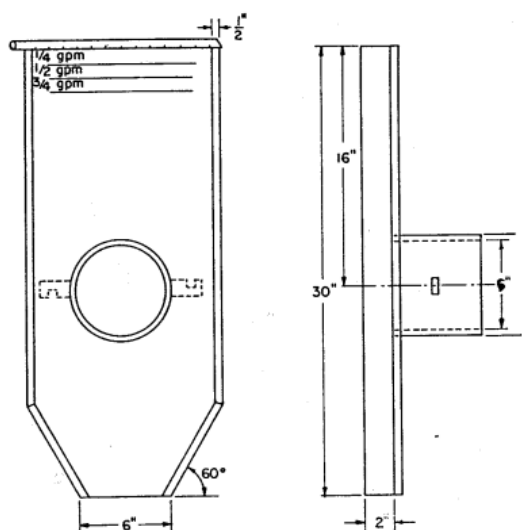
O ensaio de Inderbitzen não é normatizado e foi proposto por Inderbitzen (1961). O ensaio difundiu-se na comunidade científica e tomou o nome de ensaio de Inderbitzen (BASTOS, 1999).

O ensaio tem como objetivo medir a perda de partículas de uma amostra de solo, cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada (BASTOS, MILITITSKY e GEHLING, 2000). Também denominado erosômetro, o ensaio possui simplicidade na sua execução e busca simular canais hidráulicos (BASTOS, MILITITSKY e GEHLING, 2000; SILVA *et al.*, 2020).

Na erosão superficial, o poder erosivo da água e a capacidade de transporte dependem da velocidade de escoamento, além da espessura e inclinação da lâmina d'água (MASCARENHA *et al.*, 2015). De acordo com Bastos (1999), o equipamento de Inderbitzen possibilita observar o comportamento do solo frente a ação de um fluxo superficial d'água, permitindo avaliar os fatores citados por Mascarenha *et al.* (2015), além da influência da densidade e umidade do solo. Entretanto, o ensaio não considera a infiltração de água no solo, aspecto que para Silva *et al.* (2020) é muito importante no entendimento de processos erosivos em solos de clima tropical.

No ensaio proposto por Inderbitzen (1961) (Figura 16), o equipamento utilizado consiste em uma calha inclinada em 44° e 59° com orifício centralizado para instalação do corpo de prova com 15,24 cm de diâmetro e 4,60 cm de altura. Nesse ensaio o corpo de prova foi submetido ao fluxo superficial com vazões entre 10,74 e 18,84 l/min na duração de 5 minutos.

Figura 16 – Equipamento proposto por Inderbitzen (1961)

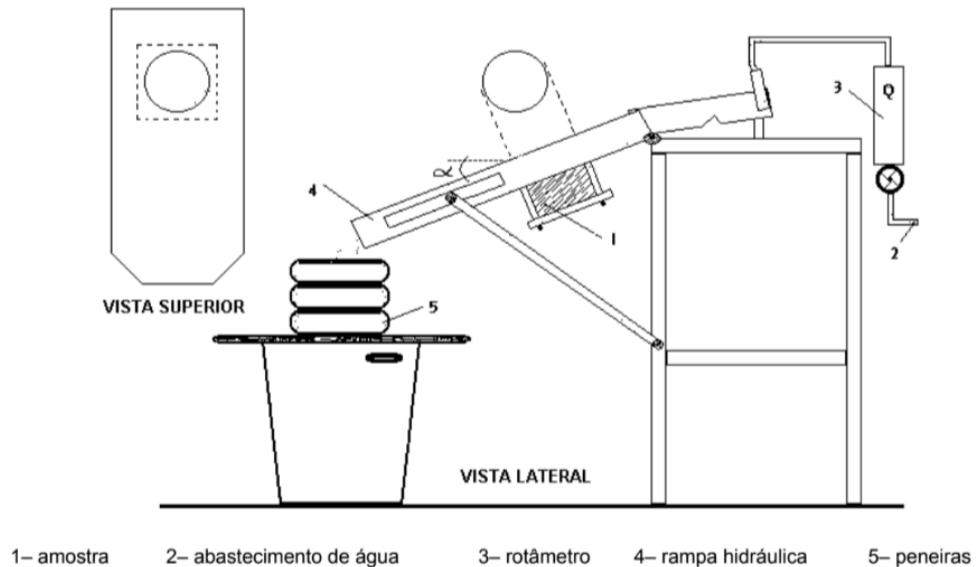


Fonte: Inderbitzen (1961)

É possível visualizar na Figura 16 a concepção original de Inderbitzen (1961) para avaliar a erodibilidade de solos. Já na Figura 17 é observado o equipamento

desenvolvido por Bastos (1999) para realização do ensaio de Inderbitzen, no qual apresentou algumas propostas de alteração ao original de Inderbitzen (1961).

Figura 17 – Equipamento utilizado por Bastos (1999)

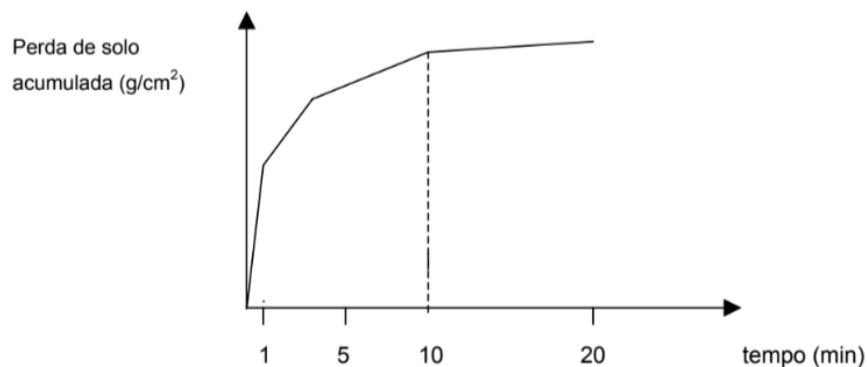


Fonte: Bastos (1999)

Na Figura 17 verifica-se o uso de conjunto de peneiras para análise granulométrica dos sedimentos erodidos e o uso de rotâmetro para monitoramento da vazão de ensaio.

Após a realização do ensaio os resultados são expressos em gráfico cujo eixo das abscissas representa o tempo total do ensaio (minutos) e no eixo das ordenadas a perda de solo acumulada por unidade de área (g/cm^2) (Figura 18).

Figura 18 – Relação entre a perda de solo acumulada e o tempo

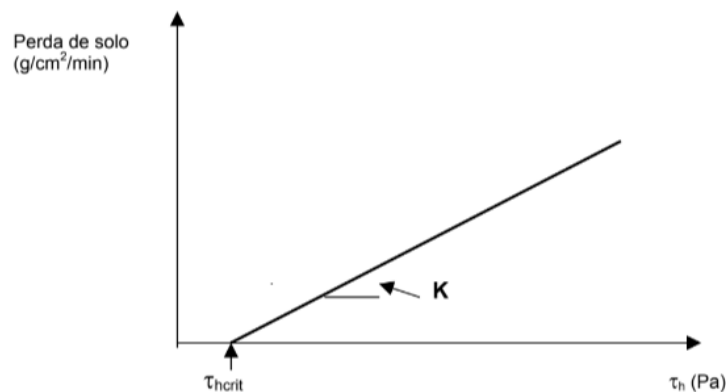


Fonte: Bastos (1999)

Como visto na Figura 18 a curva de perda de solo acumulada por unidade de área (g/cm^2) considera a troca de peneiras a cada instante fixado durante o tempo total de ensaio.

O parâmetro de erodibilidade do solo, K ($\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), é expresso a partir da relação linear entre a perda média de solo de cada ensaio ($\text{g/cm}^2/\text{min}$) e da tensão hidráulica atuante no ensaio τ_h (Pa) (Figura 19).

Figura 19 – Relação entre a perda de solo e a tensão hidráulica atuante



Fonte: BASTOS (1999)

A tensão hidráulica atuante pode ser obtida a partir da relação estimada por Bastos (1999), apresentada na Equação 13.

$$\tau_h = \gamma_w \cdot h \cdot d \quad (13)$$

Onde: τ_h = tensão hidráulica cisalhante atuante (Pa); γ_w = peso específico da água (N/m^3); h = altura da lâmina d'água (m); e d = declividade do escoamento.

A altura da lâmina d'água (h) pode ser calculada a partir da velocidade de escoamento e do valor de vazão, Equação 14.

$$h = \frac{Q}{VL} \quad (14)$$

Onde: Q = vazão (m^3/s); V = velocidade do escoamento (m/s); e L = largura da rampa (m).

Com base na regressão linear é estimado o parâmetro τ_{hcrit} (Pa) (Figura 19), que corresponde ao máximo valor de τ_h (Pa) quando a erosão é nula, e a taxa de erodibilidade ($\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$) BASTOS (1999).

É importante ressaltar que o parâmetro de erodibilidade do solo, que indica a suscetibilidade do material à erosão, pode ser influenciado pelo seu teor de umidade,

granulometria, estabilidade das agregações entre partículas, declividade de escoamento superficial, dentre outros. Na Tabela 4 são apresentados alguns valores relatados na literatura para taxa de erodibilidade (K) obtida no ensaio de Inderbitzen.

Tabela 4 - Taxa de erodibilidade (K) obtida no ensaio de Inderbitzen

Solo	K (10 ⁻² g/cm ² /min/Pa)			Referência
	sa	w _{nat}	pu	
Areia argilo-siltosa	-	8,06	-	SILVA (2021)
Silte arenoso	-	1,36	-	
Pedregulho argilo-siltoso	-	2,84	-	
Arenoso laterítico	30,85	4,91	3,99	VENTURINI (2019)
Areia argilosa	162,60	7,10	165,10	FERNANDES (2015)
Argila arenosa	234,30	65,80	44,00	
Areia siltosa	15,50	24,30	10,30	BASSO (2013)
Areia mal graduada	52,40	40,50	30,70	
Argilo arenoso (ALGB)	12,90	0,07	0,03	BASTOS (1999)
Saprolítico areno-siltoso (ALGC)	26,70	28,30	28,10	
Areno-argiloso (RS239BC)	22,80	0,65	0,04	
Saprolítico arenoso (CDC)	25,90	6,30	3,60	

Nota: sa – amostra seca ao ar; w_{nat} – amostra com umidade natural; pu – amostra pré-úmida.

Fonte: Autora (2023)

Pesquisadores como Fácio (1991); Santos (1997); Bastos (1999); Freire (2001); Chamecki (2002); Almeida (2014); Campos (2014); Venturini (2019); e Silva (2021) apresentaram mudanças ao equipamento de Inderbitzen, com relação aos formatos dos corpos de prova, largura, comprimento da rampa, intervalos de tempo, e inclinação (MASCARENHA *et al.*, 2015). Os autores e suas respectivas contribuições apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5- Adaptações e contribuições ao ensaio de Inderbitzen

Autor (a)	Adaptação
FÁCIO (1991)	Inclinação de 10°; vazão de 3 l/min; duração de 20 minutos; amostras com 10 cm de diâmetro; moldes com rosqueamento para fixação de amostras e conjunto de peneiras para análise granulométrica do material erodido.
SANTOS (1997)	Vazão de 1,06 l/min; duração de 30 minutos; calha de largura reduzida: 10cm; peneira nº 200 (abertura 0,075 mm) para coleta de material erodido.
BASTOS (1999)	Inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°; vazões de 3 l/min a 6 l/min; amostras com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura; análise de amostras em diferentes umidades: natural, secagem e umedecimento prévio; conjunto de peneiras para análise granulométrica do material erodido; monitoramento da vazão por meio de rotâmetro digital.
FREIRE (2001)	Inserção de sistema de gotejamento para avaliar o impacto das gotas de chuva no solo, na qual denominou Ensaio de Inderbitzen Modificado.
CHAMECKI (2002)	Inclinação de 34°; vazão entre 4,2 e 4,5 l/min; duração de 20 minutos; troca de peneiras em 1, 5, 10 e 15 minutos após início do ensaio; amostras com 10 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura; análise em diferentes umidades: natural, secagem e umedecimento.

ALMEIDA (2014)	Inclinação de 10°; vazão de 3 l/min; amostras prismáticas: 10 cm de lado e 5 cm de altura; análise em diferentes umidades: secagem e umedecimento; duração de 60 minutos; troca de peneiras em: 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 40; 50 e 60 minutos; peneira nº 200 (abertura 0,075 mm) para coleta de material erodido.
CAMPOS (2014)	Inclinações de 10°, 20°, 30°, 40° e 50°; vazões de 1,2 l/min, 1,8 l/min, 2,4 l/min; 3,6 l/min, 4,2 l/min, 4,8 l/min e 5,4 l/min; amostras com 10 cm de diâmetro; duração de 20 minutos; amostras em diferentes estados: saturadas; umidade de campo; e com sucções impostas na Câmara de Pressão de Richards em valores de 50 e 200 kPa.
SILVA (2021)	Inclinações de 5°, 10° e 15°; vazão de 10 l/min; Amostras com 9,7 cm de diâmetro e 5 cm de altura; duração de 18 minutos; conjunto de peneiras nº 40 (0,42 mm) e nº 200 (0,075 mm); troca de peneiras nos tempos de 2 min, 4 min, 6 min e 10 min; emprego de sensor de nível d'água e rotâmetro digital conectados ao microcontrolador Arduino ¹ ; sistema e recirculação de água.

Fonte: Autora (2023)

Devido à falta de normatização ocorrem variações e adaptações ao ensaio original, como apontado na Tabela 5. Essas alterações surgem a partir da necessidade de suprimir a falta de precisão nos resultados experimentais (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

2.4 Inter-relação da sucção e erodibilidade

A perda de solo devido a ação da chuva é influenciada por fatores como erosividade, velocidade de escoamento, inclinação do terreno e erodibilidade do solo (MENEZES e PEJON, 2010). A erodibilidade é a propriedade que indica a suscetibilidade do solo à erosão. A definição da constante de erodibilidade do solo depende da relação funcional entre a perda de solo (variável dependente) e variáveis independentes, como escoamento superficial e declividade topográfica (SHERIDAN *et al.*, 2008).

Segundo pesquisadores de diferentes continentes, o teor de umidade do solo impacta na sua resistência à erosão, sendo reduzida à medida que o teor de umidade diminui (WU *et al.*, 2023; MORAGODA *et al.*, 2022; ALMEIDA *et al.*, 2015; NACHTERGAELE e POESEN, 2002). O teor de umidade está diretamente relacionado ao grau de saturação e consequentemente à sucção atuante na estrutura do solo (FREDLUND *et al.*, 2012).

A sucção e a erodibilidade são propriedades essenciais de serem avaliadas nos solos tropicais brasileiros (OLIVEIRA *et al.*, 2021; CASTRO, 2020; LIMA *et al.*,

¹ Placa microcontroladora com plataforma de hardware livre e aberto, que funciona como um pequeno computador, na qual pode ser programada de acordo com a necessidade do usuário.

2017; ALMEIDA *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2014; MASCARENHA *et al.*, 2015; MENEZES e PEJON, 2010; JACINTHO *et al.*, 2006; BASTOS, 1999).

Bastos (1999) avaliou a erodibilidade de solos não saturados presentes em taludes com processos erosivos acentuados, situados na região metropolitana de Porto Alegre/RS. Em seus resultados observou a tendência de menor resistência à erosão para solos com menor teor de umidade inicial, que ao longo do processo de umedecimento apresentaram redução abrupta da coesão superficial, comprovado pelo decréscimo no intercepto coesivo medido nos ensaios de cisalhamento direto.

Almeida *et al.* (2015) avaliou o impacto da variação do grau de saturação na erodibilidade de dois solos, Cambissolo e Latossolo, situados em Goiânia/GO. Na pesquisa foi empregado o ensaio de Inderbitzen para determinação direta da perda de massa de amostras indeformadas com diferentes graus de saturação iniciais. Considerando a curva característica tipo bimodal, os resultados indicaram maiores perdas de massa para as amostras com teores de umidade referentes ao trecho de dessaturação de macroporos. Já para amostras de Latossolo com grau de saturação de 12%, correspondente ao trecho de drenagem de microporos, foi constatada a redução da perda de solo.

De acordo com Oliveira (2019) a sucção inicial atuante no solo tem influência direta no processo de destacamento de partículas, com tendência de aumento seguido de redução na resistência ao processo erosivo. Conforme a curva característica do solo (tipo bimodal), o autor constatou o acréscimo de resistência até valores de sucção correspondentes ao trecho final de drenagem dos macroporos, e decréscimo para valores de sucção residual dos macroporos e de fase de dessaturação dos microporos.

Castro (2020) verificou a influência da sucção na erosão de solos coletados junto a borda de reservatório, localizado na divisa entre os estados de Goiás e Minas Gerais. Na pesquisa, as perdas de massa de solo foram crescentes para amostras com menor teor de umidade inicial e consequentemente maior valor de sucção atuante, com tendência corroborada nas pesquisas de Oliveira *et al.* (2021) e Almeida *et al.* (2015). Além disso, o autor também constatou que as amostras com menor teor de umidade inicial apresentaram perda de massa imediata ao serem submergidas, sendo comprovado que o avanço da frente de molhagem causa perda abrupta de sucção do solo, e consequentemente coesão aparente.

Conforme as pesquisas de Castro (2020), Oliveira (2019) e Almeida *et al.* (2015) é possível relacionar o grau de saturação do solo que tem mais influência na erodibilidade do material através da sua curva característica de água no solo. No entanto, Almeida *et al.* (2015) retrata que o efeito da sucção na erodibilidade de solos mais intemperizados com curvas características bimodais poderá variar em comparação à solos menos intemperizados, que possuem curvas características unimodais.

As pesquisas de Castro (2020), Oliveira (2019), Almeida *et al.* (2015) e Bastos (1999) referem-se à avaliação das propriedades de sucção e erodibilidade de solos de diferentes formações geológicas. Já autores como Silva (2021) e Chamecki (2002) avaliaram a erosão de solos da Formação Guabirotuba, situados no município de Curitiba/PR, e verificaram a sua suscetibilidade à erosão.

Na cidade e região metropolitana de Curitiba/PR, os solos da unidade sedimentar Formação Guabirotuba apresentam características que os consideram problemáticos para ocupação urbana (FELIPE, 2011). Os solos são suscetíveis a alterações volumétricas, como retração nos períodos de seca e expansão quando em contato com a água, o que contribui para o desenvolvimento de processos erosivos (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Silva (2021) avaliou a erosão de solo presente em canal de drenagem urbana com amostras indeformadas, que apresentaram médio potencial erosivo conforme critério apresentado por Bastos (1999). Chamecki (2002) analisou amostras indeformadas de solo da Formação Guabirotuba em diferentes graus de saturação, de maneira a verificar a influência do teor de umidade na erodibilidade do solo. O autor constatou que as amostras secas ao ar apresentaram maior perda de solo quando comparadas às amostras com teor de umidade natural e pré - umedecidas.

Os resultados das pesquisas de Silva (2021) e Chamecki (2002) evidenciaram a baixa resistência à erosão dos solos da Formação Guabirotuba, que corroboram com levantamentos de campo realizados por Felipe (2011), em que foi verificado a suscetibilidade desses solos à processos erosivos.

Existem estudos com solos da Formação Guabirotuba que avaliaram o comportamento mecânico com adição de diferentes materiais para melhoria de resistência (MUÑOZ *et al.*, 2021; BALDOVINO *et al.*, 2020), e também de variação volumétrica (ALMEIDA *et al.*, 2022). Entretanto, poucos estudos relacionam-se às propriedades não saturadas dos solos da Formação Guabirotuba, como taxa de

infiltração (ALMEIDA, 2022), expansão (ALMEIDA *et al.*, 2022; PEREIRA, 2004), erodibilidade (SILVA, 2021; CHAMECKI, 2002) e sucção.

A falta de investigação das propriedades de erosão de um solo contribui para a evolução do processo erosivo, que apresenta impactos econômicos e socioambientais. Em virtude disso, é fundamental a intensificação de pesquisas voltadas para a análise do comportamento dos solos não saturados frente à erosão.

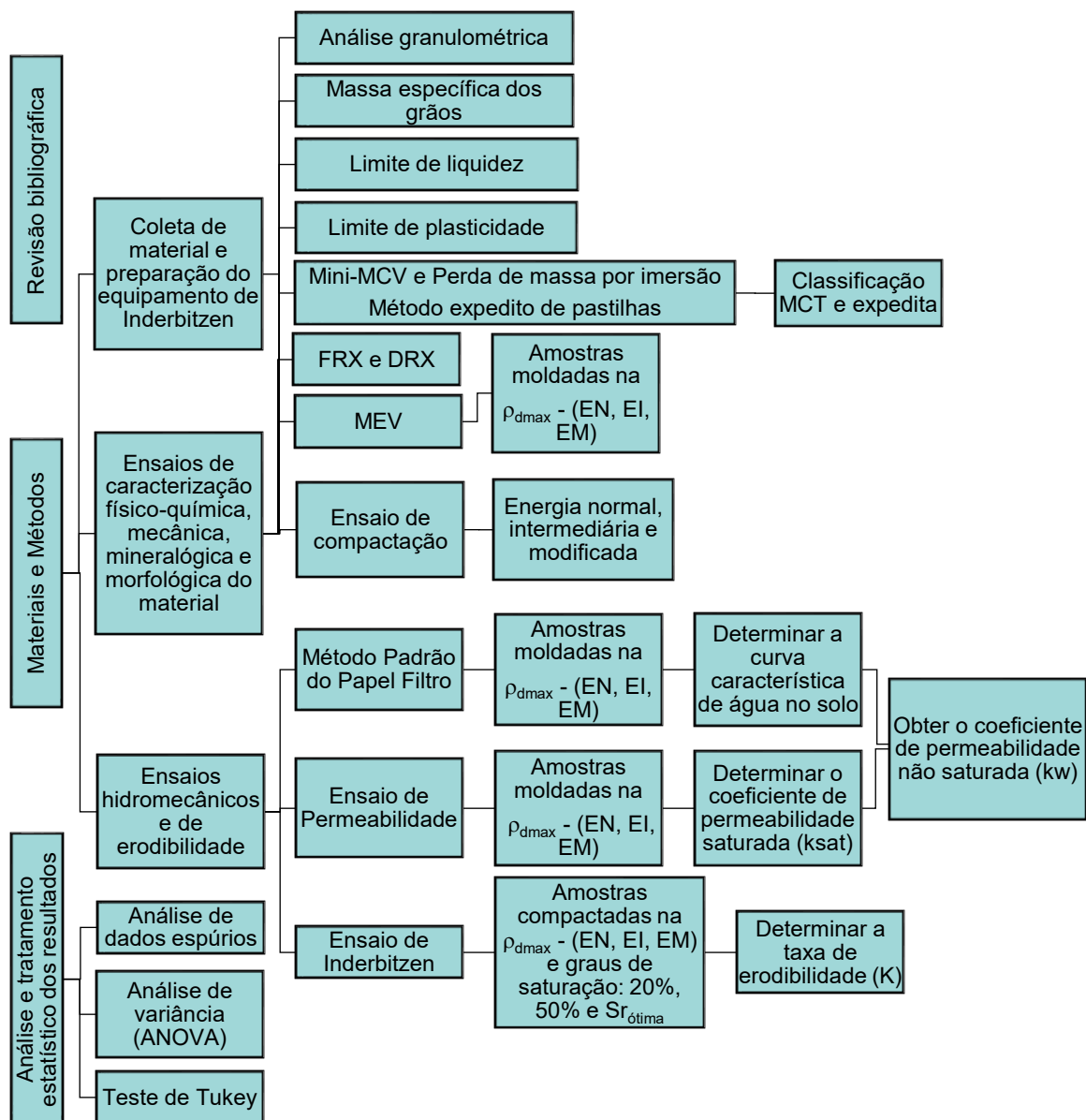
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Etapas da pesquisa

A presente pesquisa emprega o método de abordagem indutivo com procedimento experimental, de natureza quantitativa e com objetivo exploratório acerca da influência da sucção na erodibilidade de um solo.

O estudo foi desenvolvido em cinco etapas principais, que se subdividem em secundárias como apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Nota: EN-Energia Normal; EI-Energia Intermediária; EM- Energia Modificada; ρ_{dmax} -Massa específica aparente seca máxima; $S_{rótima}$ -Grau de saturação referente ao teor de umidade ótima; FRX-Fluorescência de raios-X; DRX-Difratometria de raios-X; MEV-Microscopia eletrônica de Varredura; MCT-Miniatura Compactado Tropical.

Fonte: Autora (2023)

O fluxograma apresentado na Figura 20 mostra a sequência de etapas a serem realizadas. A primeira etapa da pesquisa consistiu na revisão bibliográfica para determinar as variáveis dependentes e independentes. Na segunda etapa foi realizada a coleta do solo e preparação do equipamento de Inderbitzen. A terceira etapa consistiu na caracterização físico-química, mecânica, mineralógica e morfológica do material através dos respectivos ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de *Atterberg*, compactação, fluorescência de raios-X (FRX), difratometria de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na quarta etapa foram realizados os ensaios laboratoriais para determinação da curva característica de água no solo, permeabilidade e erodibilidade. A última etapa consiste na análise e tratamento estatístico de resultados.

O programa experimental foi definido com base na bibliografia e apresenta-se na Tabela 6.

Tabela 6- Programa experimental

Item	Ensaio	Referência
Caracterização físico-química, mineralógica, morfológica e mecânica	Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016)
	Massa específica dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016)
	Limite de liquidez (LL)	NBR 6459 (ABNT, 2017)
	Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180 (ABNT, 2016)
	Fluorescência de raios-X (FRX)	-
	Difratometria de raios-X (DRX)	-
	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-
	Ensaio Mini-MCV	DNIT 258 – ME (DNIT, 2023)
	Perda de massa por imersão	
	Método expedito de pastilhas	Nogami e Villibor (1994)
Curva Característica	Compactação nas energias Normal, intermediária e modificada	NBR 7182 (ABNT, 2016)
	Método padrão do papel filtro	D5298 (ASTM, 2016)
Condutividade hidráulica	Ensaio de permeabilidade à carga variável	NBR 14545 (ABNT, 2021)
Erodibilidade	Inderbitzen	Inderbitzen (1961); Bastos (1999); Silva (2021); Paiva (2004)

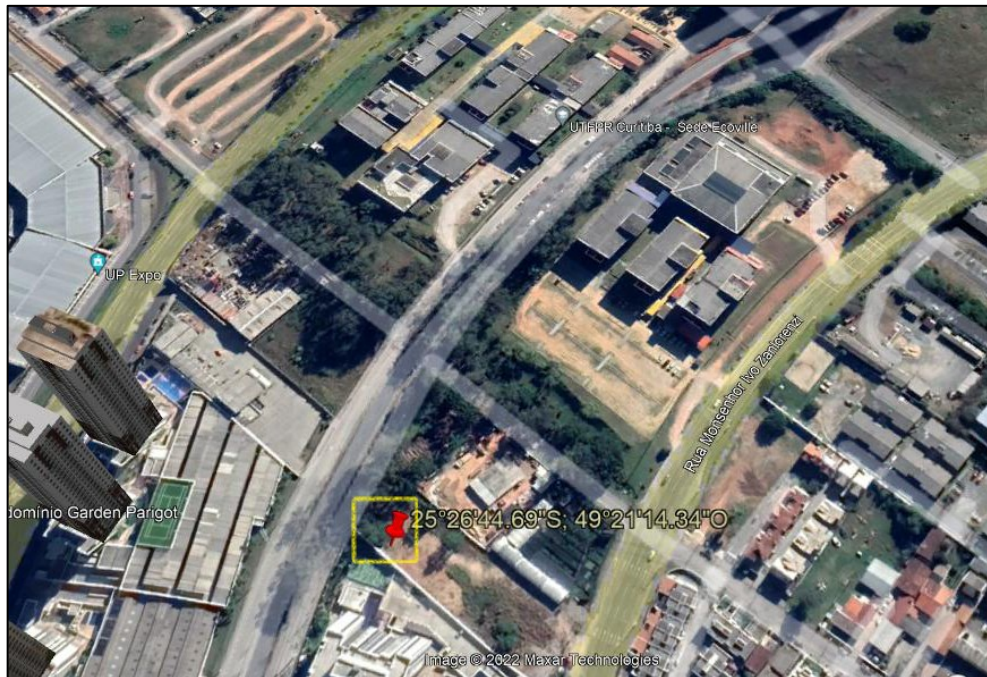
Fonte: Autora (2023)

3.2 Materiais e equipamentos

3.2.1 Solo

O solo empregado na pesquisa foi coletado na cidade de Curitiba/PR, cuja coordenadas geográficas do local são $25^{\circ}26'45''\text{S}$ e $49^{\circ}21'14''\text{O}$, conforme Figura 21.

Figura 21 – Local de coleta do solo em estudo



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023)

É possível observar na Figura 21 que o ponto de coleta do solo é próximo ao Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O perfil natural em que o solo foi coletado é ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Solo da pesquisa: (a) perfil em campo; (b) Passante na peneira nº4



(a)

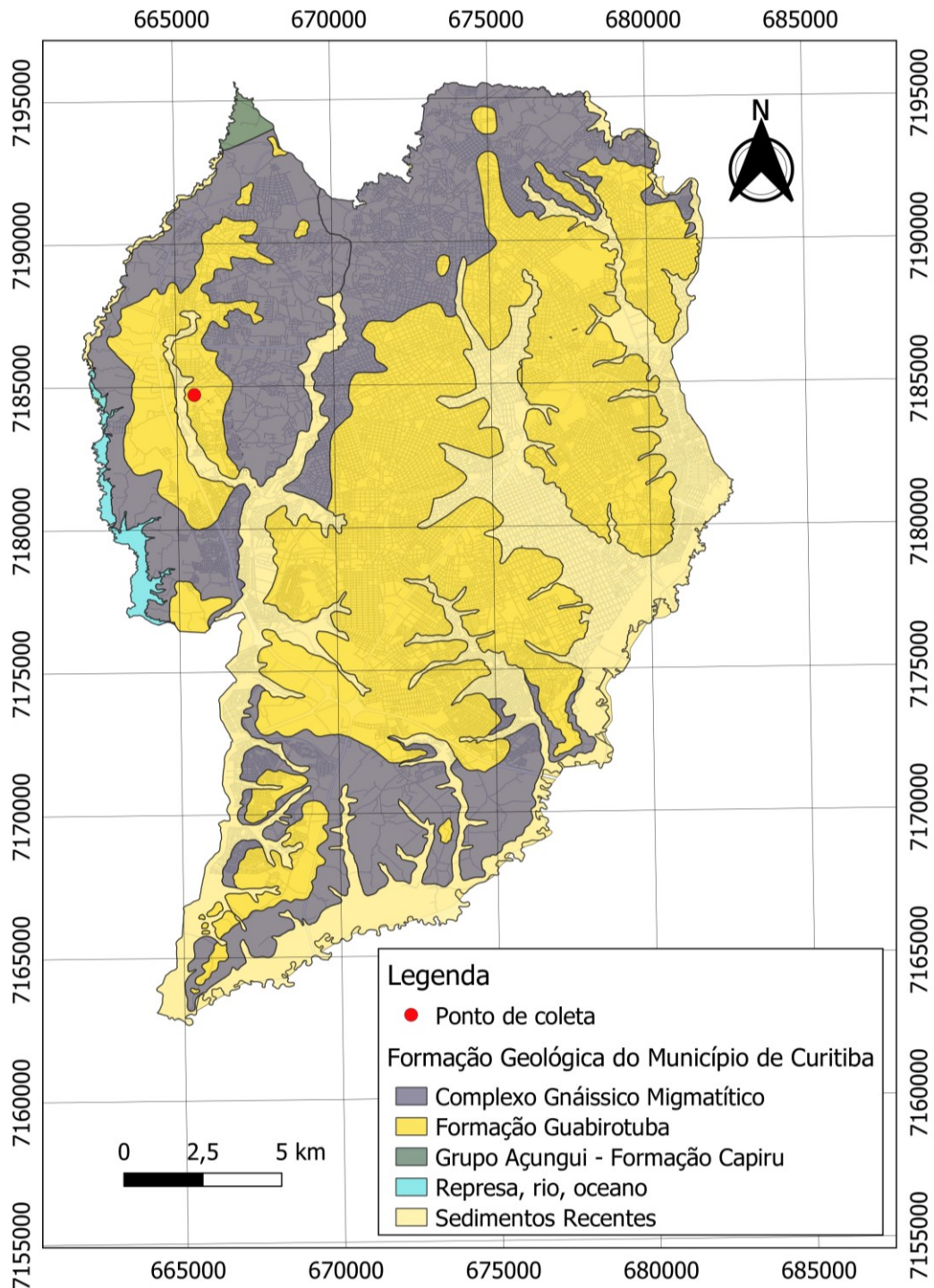


(b)

Fonte: Autora (2023)

Observa-se a homogeneidade do perfil natural (Figura 22a) e que o solo possui coloração avermelhada (Figura 22b). De acordo com o mapeamento geológico do município de Curitiba (MINEROPAR, 2006), o solo utilizado na pesquisa foi coletado em área pertencente à Formação Guabirotuba (Figura 23).

Figura 23 – Ponto de coleta em área da Formação Guabirotuba



Fonte: Adaptado de Mineropar (2006)

3.2.2 Equipamentos

Na realização dos ensaios foram empregados alguns equipamentos normatizados e outros constantes em métodos da literatura, que são aceitos pela comunidade científica. Na Tabela 7 estão listados os equipamentos utilizados nos ensaios da pesquisa.

Tabela 7 - Equipamentos empregados nos ensaios

Ensaio	Equipamentos
Preparação da amostra	Almofariz, mão de gral, bandejas, peneiras, concha metálica, embalagens, cápsulas metálicas e balança
Granulometria	Peneiras, bandejas, porcelanas; cápsulas metálicas, béquer, dispersor mecânico, proveta, termômetro, densímetro, e balança
Massa específica real dos grãos	Béquer, espátula, dispersor mecânico, funil, picnômetro 500 ml, bomba de vácuo, termômetro e balança.
Limite de liquidez	Aparelho de Casagrande, cinzéis, porcelana, espátula, cápsulas metálicas e balança.
Limite de plasticidade	Placa esmerilhada, gabarito, porcelana, espátula, cápsulas metálicas e balança.
Compactação	Cilindros <i>Proctor</i> , soquete padrão, extrator de amostras, paquímetro, bandeja, espátulas, régua de nivelamento, pincel, cápsulas metálicas e balança.
FRX	Espectrômetro EDX-720/800HS.
DRX	Equipamento XRD-7000 da Shimadzu.
MEV	Microscópio EVO MA 15 da Zeiss.
Método Padrão do Papel filtro	Porcelanas, espátulas, recipientes plásticos com tampa de vedação, pinça metálica, tesoura, balança de precisão 0,0001 g, caixa de isopor, cápsulas metálicas e estufa 60-100 °C.
Permeabilidade	Permeâmetro de parede rígida e coluna d'água.
Erodibilidade	Equipamento de Inderbitzen.

Fonte: Autora (2023)

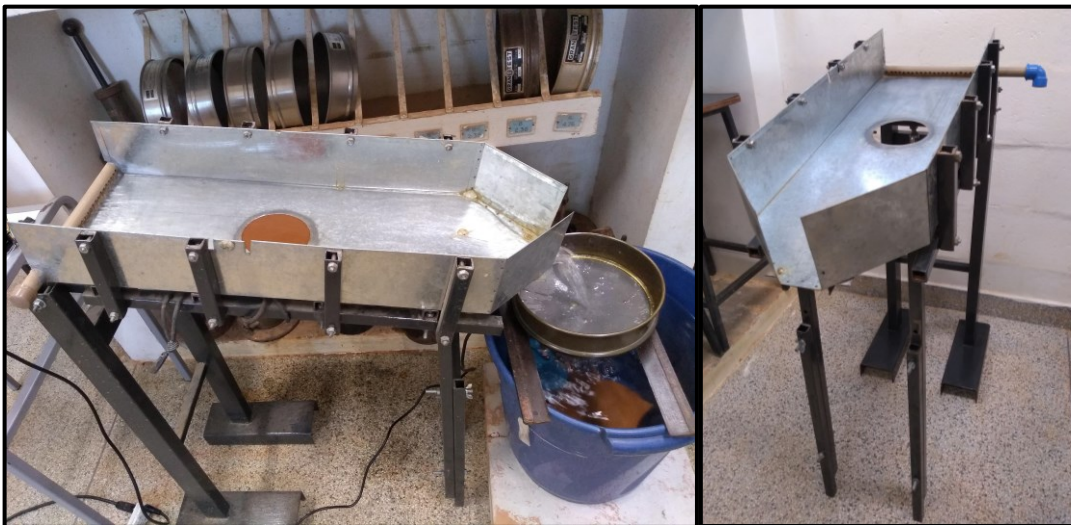
3.2.3 Equipamento de Inderbitzen

Como apresentado na seção 2.3.2.1.4, o ensaio de Inderbitzen não possui normatização, entretanto é empregado na comunidade científica para avaliação direta da erodibilidade de solos (FÁCIO,1991; SANTOS,1997; BASTOS,1999; FREIRE, 2001; CHAMECKI, 2002; ALMEIDA, 2014; CAMPOS, 2014; VENTURINI, 2019; SILVA, 2021).

De maneira a determinar a erodibilidade do solo por método quantitativo, resolveu-se empregar o ensaio de Inderbitzen, visto o seu potencial de uso apontado na seção 2.3.2.1.4.

O equipamento (Figura 24) foi construído durante a realização da presente pesquisa e teve como principal referência a concepção de projeto do equipamento empregado por Silva (2021). Durante a construção, instalação e montagem do equipamento ocorreram alguns testes, para que o mesmo apresentasse as condições previamente estabelecidas de realização do ensaio

Figura 24 – Equipamento Inderbitzen



Fonte: Autora (2023)

A concepção final do equipamento (Figura 24) é constituída pelos itens: pórtico de sustentação, calha metálica, sistema hidráulico de alimentação e distribuição e sistema eletrônico.

O pórtico de sustentação foi construído com perfis metálicos de aço, nas dimensões de 75 cm de altura e 60 cm de largura para sustentação da calha metálica. O pórtico possibilita a variação da inclinação de 5° a 15°.

A calha em aço galvanizado é a mesma empregada por Silva (2021), que possui 25 cm de largura, 60 cm de comprimento, chanfro de 10° e com orifício central de 10 cm, para instalação dos corpos de prova (diâmetro de 10 cm e altura de 5 cm). Para molde de compactação dos corpos de prova, foi adotado o colarinho do cilindro *Proctor* do ensaio de compactação (NBR 7180, ABNT 2016). Desta forma, para a fixação das amostras foram instalados pinos (comprimento de 10 cm e diâmetro 9,18

mm) na face inferior da calha, que possibilitou o uso de porcas rosqueáveis do tipo borboleta para melhor fixação.

O sistema de distribuição é constituído por uma tubulação flexível e um tubo de PVC rígido (diâmetro de 20 mm) com furos graduados no diâmetro de 0,06 mm, e com espaçamento de 9,15 mm. O sistema hidráulico de alimentação emprega a recirculação de água através de bomba submersa de 25 W e reservatório de 40 litros. O método de recirculação hidráulica objetiva principalmente a economia de água, de acordo com o apontado por Silva (2021), além de apresentar vantagens como a facilidade e agilidade na execução do ensaio, visto que, para a alimentação, basta o reservatório estar em nível previamente definido e a bomba ligada. Entretanto, de acordo com Silva (2021), a desvantagem do sistema ocorre pela mistura das partículas finas que são depositadas no reservatório. Por isso, a utilização desse sistema implica na troca de água do reservatório ao atingir elevada turbidez.

O sistema eletrônico de monitoramento de vazões é composto por rotâmetro digital ligado à placa microcontroladora Arduino, que possibilita a obtenção dos registros através de serial de computador.

Os itens pórtico de sustentação; calha em aço galvanizado; sistema de distribuição e alimentação; e sistema eletrônico contemplam as partes principais do equipamento de Inderbitzen, além de apresentar fatores que influenciam e definem algumas variáveis fixas de realização do ensaio. Além dos itens elencados, também deve ser realizada a leitura de altura da lâmina d'água e empregado um sistema de coleta do material erodido.

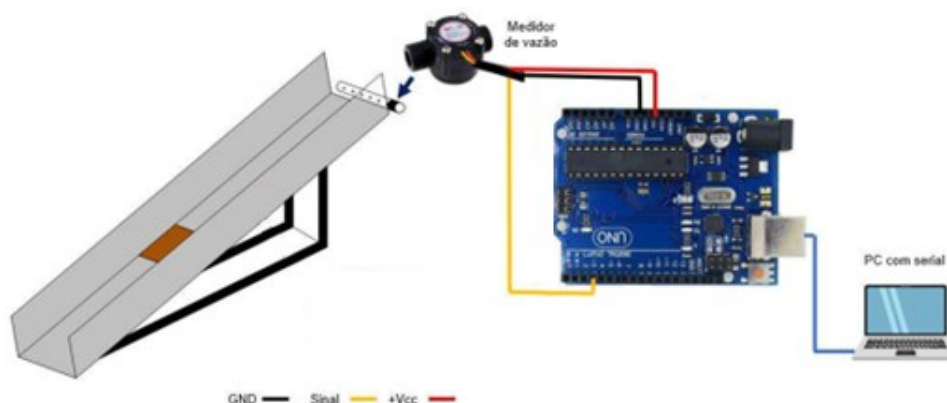
As leituras de altura da lâmina d'água foram realizadas com régua graduada posicionada em diferentes pontos ao longo da superfície de escoamento, na faixa em que a amostra foi instalada.

O sistema de coleta do material erodido é constituído pela peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm), que foi posicionada na saída da calha com sobreposição do reservatório.

3.2.3.1 Sensor digital

Na Figura 25 é possível observar o esquema da ligação do sistema eletrônico de monitoramento de vazões.

Figura 25 – Ligação do sistema eletrônico



Fonte: Adaptado de Silva (2021)

O sistema eletrônico foi empregado com objetivo de minimizar a variabilidade de execução do ensaio, sendo monitorada as vazões aplicadas ao longo de todo o ensaio. O código de programação empregado para possibilitar as leituras foi o desenvolvido por Silva (2021), que se apresenta no Anexo A.

O rotâmetro digital utilizado é do fabricante Sea, com capacidade de registro de 1 a 30 l/min, apresentado na Figura 26. A peça possui pás internas no formato radial, e é instalada na junção entre a tubulação rígida e flexível do sistema hidráulico de distribuição. A vazão é determinada a partir da contagem eletrônica do número de giros das pás por unidade de tempo (Silva, 2021).

Figura 26 – Rotâmetro digital



Fonte: Autora (2023)

O rotâmetro digital (Figura 26) foi previamente calibrado antes de ser utilizado no ensaio de Inderbitzen. Na sua calibração, inicialmente foram impostas variações na vazão de circulação da bomba através da alteração do nível do reservatório e determinado valores seriais. Em cada condição de leitura serial foram feitas leituras manuais de vazão com proveta graduada e cronômetro digital. De posse das leituras manuais e respectivo valor serial, foi possível realizar a regressão linear dos pontos,

de maneira a obter a equação de calibração para correção das leituras de vazão do rotâmetro (Tabela 8).

Tabela 8- Calibração do rotâmetro digital para leituras de vazão corrigidas

Descrição estatística		
	Vazão medida	Valor serial
Média	7,38	17,20
Desvio padrão	0,96	1,58
CV (%)	13%	9%
Regressão linear		
R ²		0,95
Erro padrão		0,23
Número de pontos		11
Equação de calibração		
	Vazão corrigida = 0,59 valor serial – 2,81	
	Linear	Angular
Coeficientes	-2,81	0,59
Erro padrão	0,78	0,05
valor-P	0,57x10 ⁻²	0,36x10 ⁻⁶

Fonte: Autora (2023)

A verificação da vazão registrada pelo rotâmetro pode ser realizada através do cálculo de vazão teórica. O cálculo de vazão teórica é realizado com a Equação de Manning-Strickler, apresentada na Equação 15.

$$Q = \frac{1}{n} A \frac{b \cdot hm}{b + 2 \cdot hm}^{2/3} I^{1/2} \quad (15)$$

Onde: Q = vazão (m³/s); n = coeficiente de rugosidade; b = largura da rampa (m); hm = altura do nível d'água(m); $\frac{b \cdot hm}{b + 2 \cdot hm}$ = raio hidráulico, divisão da área pelo perímetro molhado (m); e I = inclinação.

Entretanto, como apontado por Silva (2021), a Equação 15 de Manning-Strickler possui simplificações que dificultam a precisão no cálculo da vazão teórica, como a pequena escala do canal, a sua seção aberta e não fechada, perdas de carga entre a tubulação e a calha. Desta forma, na pesquisa foi definido como margem de erro ± 4 l/min para monitoramento das vazões, assim como o definido por Silva (2021).

3.2.3.2 Ensaio testes

A construção do equipamento demandou vários testes até que chegasse na concepção final. Os problemas, testes e adequações realizadas estão listados na Tabela 9.

Tabela 9- Condições adversas e soluções

Condição adversa	Solução
Falta de estabilidade da estrutura de sustentação	Construção do pórtico de sustentação em perfis metálicos para aumento da rigidez.
Tipo de molde para moldagem das amostras	Uso do colarinho do cilindro de <i>Proctor</i> para moldagem e confinamento lateral das amostras a serem ensaiadas.
Escolha do método de fixação das amostras	Instalação de pinos (comprimento 10 cm e diâmetro 9,18 mm) na parte inferior da calha para instalação dos corpos de prova. A fixação foi realizada com porcas rosqueáveis do tipo borboleta.
Potência da bomba de recalque	Na pesquisa de Silva (2021) foi empregada bomba de 290 W, entretanto como apontado pelo autor, a potência elevada demandou que outras conexões hidráulicas fossem empregadas para controle da vazão. Por isso, optou-se pelo emprego de bomba com 25 W, que possibilitou o ajuste da vazão desejada com menor uso de conexões hidráulicas.
Variações na vazão de ensaio	Devido ao tipo de bomba escolhida, ocorreram vários testes até que fosse atingida a vazão requerida. O nível e tamanho do reservatório, a altura geométrica da bomba e o comprimento da tubulação foram ajustados repetidas vezes até que se atingisse a vazão desejada. Outro fator adverso que dificultou o ajuste da vazão foi a turbidez da água, devido à perda em excesso de finos e ao tamanho do reservatório de 40 litros. A bomba adquirida possui capacidade para recalque de água limpa, entretanto para água com elevada turbidez, a bomba perde capacidade de recalque. A solução foi o emprego de reservatório com capacidade para 230 litros.

Fonte: Autora (2023)

Como observado na Tabela 9, ocorreram diversos problemas durante a construção do equipamento, como a escolha do tipo de molde e da fixação das amostras, escolha da bomba, vazão de ensaio, turbidez da água, altura geométrica da bomba, nível e tamanho do reservatório. Todos os problemas puderam ser

contornados e a concepção final do ensaio atendeu os critérios previamente estabelecidos e apresentados na literatura (SILVA, 2021; CASTRO, 2020; ALMEIDA, 2014; BASTOS, 1999).

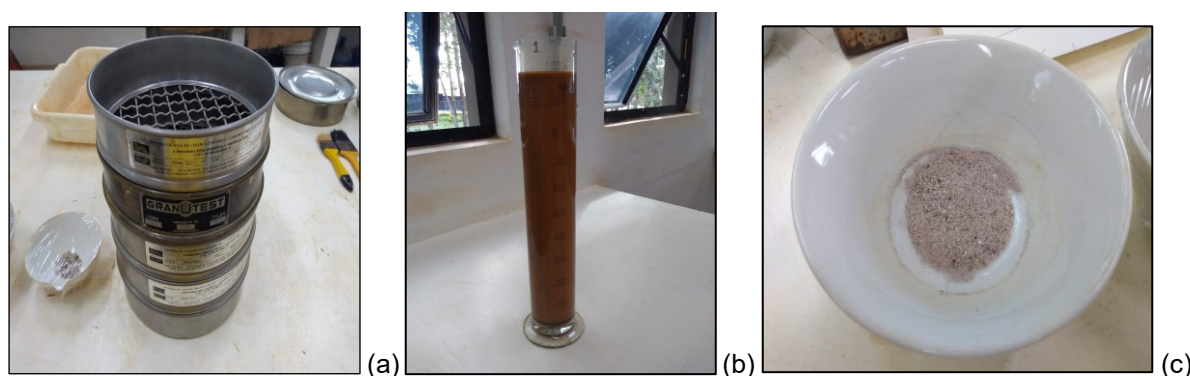
3.3 Métodos

3.3.1 Ensaio de caracterização

3.3.1.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada com base na NBR 7181 (ABNT, 2016), com avaliação da fração fina pelo método de sedimentação. Na Figura 27 observa-se algumas das etapas realizadas no ensaio de granulometria.

Figura 27 – Ensaio de granulometria: (a) peneiramento grosso; (b) sedimentação; (c) peneiramento fino



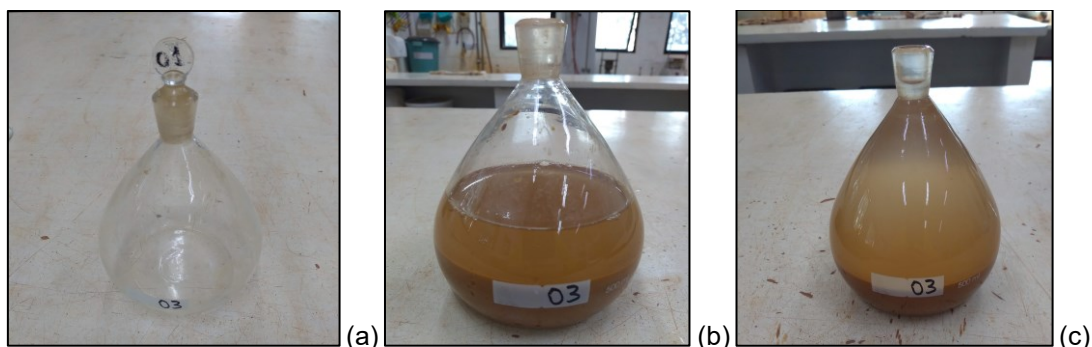
Fonte: Autora (2023)

Dentre as etapas do ensaio de granulometria, observa-se na Figura 27a o conjunto de peneiras que foi empregado na etapa de peneiramento grosso do solo retido na peneira nº 10. Na etapa de sedimentação (Figura 27b) são analisados os tamanhos de partículas menores do que 0,075 mm. Na Figura 27c apresenta-se o material retido na peneira nº 200, após a análise de sedimentação, que posteriormente passou pela etapa de peneiramento fino.

3.3.1.2 Massa específica real dos grãos

A massa específica real dos grãos foi obtida de acordo com o procedimento descrito na NBR 6458 (ABNT, 2016). Na Figura 28 é possível observar algumas das etapas do ensaio.

Figura 28 – Ensaio de massa específica real dos grãos



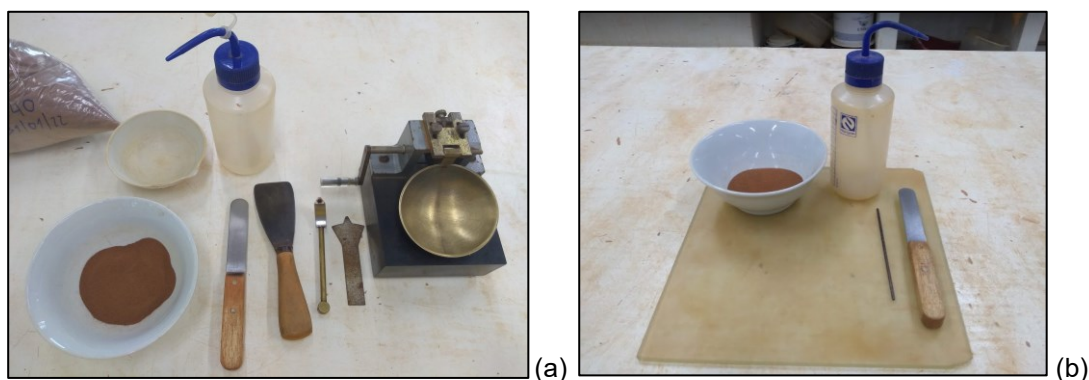
Fonte: Autora (2023)

O picnômetro utilizado no ensaio possui volume 500 ml (Figura 28a). Na Figura 28b apresenta-se o picnômetro com solo e água destilada antes de passar pela etapa de retirada de ar da amostra. O picnômetro completo com solo e água destilada após a etapa de retirada de ar é observado na Figura 28c.

3.3.1.3 Limites de Atterberg

O limite de liquidez do solo foi obtido com base na NBR 6459 (ABNT, 2016). Já o limite de plasticidade do solo foi determinado de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016). Na Figura 29 são apresentados os materiais utilizados para a realização dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade.

Figura 29 – Materiais para ensaio: (a) Limite de liquidez; (b) Limite de plasticidade



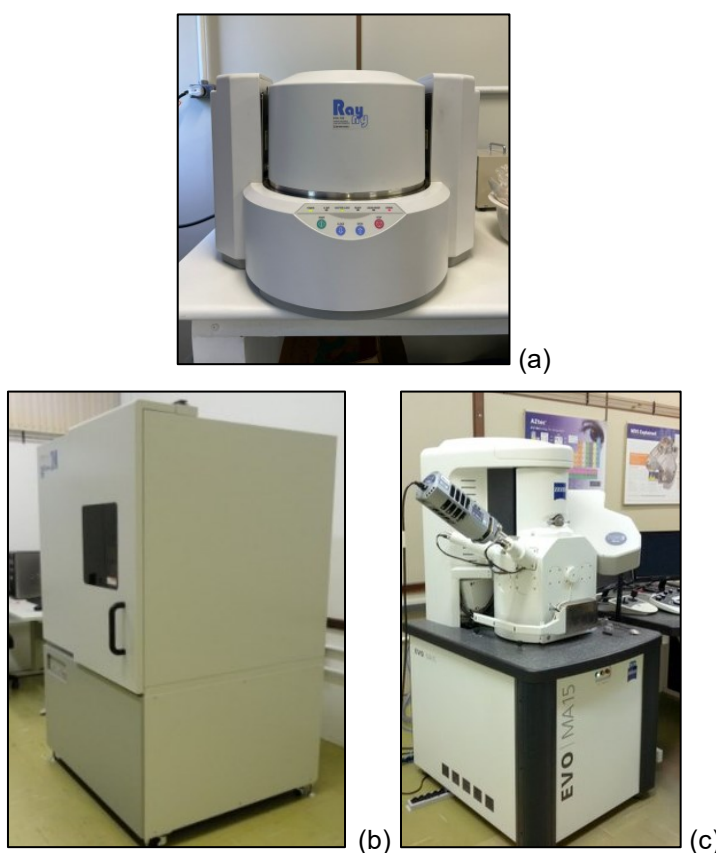
Fonte: Autora (2023)

Os materiais empregados no ensaio de limite de liquidez estão ilustrados na Figura 29a. Já na Figura 29b estão os materiais empregados no ensaio de limite de plasticidade. O resultado de cada ensaio possibilita o cálculo do índice de plasticidade do solo.

3.3.1.4 Fluorescência de raios-X, difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de varredura

A análise química pela fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada com o espectrômetro EDX-720/800HS (Figura 30a). A análise mineralógica pela difratometria de raios-X (DRX) foi realizada pelo equipamento XRD-7000 da Shimadzu (Figura 30b). A análise morfológica pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada pelo equipamento EVO MA 15 da Zeiss (Figura 30c).

Figura 30 – Equipamentos utilizados nas análises de FRX; DRX; MEV



Fonte: Autora (2023)

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) foi realizado pelo laboratório de materiais do Departamento de Construção Civil – DACOC do campus Curitiba da UTFPR. Os ensaios de difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados pelo Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR.

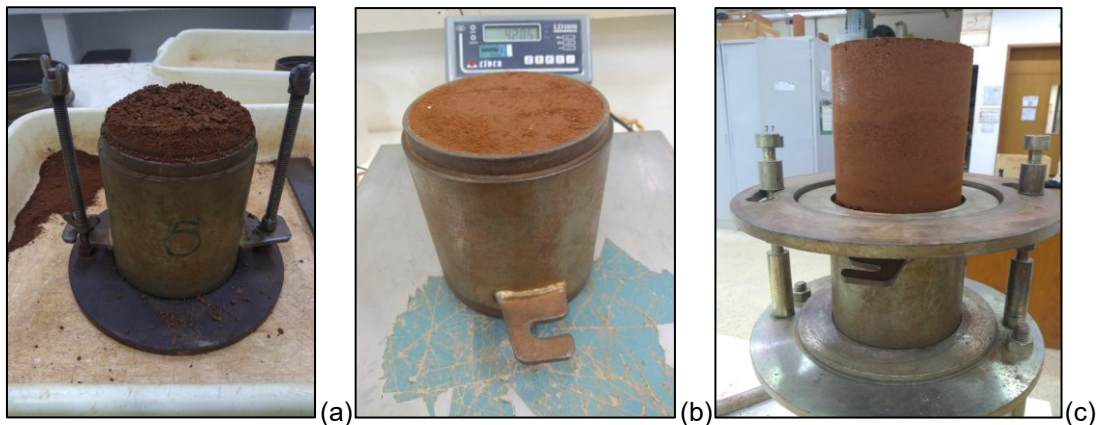
Para a análise de FRX e DRX foram empregadas amostras de solo secas passantes na peneira nº 200. Já na análise por MEV foram empregadas amostras secas moldadas na massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), conforme curvas

de compactação obtidas nas energias normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM).

3.3.1.5 Compactação

O ensaio de compactação foi executado conforme o procedimento descrito na NBR 7182 (ABNT, 2016). Para compactação foram empregadas as energias normal (EN), intermediária (EI) e a modificada (EM). Os ensaios foram realizados sem reuso de material e com água destilada. Algumas das etapas do ensaio são apresentadas na Figura 31.

Figura 31 – Ensaio de compactação



Fonte: Autora (2023)

Na Figura 31a é apresentado o cilindro de *Proctor* ao final da compactação do solo e sem a etapa de nivelamento do topo. Na Figura 31b é possível visualizar o cilindro compactado após a etapa de nivelamento do topo. A extração do solo compactado do molde para posteriormente ser determinado o seu teor de umidade é observado na Figura 31c.

3.3.1.6 Metodologia MCT

Nogami e Villibor (1981) desenvolveram a Metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical) para solos tropicais compactados, diante da dificuldade e divergência de resultados apontados na aplicação das classificações tradicionais de solos (Sistema Unificado de Classificação dos Solos e *Highway Research Board*).

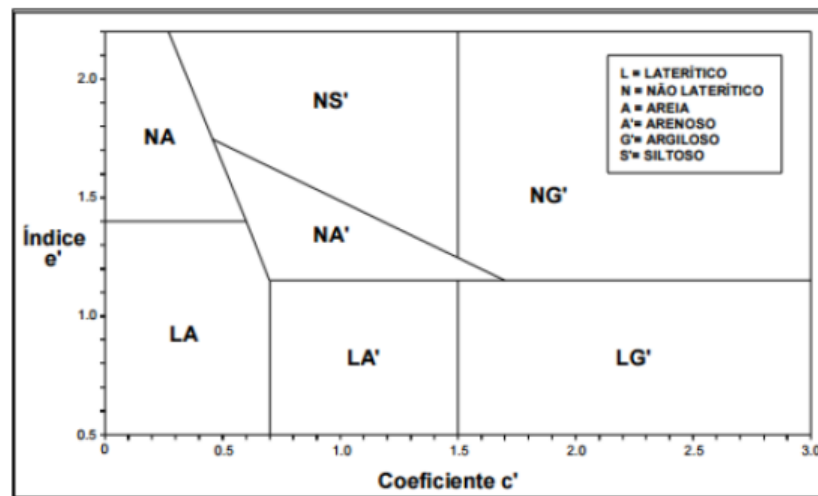
Junto à metodologia proposta surge a classificação MCT de solos, baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos tropicais compactados (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Nesta classificação os solos são categorizados em duas grandes

classes: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em: areia laterítica (LA); solo arenoso laterítico (LA'); solo argiloso laterítico (LG'). Já os solos de comportamento não lateríticos são subdivididos em: areia não laterítica (NA); solo arenoso não laterítico (NA'); solo siltoso não laterítico (NS'); solo argiloso não laterítico (NG').

Para classificação MCT foram realizados os ensaios Mini - MCV (*Moisture Condition Value*) e de perda de massa por imersão (DNIT 258 - ME, 2023). Os ensaios Mini - MCV e de perda de massa por imersão foram realizados pelo Laboratório de Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB.

A partir dos resultados dos ensaios Mini - MCV e de perda de massa por imersão (DNIT 258 - ME, 2023) é possível determinar os coeficientes c' e e' , que são empregados no gráfico de classificação MCT (Figura 32).

Figura 32 – Gráfico de classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1981)

O índice c' corresponde ao coeficiente angular do trecho retilíneo da curva de deformabilidade que se aproxima do valor Mini - MCV igual a 10. O coeficiente e' é obtido a partir do índice d' e da perda de massa por imersão (P_i), calculado de acordo com a Equação 16.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (16)$$

Onde: e' é um índice adimensional de classificação MCT; P_i é o percentual de massa perdida pelo corpo de prova quando submetido à imersão em água; d' é a

inclinação do trecho mais retilíneo do ramo seco da curva de compactação correspondente ao número de 12 golpes.

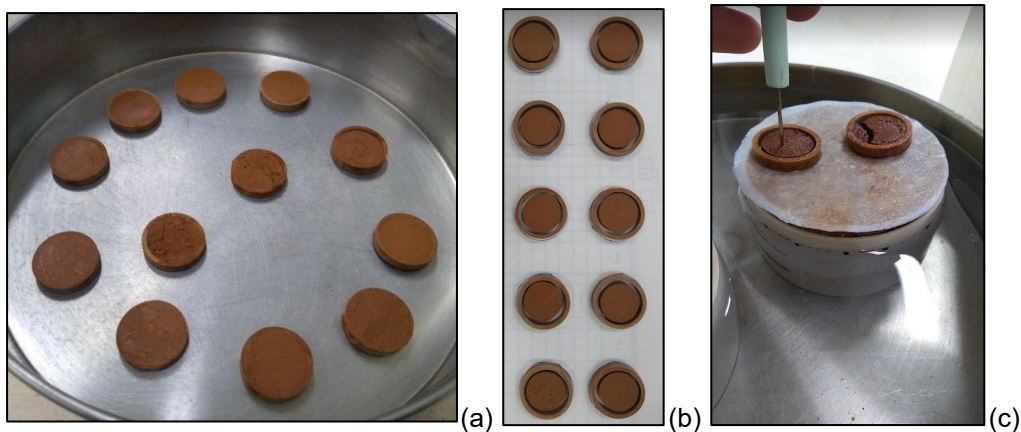
3.3.1.7 Método expedito de pastilhas

No intuito de simplificação dos procedimentos dos ensaios de classificação MCT para solos tropicais, Nogami e Villibor (1994) desenvolveram o método expedito de pastilhas. Neste método são avaliadas as propriedades de deformabilidade pela contração diametral quando as pastilhas são submetidas a secagem e pela expansão quando são submetidas à reabsorção de água. Também é verificada a resistência à penetração do solo durante a etapa de saturação das pastilhas (NOGAMI e VILLIBOR, 1994).

No ensaio as pastilhas foram moldadas em anéis com diâmetro de 20 mm e altura de 5,00 mm (Figura 33a) com solo passante na peneira nº200 e água destilada. Durante o processo de mistura a massa de solo foi espatulada até que apresentasse penetração de cerca de 1 mm, testada com minipenetrômetro. Após a moldagem as pastilhas foram submetidas a secagem em estufa à 60 °C (Figura 33b) para determinação da contração diametral (Cd).

Em seguida, as pastilhas foram submetidas à reabsorção de água através de sua disposição sobre pedra porosa saturada com superfície coberta por papel filtro (Figura 33c). Durante o período de saturação das pastilhas foram efetuadas leituras de penetração com minipenetrômetro nos tempos de 5, 15, 30, 120 minutos e 24 horas.

Figura 33 – Método de pastilhas: (a) pastilhas moldadas; (b) pastilhas após secagem; (c) etapa de saturação



Fonte: Autora (2023)

A partir da contração diametral (C_d) deve ser obtido o coeficiente c' , que é calculado conforme a Equação 17 para valores de C_d entre 0,10 e 0,5mm e pela Equação 18 quando C_d é maior que 0,60 mm.

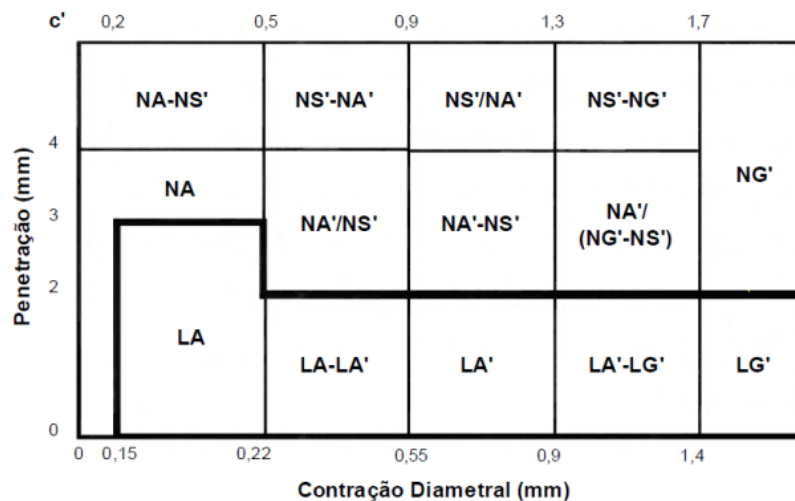
$$c' = \frac{(\log_{10} C_d + 1,0)}{0,904} \quad \text{para } 0,1 \leq C_d \leq 0,5 \text{ mm} \quad (17)$$

$$c' = \frac{(\log_{10} C_d + 0,7)}{0,5} \quad \text{para } C_d \geq 0,6 \text{ mm} \quad (18)$$

Onde: c' é um índice adimensional de classificação do método expedito de pastilhas; C_d é a contração diametral da pastilha.

De posse da contração diametral (C_d), c' e penetração é possível classificar o solo através do gráfico de classificação do método expedito de pastilhas (Figura 34).

Figura 34 – Gráfico de classificação do método expedito de pastilhas



Fonte: Nogami e Villibor (1996)

3.3.2 Ensaios hidromecânicos

3.3.2.1 Método padrão do papel filtro

O ensaio de papel filtro foi executado de acordo com a D5298-16 (ASTM, 2016), com objetivo de determinar a sucção total do solo. Por isso, foram empregados anéis espaçadores com altura de 5 mm para evitar o contato entre o solo e o papel filtro.

Foram ensaiadas amostras de solo moldadas na massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), conforme curvas de compactação obtidas para as energias EN,

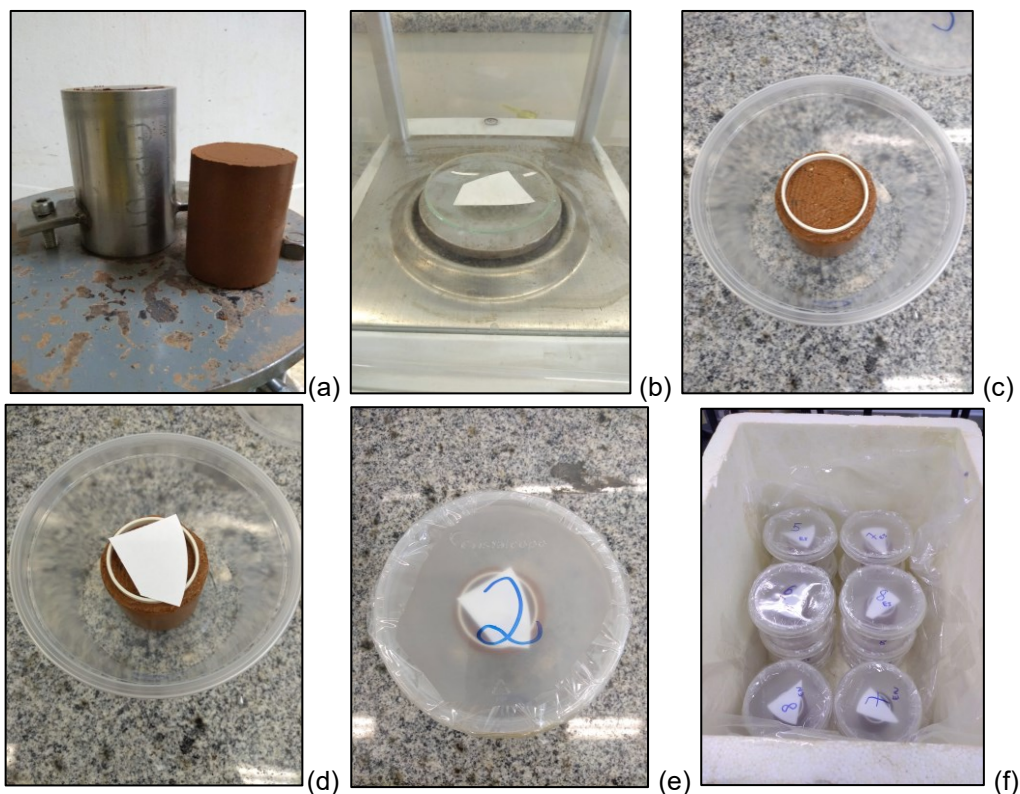
El e EM. As amostras foram compactadas no grau de saturação previamente definido Figura 35(a).

O papel filtro utilizado foi o whatman nº 42 (Figura 35b), que foi mantido em estufa a 60 °C até a montagem do ensaio. Para otimização do material, as folhas de papel filtro foram subdivididas com auxílio de tesoura em aço inoxidável.

Na execução do ensaio foi empregada balança analítica com precisão de 0,0001 g, para medidas de massa do papel filtro.

Na etapa inicial do ensaio, a amostra de solo foi disposta em recipiente plástico, e em seguida foi adicionado o anel espaçador sobre o solo, como pode ser observado na Figura 35c. Depois, com auxílio de pinça metálica, o papel filtro foi disposto sobre o espaçador (Figura 35d). No final, o recipiente foi rapidamente fechado com a tampa de vedação e fita adesiva para fixação (Figura 35e). Após o processo de montagem, as amostras foram armazenadas em caixas de isopor (Figura 35f) para período de estabilização, durante 21 dias.

Figura 35 – Etapas da realização do ensaio do papel filtro



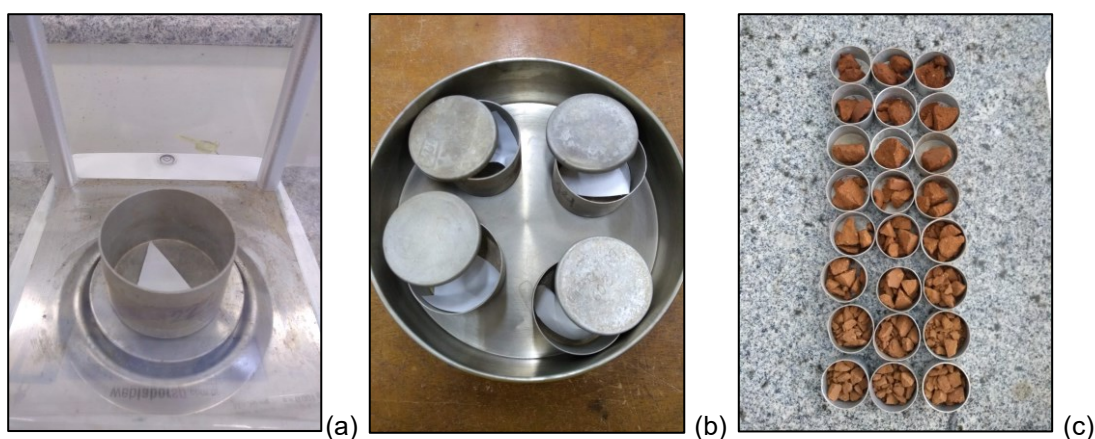
Fonte: Autora (2023)

Os recipientes, anéis espaçadores, pinça metálica e tesoura em aço inoxidável foram previamente higienizados com álcool etílico 92,8°, com intuito de evitar o crescimento de micro-organismos no papel filtro.

Após o período de estabilização os recipientes foram abertos, um de cada vez, e rapidamente determinada a massa úmida do papel filtro, de maneira a evitar a perda de umidade. Todo o processo de manuseio do papel filtro foi realizado com auxílio de pinça metálica.

Os papéis filtro (Figura 36a e b) e as amostras de solo (Figura 36c) foram secos em estufa a 100 °C e posteriormente determinadas a suas umidades.

Figura 36 – Determinação do teor de umidade após período de estabilização



Fonte: Autora (2023)

De posse da umidade do papel filtro (w_{pf}), é possível calcular o valor de sucção do solo, com base nas relações apresentadas na seção 2.2.2.1. A partir dos valores de sucção e dos teores de umidade volumétrica das amostras ensaiadas, é possível construir a curva característica de água no solo.

3.3.2.2 Ensaio de permeabilidade à carga variável

O ensaio de permeabilidade foi realizado de acordo com o procedimento B da NBR 14545 (ABNT, 2021), com objetivo de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga hidráulica variável. O procedimento fundamenta-se na lei de Darcy, sendo pressuposto a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de percolação e os gradientes hidráulicos. Também se admite a continuidade do escoamento, variações volumétricas do solo nulas, e a saturação total do corpo de prova (ABNT NBR 14545, 2021).

As amostras ensaiadas foram compactadas em 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³ e umidades ótimas, referente as curvas de compactação da EN, EI e EM. Após a preparação dos permeâmetros, ocorreu a fase de saturação do solo através da

percolação de água no sentido ascendente dos corpos de prova. A etapa foi considerada satisfatória após o surgimento de água na saída superior do permeâmetro, sem a presença de bolhas de ar, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021).

No ensaio (Figura 37) foram realizadas cinco medidas das cargas hidráulicas aplicadas, tempos decorridos e da temperatura da água que percola o solo. A temperatura ambiente de ensaio variou para cada corpo de prova, sendo considerada essa variação no cálculo do coeficiente de permeabilidade à 20 °C.

Figura 37 – Ensaio de permeabilidade à carga variável



Fonte: Autora (2023)

De posse dos coeficientes de permeabilidade saturada (k_{sat}) foi possível construir a curva de condutividade hidráulica, que relaciona a permeabilidade de um solo não saturado (k_w) com o correspondente grau de saturação ou umidade volumétrica para uma porosidade específica (BICALHO, MACHADO e GERSCOVICH, 2015; VANAPALLI e LOBBEZOO, 2002).

3.3.3 Ensaio de erodibilidade

3.3.3.1 Ensaio de Inderbitzen

As variáveis independentes adotadas no ensaio foram vazão, tempo, lâmina d'água, rugosidade da calha, inclinação, saturação, massa específica e dimensões do corpo de prova. Na Tabela 10 são apresentadas as referências de literatura para determinação das variáveis dependentes e independentes.

Tabela 10- Definição de variáveis

Condição	Variável	Dados	Referência
Independente	Vazão (Q)	7,50 l/min	Paiva (2004)
	Lâmina d'água (h)	1,00-2,00 mm	
	Tempo (T)	18 minutos	
	Rugosidade	Aço galvanizado (C=125)	Silva (2021)
	Dimensões do CP	$\phi=10$ cm; h=5 cm	
	Inclinação da rampa (d)	5°, 10° e 15°	
	Grau de saturação (Sr)	20%, 50%, 91,08%, 93,49% e 95,60%	Curva característica de água no solo; Almeida (2014)
Dependente	Massa específica aparente seca do CP (ρ_d)	1,48 g/cm ³ , 1,57 g/cm ³ e 1,66 g/cm ³	Curva de compactação
	Perda de solo (PS)	Material coletado na peneira nº 200	Bastos (1999)
	Tensão hidráulica (σ_h)	Relação de γ_w , h e d	
	Tensão cisalhante crítica (σ_c)	Relação entre PS e σ_h	
	Erodibilidade (K)	Relação entre PS e σ_h	

Fonte: Autora (2023)

Como observado na Tabela 10, as variáveis definidas como dependentes e independentes possuem como referência pesquisas como de Silva (2021), Almeida (2014), Paiva (2004) e Bastos (1999). Os critérios estabelecidos pelos autores foram avaliados e realizadas adaptações nos parâmetros para reprodução do ensaio no laboratório de geotecnia da UTFPR.

Os corpos de prova foram moldados na massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), de acordo com as curvas de compactação obtidas para a EN, EI e EM. Os teores de umidade dos corpos de prova foram definidos com base na curva característica de água no solo, conforme constatações da pesquisa de Almeida (2014). A partir das curvas características foram escolhidos os graus de saturação nos trechos: zona de efeito de borda (91,08%, 93,49% e 95,60%); zona de transição (50%); e zona de transição próximo da zona residual (20%).

Desta forma, os corpos de prova possuem nove condições de moldagem, sendo três graus de saturação para cada massa específica aparente seca (1,48, 1,57 e 1,66 g/cm³), a serem ensaiados em três inclinações (5°, 10° e 15°). Além disso, foram realizadas quatro repetições por condição de ensaio, que totalizam cento e oito amostras (Tabela 11).

Tabela 11- Condição de moldagem dos corpos de prova

ρ_d (g/cm ³)	Grau de saturação (%)			Inclinação
1,48	91,08	50	20	5° 10° 15°
1,57	93,49	50	20	5° 10° 15°
1,66	95,60	50	20	5° 10° 15°
Total de análises			27	
Total de CP*			108	

Nota: (*) ensaios realizados em quadruplicata.

Fonte: Autora (2023)

Para moldagem dos corpos de prova foi empregado o colarinho do cilindro de compactação *Proctor*. Os corpos de prova foram moldados com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. O tipo de molde foi escolhido por proporcionar que as amostras fossem moldadas nas dimensões preestabelecidas e pela sua rigidez, que diminui a taxa de deformações ao corpo de prova. Além disso, também apresenta a facilidade de acoplamento do corpo de prova à estrutura do equipamento,

Os corpos de prova foram compactados em camada única com auxílio de prensa hidropneumática, apresentada na Figura 38.

Figura 38 – Prensa de compactação



Fonte: Autora (2023)

Após a compactação (Figura 38) cada corpo de prova teve a massa medida e foi embalado com papel filme de PVC. Os corpos de prova embalados foram armazenados em caixas de isopor para evitar a perda de umidade até a realização do ensaio.

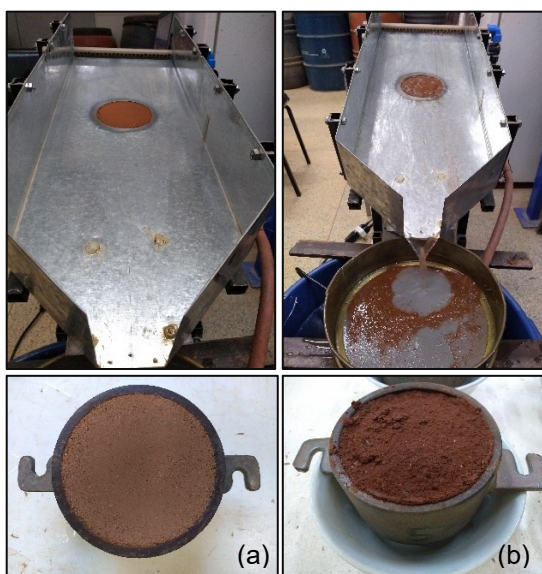
Na etapa prévia de realização do ensaio foi instalado o rotâmetro na junção entre a tubulação rígida e flexível; depois foi conectada a bomba e disposta dentro do reservatório com água; em seguida a peneira nº 200 foi sobreposta ao reservatório.

Após a etapa anterior, os corpos de prova foram instalados, de maneira que a superfície da amostra coincidissem com a superfície superior da calha (Figura 39a). Antes de iniciar o tempo de ensaio, a bomba foi acionada e permitido que a calha fosse molhada para uniformização, nesta etapa o corpo de prova foi protegido com folha plástica. Então, o cronômetro foi acionado para início do ensaio, e a peneira nº 200 foi trocada nos tempos de 2, 4, 6, 10 e 18 minutos.

Durante o ensaio, as leituras de altura da lâmina d'água foram realizadas com régua graduada posicionada em diferentes pontos ao longo da superfície de escoamento. A densidade da água do reservatório foi medida com densímetro (faixa de 0.995 - 1.005 g/cm³) à temperatura ambiente de 25 °C. Os valores de vazão aplicada foram monitorados em tempo real pelo serial do programa Arduino.

O ensaio de Inderbitzen em andamento é visualizado na Figura 39b, sendo finalizado no tempo de 18 minutos. Após o ensaio os corpos de prova foram pesados e secos em estufa à 100 °C durante 24 horas, a fim de determinar o seu teor de umidade e a massa final de sólidos.

Figura 39 – Ensaio de Inderbitzen: (a) antes do ensaio; (b) após o ensaio



Fonte: Autora (2023)

O material erodido durante o ensaio foi lavado na peneira nº 200 e levado para estufa à 100 °C durante 24 horas, no intuito de obter a massa seca retida. Após o período em estufa, foi determinada a massa de areia retida na peneira nº 200 com balança de precisão 0,01 g, e realizado o peneiramento na sequência de peneiras: nº 10, nº 16, nº 30, nº 40, nº 50, nº 100 e nº 200 (ABNT NBR 7181, 2016).

De posse da massa retida na peneira nº 200 e da massa seca do corpo de prova após ensaio é possível calcular a perda de solo acumulada ao longo do tempo de ensaio (10^{-2} g/cm²), como descrito na Equação 19 baseada na proposta de Almeida *et al.* (2013).

$$PS = 100 \sum_{t=0}^n \left[\frac{(100 * M_{n^{\circ}200}) / (100 - \text{Curva}_{\text{pass}, n^{\circ}200})}{A_{CP}} \right]_t \quad (19)$$

Onde: PS é a perda de solo acumulada ao longo do tempo de ensaio (10^{-2} g/cm²); $M_{n^{\circ}200}$ é a massa de solo seco retido na peneira nº 200 no tempo t (g); $\text{Curva}_{\text{pass}, n^{\circ}200}$ é o percentual passante na peneira nº 200 da curva granulométrica; A_{CP} é a área do corpo de prova exposta ao escoamento superficial (cm²).

Com os valores de PS (10^{-2} g/cm²/min) e τ_h (Pa) foi possível obter o parâmetro de erodibilidade do solo, K (g/cm²/min/Pa) com base na regressão linear dos pontos [τ_h , PS], em que o coeficiente angular da reta representa o parâmetro K (Bastos *et al.*, 2001).

3.3.4 Análise estatística

Os resultados laboratoriais são suscetíveis a erros aleatórios, que podem ser causados por fontes de variação durante os procedimentos experimentais, como falhas em leituras ou mau funcionamento de equipamentos. Neste sentido, os resultados obtidos nos ensaios do método do papel filtro, permeabilidade à carga variável, e Inderbitzen foram submetidos a tratamentos estatísticos a nível de confiança de 68% e 95%.

De maneira a identificar possíveis dados espúrios nos conjuntos de amostras, foi construído o intervalo de confiança à 68% empregando a média e desvio padrão dos resultados. Posterior a análise, foram calculados os erros sistemáticos (equipamentos) e aleatórios das leituras de cada ensaio. O erro padrão (e_p) dos resultados foi calculado a partir do desvio padrão da amostra dividido pela raiz

quadrada do número de amostras. O resultado é multiplicado pelo fator de correção t Student correspondente ao número de amostras analisadas, como descrito na Equação 20.

$$e_p = (t_{\alpha/2, n-1}) \frac{\sigma_p}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

Onde: $t_{\alpha/2, n-1}$ é o fator de correção t Student; α é o nível de significância da análise; n é o número de amostras; e σ_p é o desvio padrão da amostra.

O erro final dos resultados foi obtido a partir da combinação entre o erro padrão e o erro sistemático dos equipamentos (Equação 21).

$$\text{erro}_{\text{final}} = \sqrt{e_p^2 + e_s^2} \quad (21)$$

Onde: e_p é o erro padrão; e_s é o erro sistemático do equipamento utilizado no ensaio.

No intuito de avaliar o efeito de cada tratamento (densidade, saturação e inclinação) na perda de massa de solo (variável resposta), foi realizada a análise de variância (ANOVA) em três fatores (multifatorial). A ANOVA parte do pressuposto da decomposição da variabilidade total da variável resposta, em componentes associadas ao efeito dos tratamentos (grupo) e ao erro aleatório (RIBEIRO e CATEN, 2003).

Na análise é considerada a soma dos quadrados da decomposição dos resíduos total (SQT), do grupo (SQG) e aleatório (SQR) (Tabela 12). A média quadrada do grupo (MQG) e do resíduo (MQR) é aplicada no Teste F de Fisher-Snedecor, com significância de 5%.

Tabela 12- Análise de variância (ANOVA)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Teste F
Tratamento (grupo)	SQG	(K-1)	MQG	MQG/MQB
Resíduo (dentro do grupo)	SQR	(N-K)	MQR	
Total	SQT	N-1		

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (2003)

O Teste F é empregado na verificação da significância dos fatores analisados, sendo consideradas duas hipóteses: não existe efeito significativo do fator ($H_0 = 0$); há efeito significativo do fator analisado na variável resposta ($H_1 \neq 0$). O retorno de

$F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ rejeita a hipótese nula, e confirma-se que existe efeito significativo do fator analisado (RIBEIRO e CATEN, 2003).

Após a ANOVA, foi realizado a comparação múltipla de médias através do Teste de Tukey, a fim de determinar quais grupos são diferentes estatisticamente a nível de confiança de 95%.

O Teste de Tukey e a regressão múltipla não linear para construção de superfícies de reposta, pelo Modelo Gaussiano, foram realizados no *software Sigmaplot*. As regressões lineares considerando erros associados foram realizadas no *software Origin*. A ANOVA e demais cálculos estatísticos foram realizados no *software Excel*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa foram divididos em: ensaios de caracterização do solo, ensaios de compactação, análise morfológica, método padrão do papel filtro, ensaio de permeabilidade à carga variável e ensaio de erodibilidade.

4.1 Ensaios de caracterização

Os resultados referentes aos ensaios de limites de liquidez (LL), plasticidade (LP), massa específica dos grãos (ρ_s), classificação SUCS, classificação MCT e composição química estão dispostos na Tabela 13.

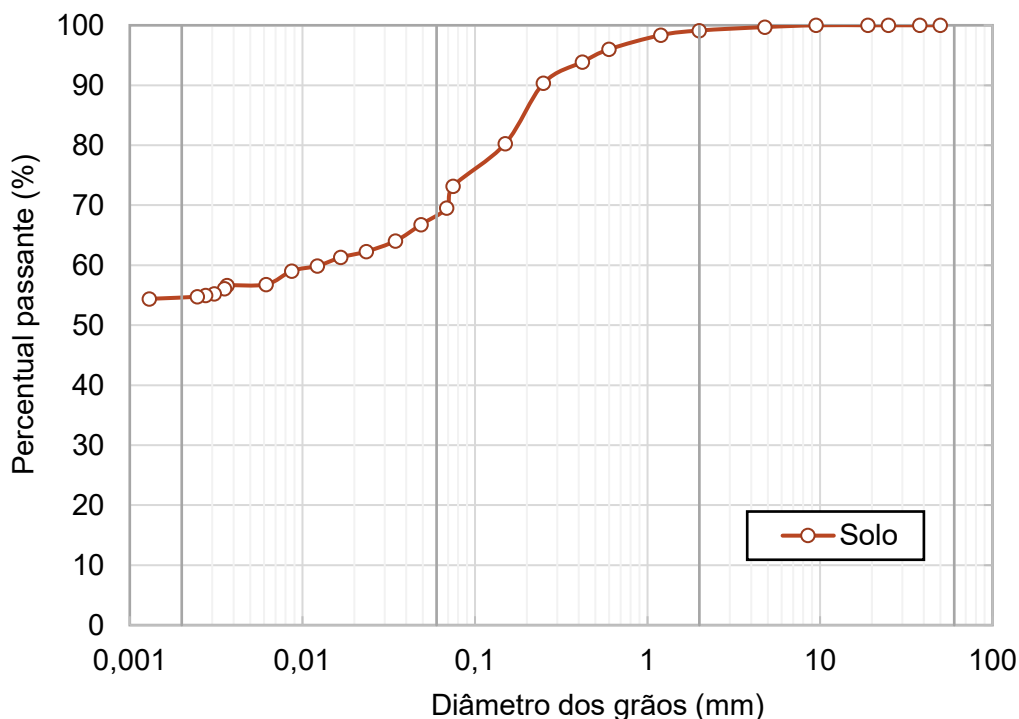
Tabela 13- Características físico-químicas do solo utilizado

Propriedade	Valor	Referência
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,66	ABNT NBR 6458
Limite de liquidez (%)	56	ABNT NBR 6459
Limite de Plasticidade (%)	41	ABNT NBR 7180
Índice de Plasticidade (%)	15	-
Classificação SUCS	MH	ASTM D2487-17
Classificação MCT	LG'	Nogami e Villibor (1981)
Composição química	Percentual	
SiO ₂	54,04	
Al ₂ O ₃	34,03	
SO ₃	5,27	
CaO	2,12	
K ₂ O	2,00	
Fe ₂ O ₃	1,63	
TiO ₂	0,96	

Fonte: Autora (2023)

A análise granulométrica do solo foi realizada através de peneiramento para fração grossa (diâmetros > 0,075 mm) e sedimentação para fração fina (diâmetros < 0,075 mm). A partir dos resultados foi construída a curva de distribuição granulométrica do solo argiloso vermelho (Figura 40).

Figura 40 – Curva granulométrica do solo



Fonte: Autora (2023)

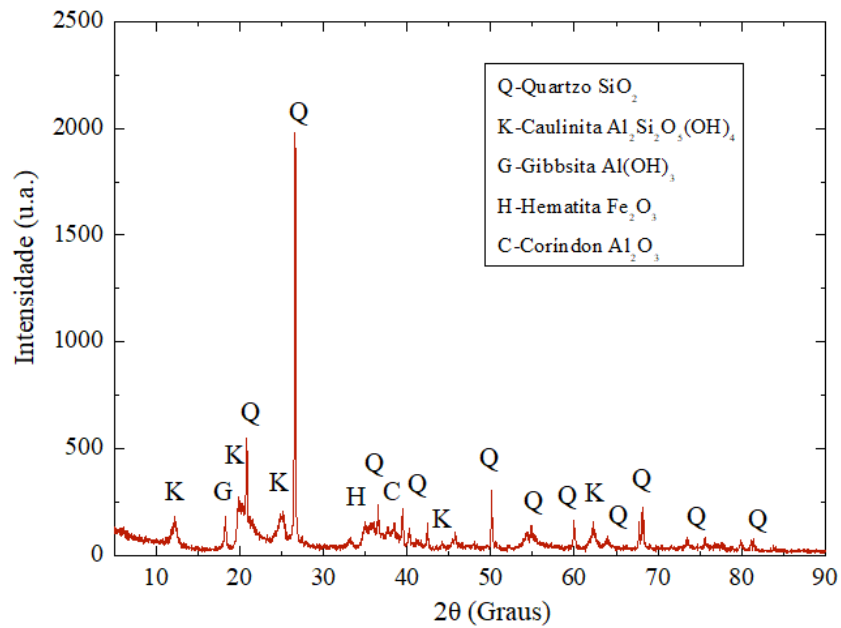
De acordo com a curva granulométrica (Figura 36) o solo possui 0,88% de pedregulho (diâmetro: 60 – 2 mm), 29,58% de areia (diâmetro: 2 - 0,06 mm), 14,80% de silte (diâmetro: 0,06 - 0,002 mm) e 54,74% de argila (diâmetro < 0,002mm).

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D2487-17, 2017) o solo é classificado como um silte inorgânico de alta plasticidade (MH), que diverge do resultado obtido no ensaio de granulometria, em que o percentual da fração argila é de 54,74%. A discrepância nos resultados da classificação de solos tropicais brasileiros através do SUCS é evidenciada por Nogami e Villibor (1995), que retratam que o sistema foi desenvolvido com base em propriedades de solos de clima temperado.

Na análise por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), os principais compostos químicos presentes no solo são o dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) (Tabela 13).

A composição mineralógica do solo foi analisada por difração de raios-X (DRX), na qual foram identificados os minerais quartzo, caulinita, gibbsita, hematita e coríndon (Figura 41). A presença de mineral gibbsita e argilomineral caulinita em solos da Formação Guabirotuba também foi identificada por Oliveira *et al.* (2011).

Figura 41 – Composição mineralógica do solo

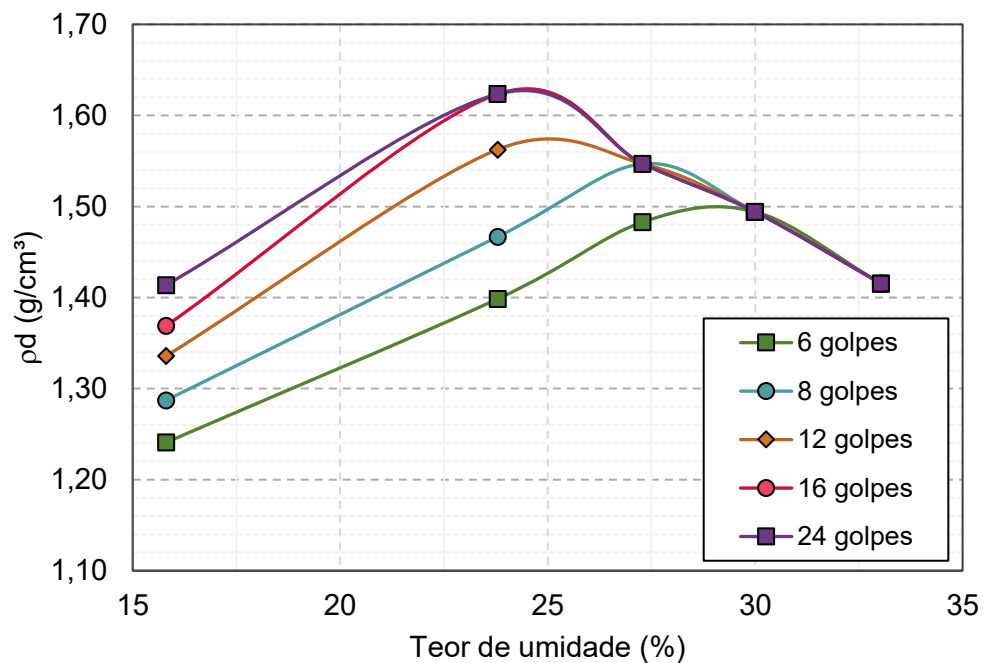


Fonte: Autora (2023)

4.2 Classificação MCT e método expedito de pastilhas

O ensaio Mini - MCV foi realizado de acordo com DNIT 258-ME (DNIT, 2023). As curvas de compactação obtidas para 6, 8, 12, 16 e 24 golpes são apresentadas na Figura 42.

Figura 42 – Curva de compactação do ensaio Mini - MCV



Fonte: Autora (2023)

De posse dos corpos de prova compactados no ensaio Mini - MCV foi realizado o ensaio de perda de massa por imersão, conforme DNIT 258-ME (DNIT, 2023).

A partir dos resultados dos ensaios Mini - MCV e de perda de massa por imersão (P_i) foram determinados os coeficientes c' e e' para classificação MCT do solo (Tabela 14).

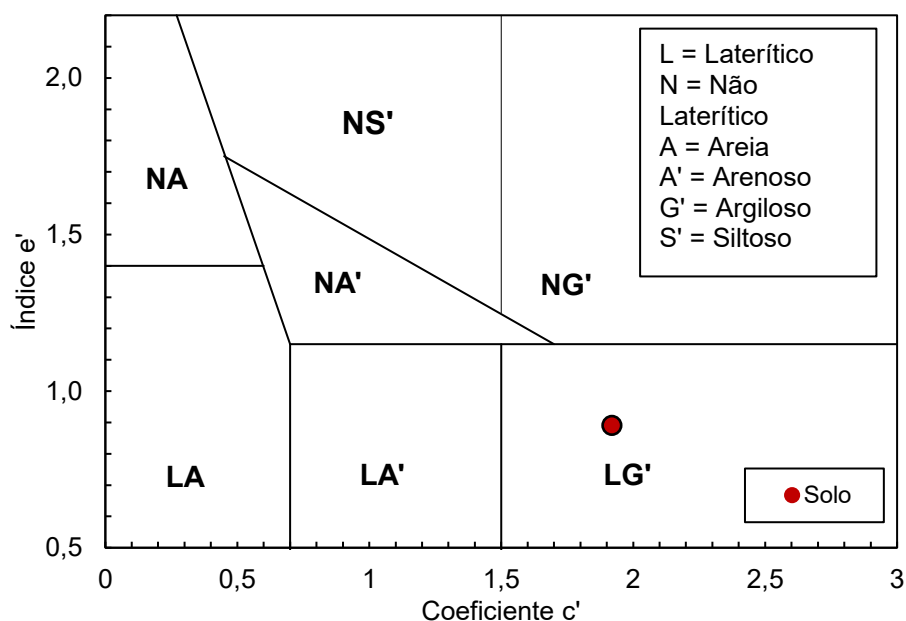
Tabela 14- Resultados dos ensaios Mini - MCV e perda de massa por imersão

c'	P_i (%)	d' (kg/m ³ %)	e'
1,92	0,10	28,39	0,89

Fonte: Autora (2023)

Na Figura 43 é possível observar que o solo utilizado na pesquisa pertence ao grupo dos solos argilosos lateríticos (LG'). A classificação LG' é coerente com o resultado do ensaio de granulometria, em que foi verificado um percentual de fração argila de 54,74%. Além disso, a partir da classificação MCT observa-se a divergência de resultado apresentado pela SUCS, em que enquadrou o solo como MH.

Figura 43 – Classificação MCT



Fonte: Adaptado de Nogami e Villibor (1981)

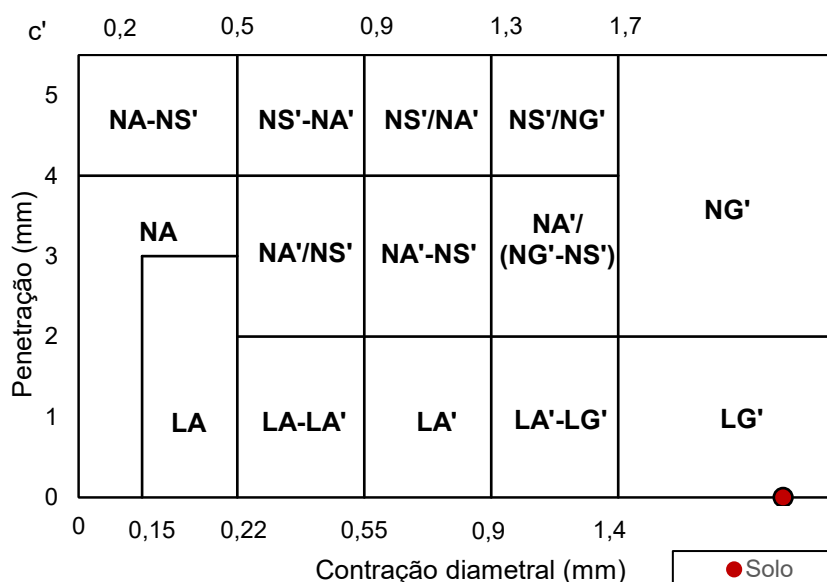
No método expedito de pastilhas foram ensaiadas 10 amostras para determinação de C_d , c' e penetração. Os resultados obtidos no método de pastilhas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15- Resultados do método expedito de pastilhas

nº Pastilha	Cd	c'	Penetração (mm)
1	2,39	2,16	0,00
2	2,39	2,16	0,00
3	2,71	2,26	0,00
4	2,76	2,28	0,00
5	2,53	2,21	0,00
6	2,63	2,24	0,00
7	2,77	2,28	0,00
8	2,54	2,21	0,00
9	2,49	2,19	0,00
10	2,31	2,13	0,00
Média	2,57	2,22	0,00
Desvio padrão	0,16	0,06	0,00

Fonte: Autora (2023)

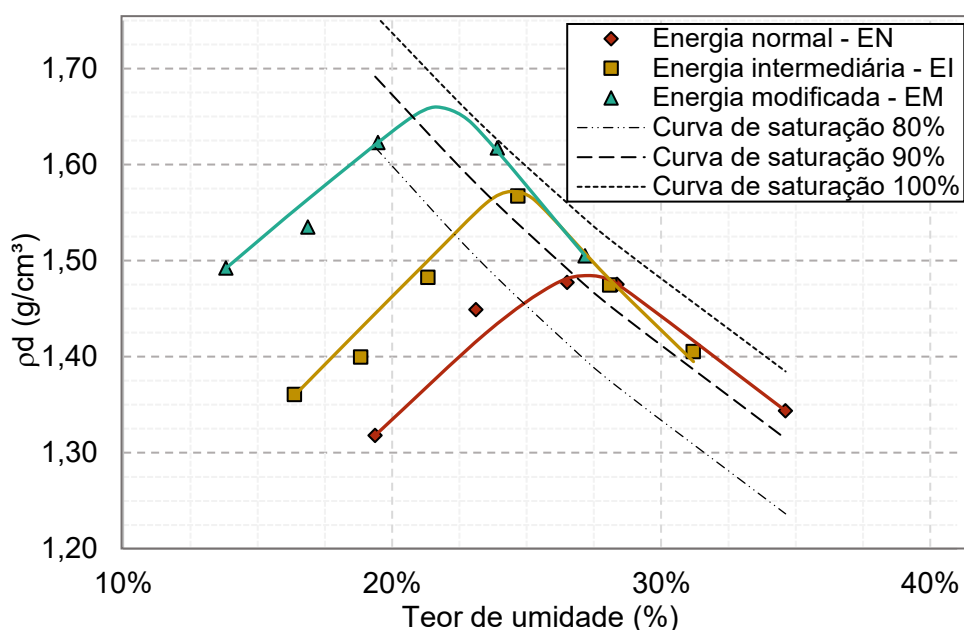
A partir dos resultados de Cd, c' e penetração o solo foi classificado como solo argiloso laterítico (LG') (Figura 44). A classificação obtida pelo método expedito de pastilhas é corroborada pelo resultado da classificação MCT, que se mostra uma alternativa viável para classificação de solos tropicais.

Figura 44 – Classificação expedita**Fonte: Adaptado de Nogami e Villibor (1996)**

4.3 Ensaios de compactação

Para obtenção dos parâmetros ótimos de compactação do solo ($w_{ótima}$, $\rho_{dmáx}$) foi realizado o ensaio de compactação nas energias normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM), conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016). As curvas de compactação obtidas são apresentadas na Figura 45.

Figura 45 – Curvas de compactação nas energias normal, intermediária e modificada



Fonte: Autora (2023)

Da curva de compactação na energia normal, a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) é 1,48 g/cm³ e o teor de umidade ótima ($w_{ótima}$) é 27,30%. Na energia intermediária $\rho_{dmáx}$ é 1,57 g/cm³ e $w_{ótima}$ é 24,40%. Já na energia modificada $\rho_{dmáx}$ é 1,66 g/cm³ e $w_{ótima}$ é 21,65% (Figura 45).

A Tabela 16 sumariza os resultados de massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$), teor de umidade ótima ($w_{ótima}$), grau de saturação ótima ($S_{rótima}$), índice de vazios (e) e porosidade (n) para o solo compactado nas energias normal, intermediária e modificada.

Tabela 16- Características do solo compactado em EN, EI e EM

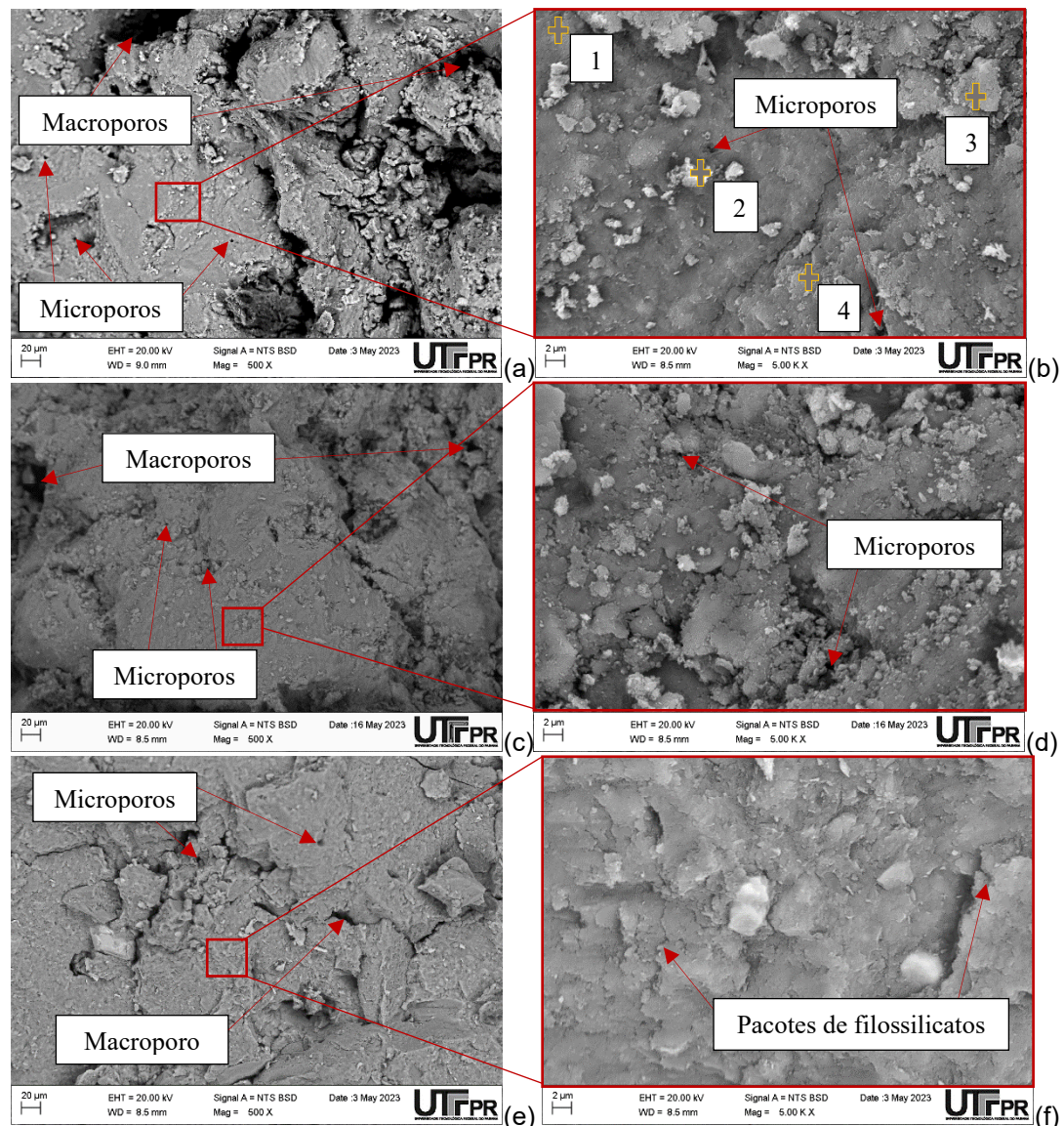
Energia	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	$w_{ótima}$ (%)	$S_{rótima}$ (%)	e	n (%)
EN	1,48	27,30	91,08	0,797	44
EI	1,57	24,40	93,49	0,694	41
EM	1,66	21,65	95,60	0,602	38

Fonte: Autora (2023)

4.4 Análise morfológica

A microestrutura do solo compactado na massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima, referente as curvas de compactação EN, EI e EM, foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram analisadas com ampliação de 500x e 5000x (Figura 46).

Figura 46 – Microestrutura do solo compactado nos parâmetros da curva de compactação de (a)EN em 500x; (b)EN em 5000x; (c)EI em 500x; (d)EI em 5000x; (e)EM em 500x; (f)EM em 5000x



Fonte: Autora (2023)

Na avaliação morfológica, constata-se que o solo compactado em ρ_{dmax} e $w_{ótima}$ de EN (Figura 46a e b) apresenta poros bem definidos em comparação ao solo compactado nos parâmetros de EI e EM. A morfologia de EM (Figura 46e e f) com

aspecto de menor porosidade em relação a EI e EN, ocorre devido ao menor índice de vazios pelo aumento da massa específica do solo (Milani *et al.* 2022). Além disso, na análise microestrutural também se constata a presença de pacotes de filossilicatos, pela forma de distribuição laminar. O mineral possivelmente deve ser pertencente ao grupo da caulinita, que coincide com o resultado da classificação mineralógica (Seção 4.1).

Em análise conjunta ao MEV, a caracterização química do solo também foi avaliada por espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) (Tabela 17). A avaliação indica a presença dos elementos oxigênio, alumínio, silício, potássio, titânio e ferro que coincide com os resultados obtidos por FRX.

Tabela 17- A composição química obtida na análise de EDS do solo

Ponto	O	Al	Si	K	Ti	Fe	Total
1	59,33	16,81	17,77	0,32	0,84	4,93	100,00
2	55,83	19,31	16,74	0,31	1,37	6,43	100,00
3	48,20	18,28	18,45	0,19	1,03	13,83	100,00
4	59,77	17,85	17,37	0,28	0,73	4,00	100,00

Fonte: Autora (2023)

4.5 Método padrão do papel filtro

Na pesquisa, as curvas características de água no solo (CCAS) foram construídas a partir dos dados experimentais obtidos no método padrão do papel filtro (ASTM, D 5298 – 16, 2016), sendo expressas pela sucção (S) versus teor de umidade volumétrica (θ). No método foram ensaiadas amostras de solo moldado na massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) referente as curvas de compactação da EN (1,48 g/cm³), EI (1,57 g/cm³) e EM (1,66 g/cm³). O teor de umidade para moldagem variou conforme o grau de saturação imposto para cada amostra.

Na seção 2.2.2.2 foram apresentadas algumas das equações matemáticas propostas na literatura para ajuste de curvas características, sendo destacado os modelos de Van Genuchten (1980) e Fredlund and Xing (1994). No ajuste de CCAS foram empregadas as equações de Van Genuchten (1980) e Fredlund and Xing (1994), para curvas unimodais, e Dual-Van Genutchen (SEKI, 2007) para ajuste de curvas características bimodais.

Na Tabela 18 está sumarizado o conjunto de resultados obtidos no método do papel filtro, após tratamento estatístico de dados espúrios com 68% de confiança.

Também são apresentados os valores de teor de umidade volumétrica, sucção, parâmetros de ajuste dos modelos e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos em cada CCAS.

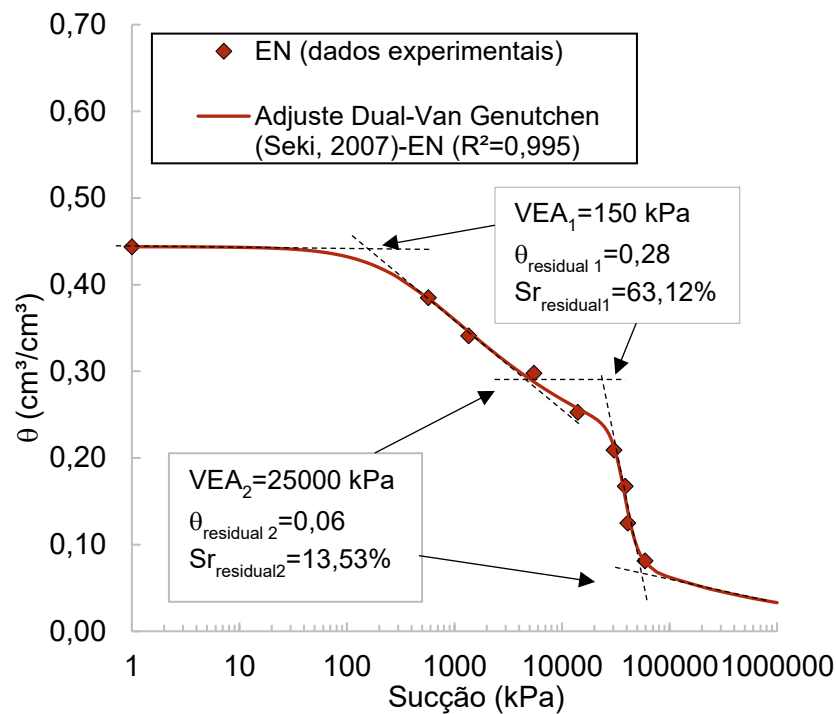
Tabela 18- Resultados do método do papel filtro e parâmetros de ajuste CCSA

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	w _{pf} (%)	Sucção (kPa)	θ (cm ³ /cm ³)	Modelo	Parâmetros	R^2
1,48	5,53	7,12	59226,07	0,08		θ_s 0,44	
	8,45	9,17	40993,68	0,13		θ_r 0,00	
	11,30	9,47	38853,08	0,17		w1 0,85	
	14,13	10,83	30420,69	0,21	Dual - Van	α_1 0,01	
	17,07	15,13	14061,94	0,25	Genutchen	n1 1,27	0,995
	20,12	20,36	5505,85	0,30	(Seki. 2007)	α_2 2,70x10 ⁻⁵	
	23,04	28,17	1355,95	0,34		n2 7,28	
	26,01	32,98	572,45	0,38		m1 0,22	
1,57						m2 0,86	
						θ_s 0,41	
	5,55	7,16	58806,13	0,09	Fredlund	θ_r 8,00 x10 ⁻³	
	7,41	10,36	33095,99	0,12	and Xing	a 1,30x10 ⁸	0,921
	10,06	9,23	40572,76	0,16	(1994)	m 1950	
	12,68	9,96	35585,88	0,20		n 0,85	
	15,05	11,13	28821,97	0,24		θ_s 0,41	
	17,43	14,60	15481,53	0,27	Van	θ_r 5,00 x10 ⁻³⁰	
1,66	19,88	21,19	4744,28	0,31	Genutchen	a 6,57x10 ⁻⁵	0,889
	23,29	25,40	2231,45	0,37	(1980)	m 0,57	
						n 1,85	
						θ_s 0,38	
	4,82	6,05	71706,59	0,08	Fredlund	θ_r 1,00 x10 ⁻³	
	7,62	14,76	15032,00	0,13	and Xing	a 7,41x10 ³	0,848
	10,02	11,39	27526,83	0,17	(1994)	m 1,50	
	11,43	14,13	16846,75	0,19		n 1,12	
1,66	15,86	13,81	17846,37	0,26		θ_s 0,38	
	18,32	19,66	6245,27	0,30	Van	θ_r 1,00 x10 ⁻³	
	21,35	24,14	2793,80	0,35	Genutchen	a 2,32x10 ⁻⁴	0,850
					(1980)	m 1,59	
						n 0,37	
						θ_s 0,38	

Fonte: Autora (2023)

Os modelos de Van Genuchten (1980), Fredlund and Xing (1994) e Dual-Van Genutchen (Seki, 2007) forneceram um bom ajuste dos dados experimentais e uma adequada representação do trecho de dessaturação do solo, como também constatado por Liu *et al.* (2023), Albadri *et al.* (2021), Zhou *et al.* (2021), e Azmi *et al.* (2019). Nas figuras 47, 48 e 49 são apresentadas, respectivamente, as CCAS obtidas para o solo compactado em 1,48 g/cm³ (CC-EN), 1,57 g/cm³ (CC-EI) e 1,66 g/cm³ (CC-EM).

Figura 47 – Curva característica para o solo compactado em 1,48 g/cm³ (CC-EN)



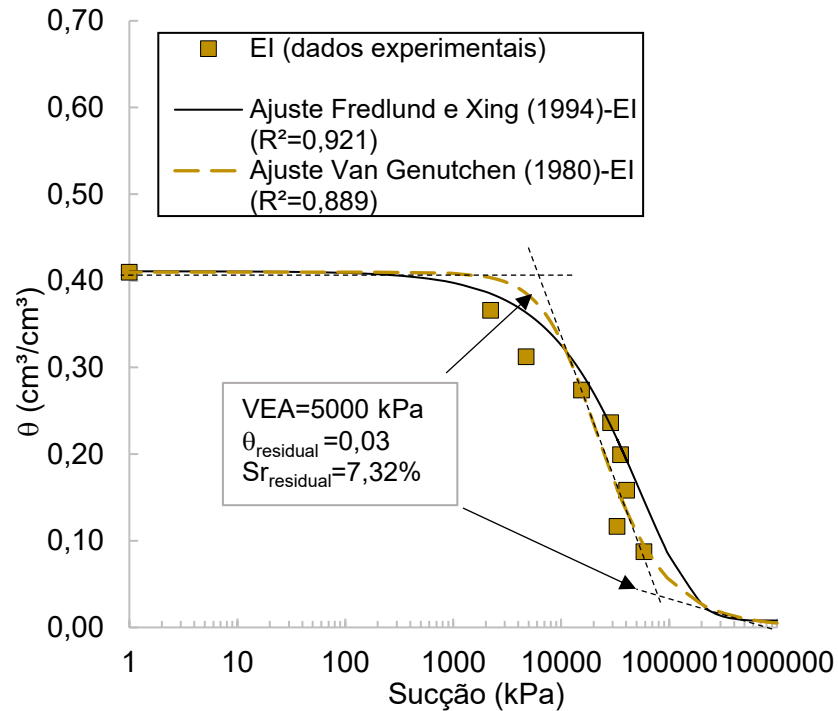
Fonte: Autora (2023)

Na CC-EN o modelo Dual-Van Genutchen (SEKI, 2007) se ajustou adequadamente aos valores experimentais, com coeficiente de ajuste R² de 0,995 (Figura 47). A curva ajustada possui formato bimodal, que indica uma distribuição heterogênea de poros (macroporos e microporos), como observado por Oliveira *et al.* (2022), Delcourt *et al.* (2022), Li *et al.* (2014), Miguel e Bonder (2012) e Feuerharmel (2007).

No ajuste da CC-EI (Figura 48) inicialmente foram empregados os modelos de Van Genutchen (1980) e de Fredlund e Xing (1994), que apresentaram coeficientes de ajuste de 0,889 e 0,921, respectivamente. O modelo matemático Fredlund e Xing (1994) apresentou maior R², entretanto para previsão das curvas de condutividade

hidráulica (Seção 4.5) será empregado o modelo Van Genutchen (1980). A CC-EI apresenta formato unimodal, que confere a uma distribuição de poros homogênea (FEUERHARMEL, 2007).

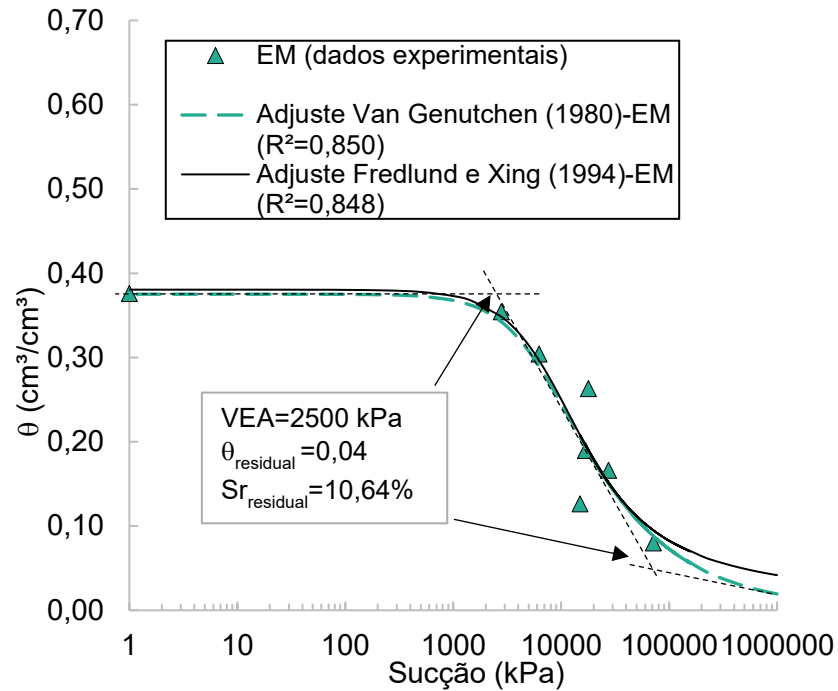
Figura 48 – Curva característica para o solo compactado em 1,57 g/cm³ (CC-EI)



Fonte: Autora (2023)

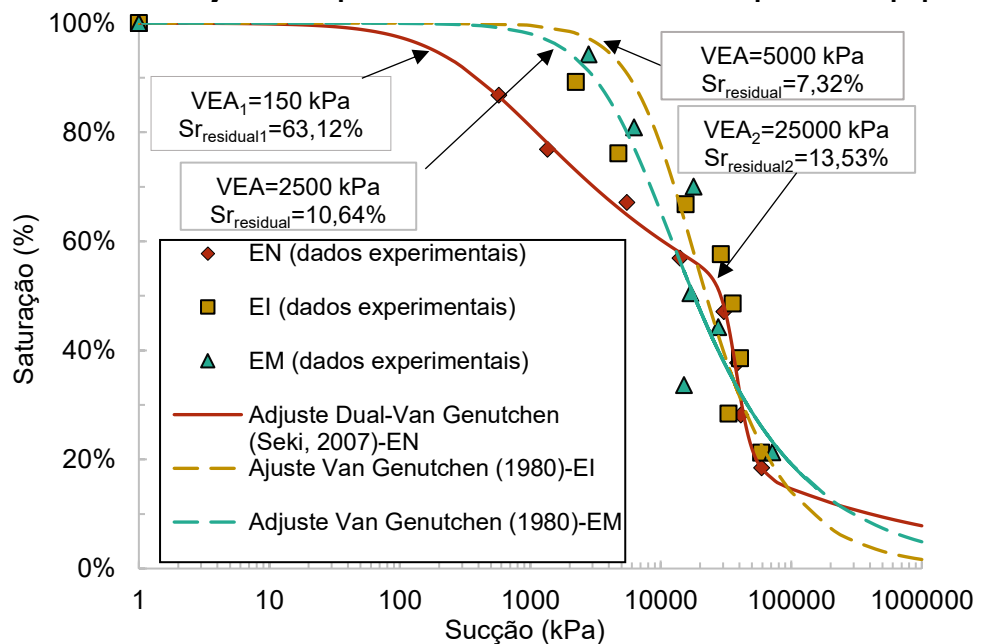
Assim como em CC-EI, o ajuste da CC-EM (Figura 49) foi primeiramente avaliado pelos modelos de Van Genutchen (1980) e de Fredlund e Xing (1994), com coeficientes de ajuste de 0,850 e 0,848, respectivamente. O modelo matemático Van Genutchen apresentou maior R^2 e foi, portanto, escolhido para representar a CC-EM. A curva característica de EM também possui a tendência de distribuição de poros homogênea, pelo formato unimodal (FREDLUND, RAHARDJO e FREDLUND 2012).

Figura 49 – Curva característica para o solo compactado em 1,66 g/cm³ (CC-EM)



Todos os modelos avaliados apresentaram bom ajuste em relação aos dados experimentais. Assim como verificado por Azmi *et al.* (2019) os modelos Van-Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) fornecem ajustes otimizados dos dados experimentais, com retorno de razoáveis coeficientes de determinação (R^2). Na Figura 50 é possível observar as três CCAS ajustadas selecionadas para as análises de condutividade hidráulica e erodibilidade, que serão discutidas nas seções 4.5 e 4.6.

Figura 50 – SWCC ajustado a partir dos resultados do método padrão do papel filtro



A alteração do formato bimodal para unimodal em CC-EI e CC-EM representa a tendência de redução do tamanho dos poros com aumento da massa específica aparente seca. O aumento da densidade de compactação reduz o índice de vazios do solo e pode conferir uma redução considerável da taxa de macroporos (diâmetro de poro $> 12 \mu\text{m}$) e aumento da taxa de poros intermediários ($0,15 \mu\text{m} < \text{diâmetro} < 10 \mu\text{m}$). Já o percentual de microporos tende a permanecer constante ($< 0,15 \mu\text{m}$), devido a serem caracterizados como vazios presentes no interior dos agregados do solo (LI *et al.*, 2023; MA, 2017).

Neste sentido, conforme as pesquisas de Li *et al.* (2023), Xiao *et al.* (2022) e Xu *et al.* (2021), pode ser inferido que o solo compactado em EI e EM teve redução da taxa de macroporos e aumento do percentual de poros intermediários, o que conferiu uma possível distribuição mais homogênea de poros, e consequentemente curvas características no formato unimodal.

O trecho de dessaturação de CCAS representa a faixa de drenagem da estrutura do solo com aumento da sucção, na qual a fase ar passa a ser contínua. O processo de drenagem da estrutura de poros heterogênea ocorre primeiro nos macroporos e, à medida que a sucção aumenta, os microporos passam a serem drenados (FEUERHARMEL, 2007). Neste caso, o trecho de macroporos em CC-EN apresenta valor de entrada de ar (VEA_1) de 150 kPa, e a distribuição dos microporos apresenta valor de entrada de ar (VEA_2) de 25000 kPa. A ocorrência de dois valores de entrada de ar em CC-EN no formato bimodal também foi observada por Oliveira *et al.* (2022), que avaliaram as curvas características de solos tropicais em diferentes densidades.

Em CC-EN o trecho de dessaturação dos macroporos está na faixa de sucção 150 - 10000 kPa, sendo a sua inclinação mais acentuada do que o trecho de dessaturação dos microporos, faixa de 25000 - 60000 kPa. A inclinação mais acentuada indica um maior teor de umidade volumétrica a ser drenado dos macroporos, já o ramo dos microporos necessita uma faixa de sucção mais elevada para sua drenagem. Essa característica também é observada por Li *et al.* (2014), que previu CCAS bimodais e funções de permeabilidade com parâmetros relacionados.

O valor de entrada de ar corresponde ao máximo valor de sucção que os poros do solo suportam sem serem drenados, ou seja, sem que ocorra continuidade da fase ar (GITIRANA JR., MARINHO e SOTO, 2015). No caso de CC-EI, o VEA é de 5000 kPa e de 2500 kPa para CC-EM. O trecho de dessaturação em CC-EI está na faixa

de 5000 - 80000 kPa e de 2500 - 90000 kPa em CC-EM, que apresenta maior inclinação.

No trecho residual, a água presente nos poros encontra-se no estado de vapor, sendo necessários elevados valores de sucção para drenagem dos poros. Neste estágio, como o fluxo não ocorre no estado líquido, a fase água passa a ser descontínua, como abordado em Gitirana Jr., Marinho e Soto (2015). Nos resultados obtidos, em CC-EN o teor de umidade volumétrica residual dos macroporos é 0,28 cm³/cm³ e nos microporos é 0,06 cm³/cm³, já para CC-EI é 0,03 cm³/cm³ e 0,04 cm³/cm³ para CC-EM (Tabela 19).

Tabela 19- Valor de entrada de ar e grau de saturação residual para CCAS

ρ_d (g/cm ³)	Valor de entrada de ar (kPa)		Saturação residual (%)	
	Primeiro	Segundo	Primeira	Segunda
1,48	150	25000	63,12	13,53
1,57	5000	-	7,32	-
1,66	2500	-	10,64	-

Fonte: Autora (2023)

O teor de umidade volumétrica saturada em CC-EN é de 0,44 cm³/cm³, CC-EI é de 0,41 cm³/cm³ e em CC-EM é de 0,38 cm³/cm³. O solo compactado em 1,48 g/cm³ possui maior teor de umidade volumétrica saturada (θ_s) do que em 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³. Isso pode estar relacionado com a menor porosidade do solo compactado em 1,57 g/cm³ (n=41%) e 1,66 g/cm³ (n=38%), que implica em menor quantidade de água necessária para saturar o solo, visto que o aumento da massa específica reduz o tamanho dos poros, que corrobora com os resultados de Oliveira *et al.* (2022).

A CC-EN apresenta maior grau de saturação residual ($S_{r\text{residual}}$) e VEA₂ do que a CC-EI e CC-EM. Já comparando as curvas características unimodais, a CC-EM tem maior $S_{r\text{residual}}$ e menor VEA do que CC-EI, que pode estar relacionado com a maior capacidade de retenção de água pelo aumento da massa específica e diminuição do tamanho dos poros (XIAO *et al.*, 2022). Neste âmbito as forças de adsorção possuem maior influência, devido ao menor tamanho do poro, como também observado por Ibrahim *et al.* (2023) com solo de caulim. Maiores VEA e menor $S_{r\text{residual}}$ para solos com maior densidade também foram constatados por Zhou e Yu (2005).

4.6 Ensaio de permeabilidade à carga variável

Na investigação da condutividade hidráulica do solo compactado em 1,48, 1,57 e 1,66 g/cm³, foi empregado o procedimento B de ensaio da NBR 14545 (ABNT, 2021) para determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável, com fluxo ascendente. O tempo para percolação de água até a saída do permeâmetro foi de 4 dias para o solo compactado em 1,48 g/cm³, 6 dias para o solo com densidade de 1,57 g/cm³ e 30 dias para o solo moldado em 1,66 g/cm³. A Tabela 20 sumariza as características das amostras ensaiadas e os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade.

Tabela 20- Características das amostras e resultados do ensaio de permeabilidade

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	e	S _f inicial (%)	S _f final (%)	Temperatura (° C)	k (cm/s)	k 20° C (cm/s)
1,48	27,47	0,798	91,56	94,51	22,5	4,9x10 ⁻⁸	4,6x10 ⁻⁸
1,57	24,55	0,699	93,50	95,10	16,5	2,4x10 ⁻⁸	2,6x10 ⁻⁸
1,66	21,54	0,605	94,78	97,38	18,0	9,1x10 ⁻⁹	9,5x10 ⁻⁹

Fonte: Autora (2023)

A partir dos resultados do ensaio de permeabilidade à carga hidráulica variável foi possível prever a curva de condutividade hidráulica (CCH) para o solo compactado em 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³, referente às CC- EN, CC-EI e CC-EM (Figura 50). O modelo empregado para a previsão da curva de condutividade hidráulica do solo compactado em 1,48 g/cm³ foi o Dual-Van Genuchten (SEKI, 2007) e Van Genuchten (1980) para 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³, que utilizam os parâmetros de ajuste da curva característica (SHAO *et al.*, 2022). Os resultados de permeabilidade saturada (k_{sat}) e parâmetros de ajuste do modelo são apresentados na Tabela 21.

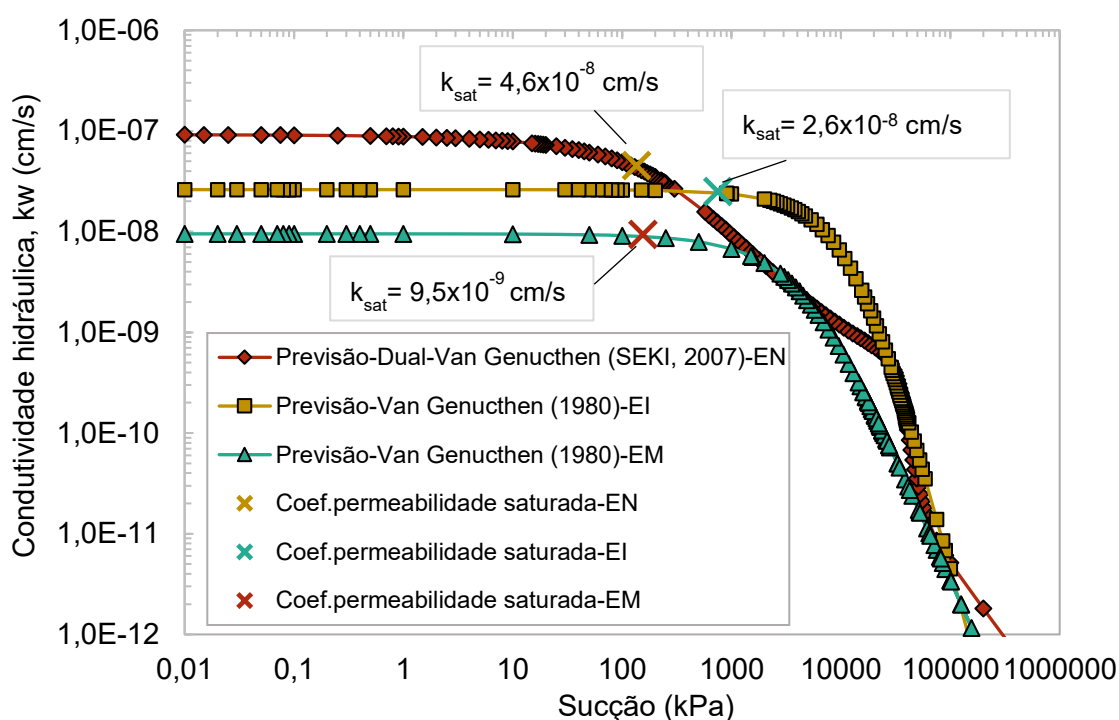
Tabela 21- Valores de permeabilidade saturada para solo compactado em diferentes densidades e parâmetros de ajuste da curva de condutividade hidráulica

ρ_{dry} (g/cm ³)	k_{sat} (cm/s)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	m
1,48	4,6x10 ⁻⁸	0,44	0,06	m ₁ =0,41 m ₂ =0,86
1,57	2,6x10 ⁻⁸	0,41	0,03	0,60
1,66	9,5x10 ⁻⁹	0,38	0,04	0,53

Fonte: Autora (2023)

A curva de condutividade hidráulica (Figura 51) do solo compactado em $1,48 \text{ g/cm}^3$ (CCH-EN) apresenta dois pontos de inflexão (bimodal), assim como o obtido para CC-EN. Já a CCH do solo compactado em $1,57 \text{ g/cm}^3$ (CCH-EI) apresenta formato unimodal, assim como CCH do solo com massa específica de $1,66 \text{ g/cm}^3$ (CCH-EM). Observa-se que o aumento da densidade de compactação do solo tem influência nos coeficientes de permeabilidade.

Figura 51 – Curva de condutividade hidráulica para o solo compactado em $1,48 \text{ g/cm}^3$, $1,57 \text{ g/cm}^3$ e $1,66 \text{ g/cm}^3$



Fonte: Autora (2023)

Em solos de alta compressibilidade (solos argilosos) a k_{sat} mantém-se constante e equivalente a k_w até o VEA (FEUERHARMEL, 2007). Posterior a VEA, a fase ar passa a ser contínua e em consequência, k_w diminui à medida que a sucção aumenta. Li *et al.* (2014) retrata que em curvas bimodais, o fluxo percola através de rede combinada de macroporos e microporos e, após atingir a primeira sucção residual, a percolação é regida pela rede de microporos.

Como CCH-EN apresenta formato bimodal, sendo a primeira inflexão (VEA_1) referente ao fluxo governado principalmente pela rede de macroporos e no segundo ponto de inflexão (VEA_2) o fluxo ocorrendo principalmente pelos microporos. Isso acontece porque em CCAS ocorre primeiro a dessaturação dos macroporos, e posterior a VEA_2 ocorre a drenagem dos microporos (LI *et al.*, 2014).

Comparando CCH-EN, CCH-EI e CCH-EM, verifica-se que a condutividade hidráulica saturada é maior para o solo compactado em menor massa específica do que para o solo mais denso. Assim como verificado por Li *et al.* (2023) e Xu *et al.* (2021), o aumento da densidade de compactação reduz a porosidade e o tamanho dos poros do solo, e consequentemente o seu coeficiente de permeabilidade. A menor permeabilidade do solo com o aumento da densidade é compatível com os resultados obtidos por Ibrahim *et al.* (2023), que avaliou a condutividade de solo tipo caulim. Além disso, os resultados de permeabilidade não saturada são coerentes com os valores de θ_s (teor de umidade volumétrica saturada) obtidos em CCAS, em que se verifica que o solo com maior porosidade apresenta maior θ_s .

Embora a condutividade hidráulica na condição saturada em CCH-EN seja maior do que CCH-EI e CCH-EM, quando ocorre a transição da condição saturada para a não saturada observa-se o decrescimento da condutividade hidráulica à medida que a sucção aumenta. No primeiro trecho (macroporos) de CCH-EN a condutividade hidráulica diminui até a ordem de 6×10^{-10} cm/s em uma faixa de sucção de 150 – 25000 kPa. Do VEA₂ até as condições residuais (25000 – 60000 kPa) k_w reduz para ordem de 10^{-11} cm/s. A variação da condutividade hidráulica mais abrupta para o primeiro trecho de dessaturação pode estar associada com a descontinuidade do tamanho dos poros, que tem impacto direto na permeabilidade (MESQUITA e MORAES, 2004).

Como a condutividade hidráulica depende do tamanho e da continuidade dos canais de poros do solo, o aumento da densidade diminui o tamanho do poro e, consequentemente, há a tendência de maior uniformização da estrutura porosa. Como verificado na Figura 51, a CCH-EM é a que apresenta menor condutividade hidráulica e maior variação de k_w com aumento da sucção. Neste caso, a percolação de água é dificultada pela redução do tamanho do poro e continuidade da fase ar, que resulta em menor espaço útil à passagem de água (FEUERHARMEL, 2007).

Na mesma faixa de sucção (2500 - 30000 kPa), no intervalo entre VEA e a zona de transição, a CCH-EM tem redução da condutividade hidráulica mais acentuada do que CCH-EN e CCH-EI. Isso indica que a transição da condutividade hidráulica para a condição não saturada, tende a ser mais abrupta em solos com maior densidade. No trecho 2500 - 30000 kPa a CCH-EN apresenta menor variação da condutividade hidráulica em relação a CCH-EI e CCH-EM, que pode ter relação com a maior uniformidade e continuidade da sua rede de poros neste segmento (XU *et al.*,

2021; MESQUITA e MORAES, 2004). Entretanto, após 30000 kPa verifica-se que todas as curvas tendem a convergir até as condições residuais, sendo mais notável em CCH-EN e CCH-EI.

As CCH-EN, CCH-EI e CCH-EM não apresentam ponto de inflexão referente ao estágio residual, como foi obtido em CCAS. O trecho residual tendendo a forma linear pode estar associado a descontinuidade da fase água em altas sucções (FEUERHARMEL, 2007). Nesse estágio, como o grau de saturação é baixo, o fluxo de água passa a ocorrer na forma de vapor (GITIRANA JR., MARINHO e SOTO, 2015). Zhou *et al.* (2014) também observaram a descontinuidade da curva de condutividade hidráulica, quando o solo apresentava valores de sucção referente ao trecho residual de CCAS.

4.7 Ensaio de erodibilidade

Na investigação do potencial erosivo do solo compactado em 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³ e graus de saturação de 20%, 50% e $S_{r\text{ótima}}$, foi realizado o ensaio de Inderbitzen em inclinações 5°, 10° e 15°. A Tabela 22 apresenta as características das amostras ensaiadas e os resultados de perda de solo, após tratamento estatístico de dados espúrios com 68% de confiança.

Tabela 22- Perda de solo obtida em cada condição de ensaio Inderbitzen

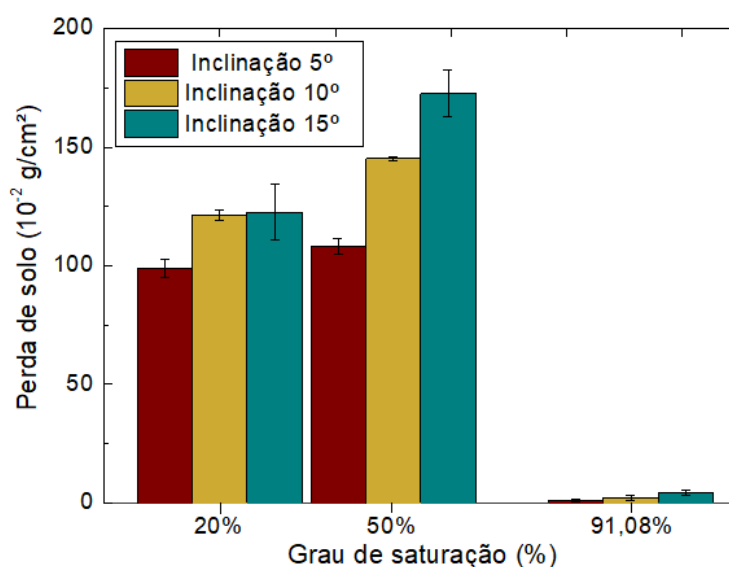
Grau de saturação (%)	Inclinação	ρ_d (g/cm ³) ± 0,01	Índice de vazios ± 0,01	Perda de solo (10 ⁻² g/cm ²)
20	5°	1,48	0,79	98,9 ± 3,7
	10°	1,49	0,78	121,5 ± 2,2
	15°	1,48	0,79	122,6 ± 11,9
50	5°	1,48	0,80	108,0 ± 3,4
	10°	1,47	0,80	145,1 ± 1,0
	15°	1,47	0,81	172,7 ± 9,7
91,08	5°	1,48	0,80	1,0 ± 0,4
	10°	1,48	0,80	2,0 ± 1,0
	15°	1,47	0,80	4,3 ± 1,7
20	5°	1,57	0,69	62,9 ± 4,2
	10°	1,56	0,70	85,8 ± 6,6
	15°	1,57	0,69	87,3 ± 3,7
50	5°	1,56	0,71	105,4 ± 5,7
	10°	1,57	0,70	115,4 ± 7,4
	15°	1,57	0,69	118,9 ± 5,9
93,49	5°	1,57	0,70	1,4 ± 0,5
	10°	1,54	0,72	4,9 ± 0,4
	15°	1,58	0,69	5,2 ± 0,6
20	5°	1,66	0,61	44,3 ± 4,1
	10°	1,65	0,62	53,1 ± 1,7

Grau de saturação (%)	Inclinação	ρ_d (g/cm ³) ± 0,01	Índice de vazios ± 0,01	Perda de solo (10 ⁻² g/cm ²)
50	15°	1,66	0,60	56,8 ± 1,1
	5°	1,64	0,62	65,1 ± 5,9
	10°	1,65	0,61	81,4 ± 7,4
	15°	1,66	0,60	99,8 ± 4,0
95,60	5°	1,65	0,62	1,7 ± 0,7
	10°	1,65	0,62	6,6 ± 0,4
	15°	1,66	0,60	7,2 ± 0,8

Fonte: Autora (2023)

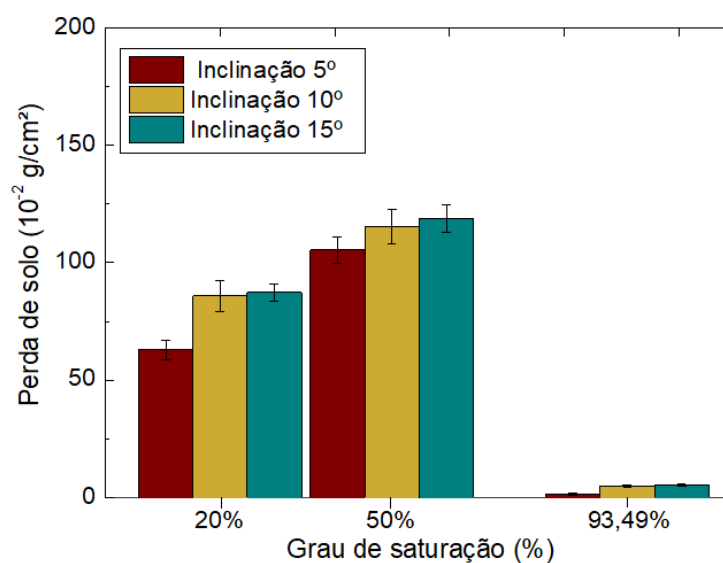
As perdas de solo acumuladas para EN, EI e EM são apresentadas graficamente nas respectivas Figuras 52, 53 e 54, sendo expressas nas três condições de saturação (20%, 50% e $S_{r\text{ótima}}$) e inclinações de ensaio (5°, 10° e 15°).

Figura 52 – Perda de solo representada graficamente para EN

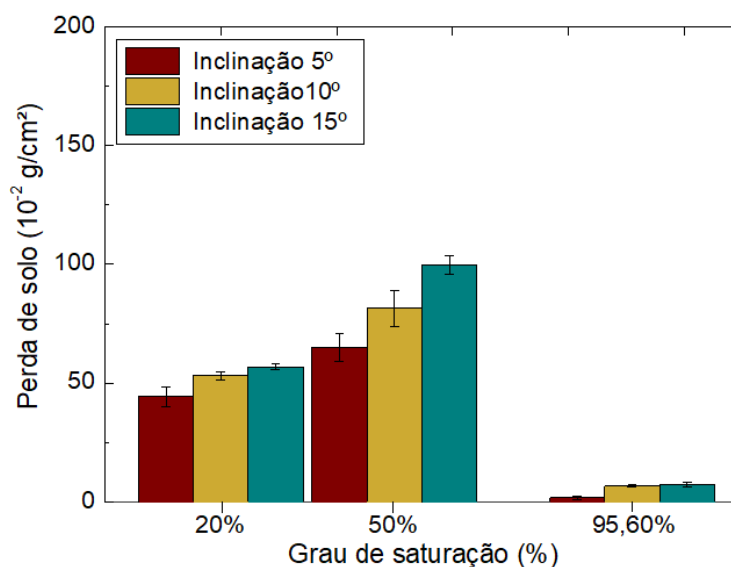


Fonte: Autora (2023)

Figura 53 – Perda de solo representada graficamente para EI



Fonte: Autora (2023)

Figura 54 – Perda de solo representada graficamente para EM

Fonte: Autora (2023)

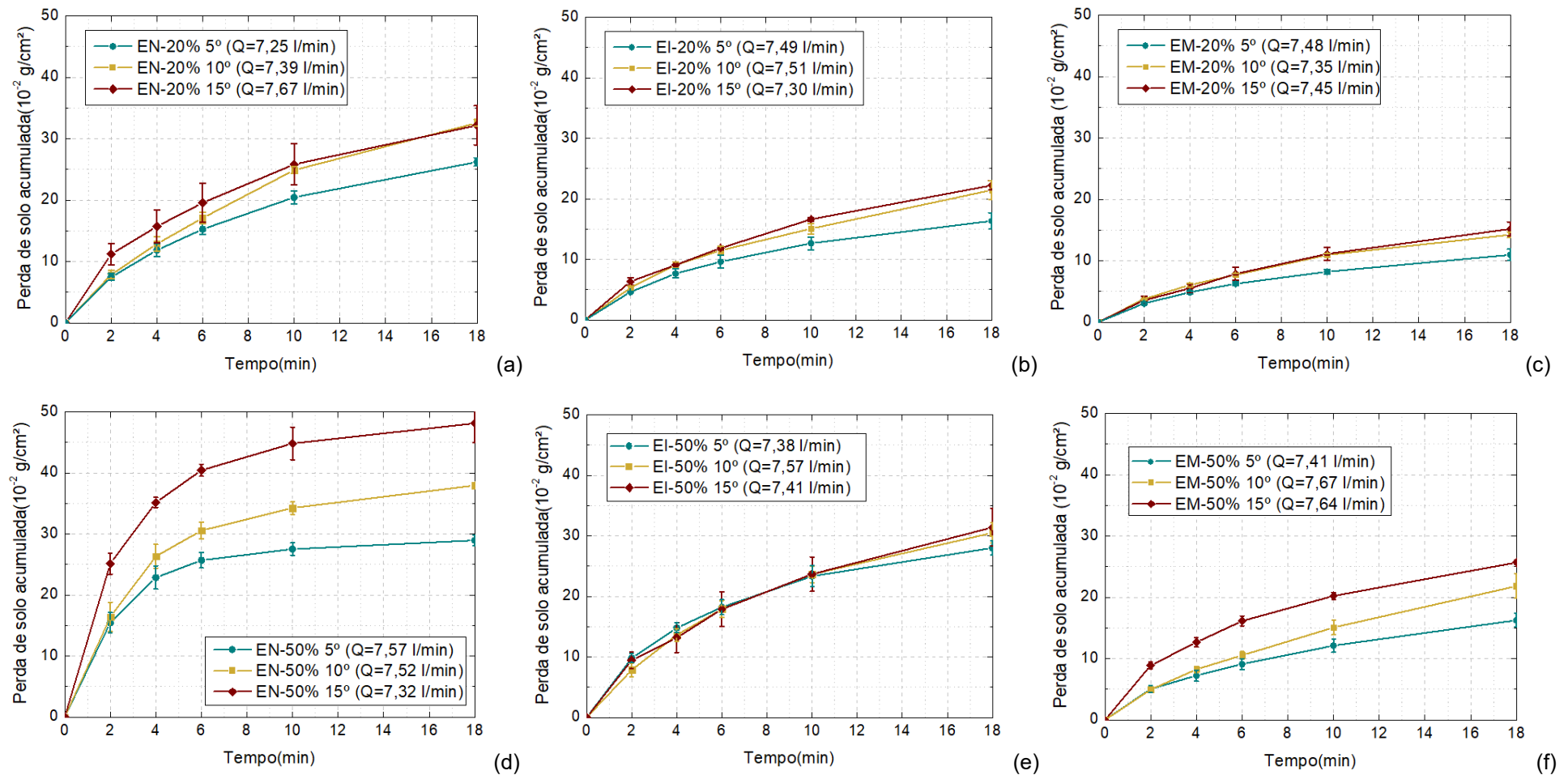
Conforme Figuras 52, 53 e 54, as amostras moldadas em 91,08%, 93,49% e 95,60% apresentaram as menores perdas de solo nas três densidades e inclinações de ensaio. Também se observa a maior perda de solo para amostra em densidade de 1,48 g/cm³ e grau de saturação de 50%, em comparação às densidades de 1,57 e 1,66 g/cm³. Já comparando a perda de solo entre os graus de saturação, verifica-se que ocorre a tendência de aumento de PS para 50% e redução para 20% de saturação em todas as densidades e inclinações.

Os resultados obtidos corroboraram com as pesquisas de Venturini (2019), Fernandes (2015), Basso (2013) e Bastos (1999), que avaliaram a perda de solo de amostras com teor de umidade natural, secas ao ar e pré-umedecidas, sendo constatado o aumento da perda de solo com a redução do grau de saturação inicial.

Os graus de saturação 91,08%, 93,49% e 95,60% correspondem à zona de efeito de borda de CCAS, 50% à zona de transição de CCAS e 20% à zona de transição próxima a residual de CCAS. Os resultados indicam uma tendência de aumento de PS para amostras com grau de saturação referente ao trecho de transição de CCAS e redução de PS quando a saturação é equivalente à zona residual de CCAS. Essa tendência de aumento de PS para amostras com saturação referente a zona de transição de CCAS é corroborada pela pesquisa de Almeida et al. (2015).

Na Figura 55 é apresentada a evolução da perda de solo ao longo do tempo de ensaio. Sendo constatado que o tempo de estabilização da perda de massa varia conforme a condição da amostra e inclinação de ensaio, conforme Bastos (1999) explica em sua pesquisa.

Figura 55 – Evolução da perda de solo ao longo do tempo de ensaio: (a) EN-20%; (b) EI-20%; (c) EM-20%; (d) EN-50%; (e) EI-50%; (f) EM-50%



Fonte: Autora (2023)

Importante salientar que as amostras compactadas em grau de saturação ótimo (91,08%, 93,49% e 95,60%) não apresentaram massa retida na peneira nº200 para o tempo fixado de ensaio. A inexistência de material retido na peneira nº200 representa que, o escoamento superficial só contribui no carreamento de partículas inferiores a 0,075 mm. Isso pode ter relação com a distribuição de tamanhos de grãos deste solo, como verificado por Almeida (2014) e Silva (2021), que apresenta 14,80% de fração silte e 54,74% de argila.

Neste sentido, a densidade das partículas da fração silte e argila são inferiores as de areias, logo, por apresentarem menor massa são mais facilmente carreadas pelo fluxo superficial conforme Hjulstrom (1935), que apresenta uma relação entre a velocidade crítica de escoamento e o tamanho da partícula. Entretanto, segundo o mesmo, para diâmetros maiores que 0,1 mm, a velocidade exigida para escoamento também aumenta, devido as forças de coesão entre as partículas. Sendo assim, como a perda de massa é da ordem de 7×10^{-2} g/cm², a ação do fluxo superficial pode ter ocorrido apenas sobre as partículas com menor forças coesivas.

Existe a tendência de estabilização da perda de solo após 10 min para a amostra EN-50% nas três inclinações (Figura 55d). Entretanto, nas demais condições as amostras não apresentaram tendência clara de estabilização da perda de massa para o período de ensaio. Cabe salientar que na análise visual dos CP's ensaiados observou-se que apenas as amostras de EN-50% apresentaram infiltração na profundidade total dos corpos de prova, que pode justificar a estabilização da perda de massa após 10 min de ensaio.

A tendência de estabilização para a amostra EN-50%, que apresenta maior PS em relação as demais amostras, foi corroborada com pesquisas de Silva (2021) e Venturini (2019). Silva (2021) observou em sua pesquisa que a estabilização da perda de solo com médio potencial erosivo ocorre a partir de 6 min, nas inclinações de 5°, 10° e 15°. Já Venturini (2019), que analisou amostras previamente secas de solos de alta erodibilidade, identificou que a estabilização ocorre em 10 min de ensaio, em inclinações de 26° e 45°.

De maneira a avaliar o efeito da densidade, saturação e inclinação, bem como a interação entre os fatores principais foi realizada a análise de variância (ANOVA) (Tabela 23). A análise de variância em nível de confiança de 95 % resulta que a saturação, densidade e inclinação são significativos ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$), sendo o efeito da saturação o de maior significância. Além disso, a interação entre fatores pareados

também foi significativa. Entretanto, a interação simultânea entre a saturação, densidade e inclinação não foi significativa ($F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$).

Tabela 23- Análise de variância dos valores de perda de massa do solo considerando o efeito da densidade, grau de saturação e inclinação

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F calculado	F tabelado
Massa específica aparente seca (ρ_d)	25160,41	2,00	12580,21	149,52	3,12
Grau de saturação (Sr)	211309,19	2,00	105654,59	1255,78	3,12
Inclinação (I)	4668,61	2,00	2334,31	27,74	3,12
ρ_d - Grau de saturação	19161,96	4,00	4790,49	56,94	2,49
ρ_d - Inclinação	1385,43	4,00	346,36	4,12	2,49
Grau de saturação - Inclinação	5963,47	4,00	1490,87	17,72	2,49
ρ_d - Grau de saturação - Inclinação	1237,02	8,00	154,63	1,84	2,06
Resíduo	6394,24	76,00	84,13		
Total	275280,34	102,00			

Fonte: Autora (2023)

A identificação dos grupos que possuem diferenças estatísticas a nível de confiança de 95% foi realizada através do teste de Tukey. Os grupos que são iguais estatisticamente apresentam valor-P maior do que 5% (MONTGOMERY, 2012). A comparação entre pares e valor-P obtido são apresentados no Apêndice 1.

Considerando o Apêndice 1, na análise isolada da densidade referente a EN, os grupos na saturação de 20% e 91,08% não apresentam diferença estatística entre 5°, 10° e 15° de inclinação. Já na densidade de EI todos os grupos na saturação de 50% iguais estatisticamente, assim como os grupos de 15° e 10° em 20% e 93,49%. Na densidade de EM todos os grupos de 20% de saturação não apresentam diferenças estatísticas, além dos grupos de 5°-10° e 15°-10° da saturação 50% e 95,60%. A inexistência de diferença estatisticamente significativa entre todos os grupos com graus de saturação de 20%-EM, 50%-EI e 91.08%-EN indica que, as diferenças nos valores médios entre os grupos de tratamento (5°, 10° e 15°) não são distintas o suficiente para eliminar a possibilidade de que a diferença ocorra pela variabilidade da amostragem aleatória.

Avaliando o grau de saturação, verifica-se que em 20% e 50% os grupos EI e EM são iguais em 15°, assim como em 95,60% EI-EM e EI-EN. Em 50% os grupos da EN e EI são estatisticamente iguais em 5°. Todos os grupos de 95,60% em 5° não possuem diferença significativa, além de EM e EI em 10°. As análises estatísticas dos

demais grupos mostram que existem diferenças significativas ao nível de confiança de 95%.

Em virtude da igualdade estatística apresentada nos grupos (Apêndice 1) constata-se que é importante variar a inclinação e densidades de compactação das amostras em maiores intervalos. Desta forma será possível verificar com maior assertividade a influência desses parâmetros na perda de massa de solo, uma vez que na análise de variância o efeito da densidade e inclinação se mostrou significativo.

A perda de massa do solo tem influência muito significativa pelo grau de saturação da amostra, como observado na Tabela 23, que pode estar relacionado com a sucção atuante e permeabilidade não saturada (Bandeira *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2017; Jacintho *et al.*, 2006). Com base em CCAS e CCH, os valores de sucção e permeabilidade não saturada referente a 20%, 50% e $S_{r\acute{o}tima}$, são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24- Valores de sucção, umidade volumétrica e coeficiente de permeabilidade não saturada referentes aos graus de saturação 20%, 50% e $S_{r\acute{o}tima}$

ρ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	θ_s (cm ³ /cm ³)	Sucção (kPa)	k_w (cm/s)
1,48	5,99	20	0,09	50000	$3,3 \times 10^{-11}$
	14,99	50	0,22	30000	$4,4 \times 10^{-10}$
	27,30	91,08	0,40	350	$2,4 \times 10^{-8}$
1,57	5,22	20	0,08	75000	$2,1 \times 10^{-11}$
	13,05	50	0,20	30000	$7,7 \times 10^{-10}$
	24,40	93,49	0,38	2000	$1,4 \times 10^{-8}$
1,66	4,53	20	0,08	85000	$2,8 \times 10^{-12}$
	11,32	50	0,19	25000	$1,6 \times 10^{-10}$
	21,65	95,60	0,36	2000	$5,1 \times 10^{-9}$

Fonte: Autora (2023)

Considerando a CCAS (Figura 50) e CCH (Figura 51), verifica-se que o solo com fase água contínua ($S_{r\acute{o}tima}$) possui alta permeabilidade que permite que ocorra fluxo pelo solo sem que altere o gradiente hidráulico, logo, a tensão hidráulica atuante não possui grande impacto na desagregação das partículas.

Entretanto, nos solos com grau de saturação inicial de 50% observa-se que ocorre uma grande desagregação do solo, que pode ser resultado da perda de coesão entre partículas pelo aumento de saturação (BASTOS, 1999). Embora a condutividade hidráulica inicial do solo seja baixa, devido a fase ar ser contínua, a continuidade da

fase água permite que ocorra a saturação gradual do solo e consequentemente a perda de coesão.

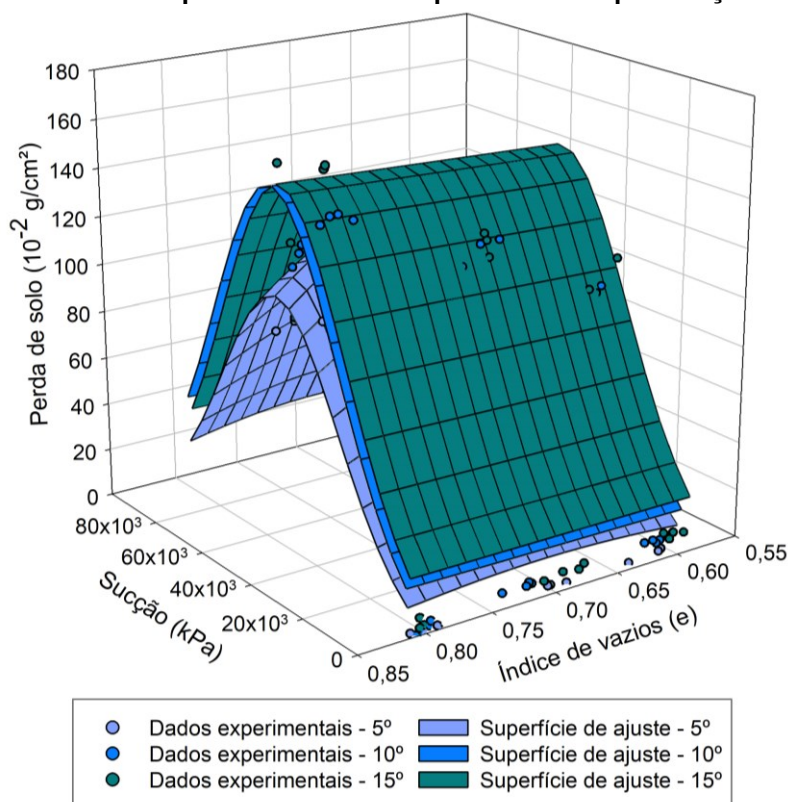
De acordo com Sales *et al.* (2017) em solos com menor grau de saturação ocorre um aumento da pressão de ar ocluso durante o escoamento superficial, que pode contribuir na desestruturação solo. Além disso, devido ao escoamento superficial, outro possível aspecto que possa interferir na estabilidade interna do solo seja o aumento da força de percolação nos poros. Como existe redução da frente de infiltração pela menor permeabilidade do solo poderá ocorrer um aumento do gradiente hidráulico, e consequentemente, uma maior força de percolação nos poros da camada de solo saturada (CAVALCANTI e CAMAPUM DE CARVALHO, 2017; BORMA, GITIRANA JR e LUIZ, 2015). O aumento da força de percolação poderá desestabilizar a estrutura interna do solo, e assim a tensão hidráulica terá maior atuação na desagregação e carreamento das partículas.

O solo com grau de saturação de 20% apresenta menor perda de massa em comparação a 50% de saturação. Em CCH, o solo com 20% de saturação possui permeabilidade baixa e, além disso, se encontra na zona de transição próxima à residual de CCAS. Neste estágio, a fase água pode ser descontínua e o fluxo de água ocorrer na forma de vapor (GITIRANA JR., MARINHO e SOTO, 2015). Como a condutividade hidráulica inicial é baixa e a fase água descontínua, logo existe a dificuldade de infiltração da água no solo, e consequentemente resulta em uma menor frente de saturação.

Além disso, no trecho residual a sucção é extremamente elevada, e desta forma a tensão hidráulica não possui tanta capacidade de desagregação do solo. Esses efeitos de redução da erodibilidade do solo para baixos graus de saturação inicial são observados em Almeida *et al.* (2015), em que obteve redução de PS para solo com grau de saturação próximo às condições residuais de CCAS.

No intuito de avaliar a relação entre a perda de massa de solo (variável dependente), a sucção e o índice de vazios (variáveis independentes), utilizou-se a função Gaussiana para definição de superfícies de resposta. As superfícies de resposta foram construídas para os pontos experimentais obtidos nas inclinações de 5°, 10° e 15° (Figura 56). Os parâmetros de ajuste e o coeficiente de regressão (R^2) para cada superfície são apresentados na Tabela 25.

Figura 56 – Superfícies de resposta relacionando perda de solo por sucção e índice de vazios



Fonte: Autora (2023)

As superfícies de resposta obtidas nas inclinações de 5°, 10° e 15° (Figura 56) descrevem como a sucção e o índice de vazios afetam a perda de massa de solo na faixa de valores avaliada desses parâmetros para o material estudado, assim como representa geometricamente o efeito combinado dessas variáveis independentes sobre a variável resposta.

Na Figura 56 verifica-se que as superfícies das inclinações de 10° e 15° estão sobrepostas a partir da faixa de sucção 50000 kPa em todas as densidades, o que indica que não existem diferenças significativas na perda de solo. Entretanto, na inclinação de 5° observa-se que existe maior influência do efeito da densidade na faixa de 30000 - 75000 kPa. A partir de 50000 kPa a perda de solo tende a diminuir com o aumento da sucção em todas as inclinações. As superfícies de resposta representam o efeito mais significativo da saturação na perda de massa de solo, que é coerente com os resultados da análise de variância (Tabela 23).

Tabela 25- Parâmetros de ajuste das superfícies de resposta que relacionam a perda de solo à sucção e índice de vazios

Estatísticas de regressão não linear			
Modelo Gaussiano			
	$z = ae^{-0.5\left[\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{c}\right)^2\right]}$		
Superfície	5°	10°	15°
R ²	0,88	0,86	0,81
Erro padrão	16,10	20,64	27,32
Coeficiente			
x0	47556,92	48424,64	46475,07
y0	0,71	13,17	28,12
a	135,21	1477,21	1294,12
b	22609,59	23871,88	23868,09
c	0,16	5,79	13,19

Fonte: Autora (2023)

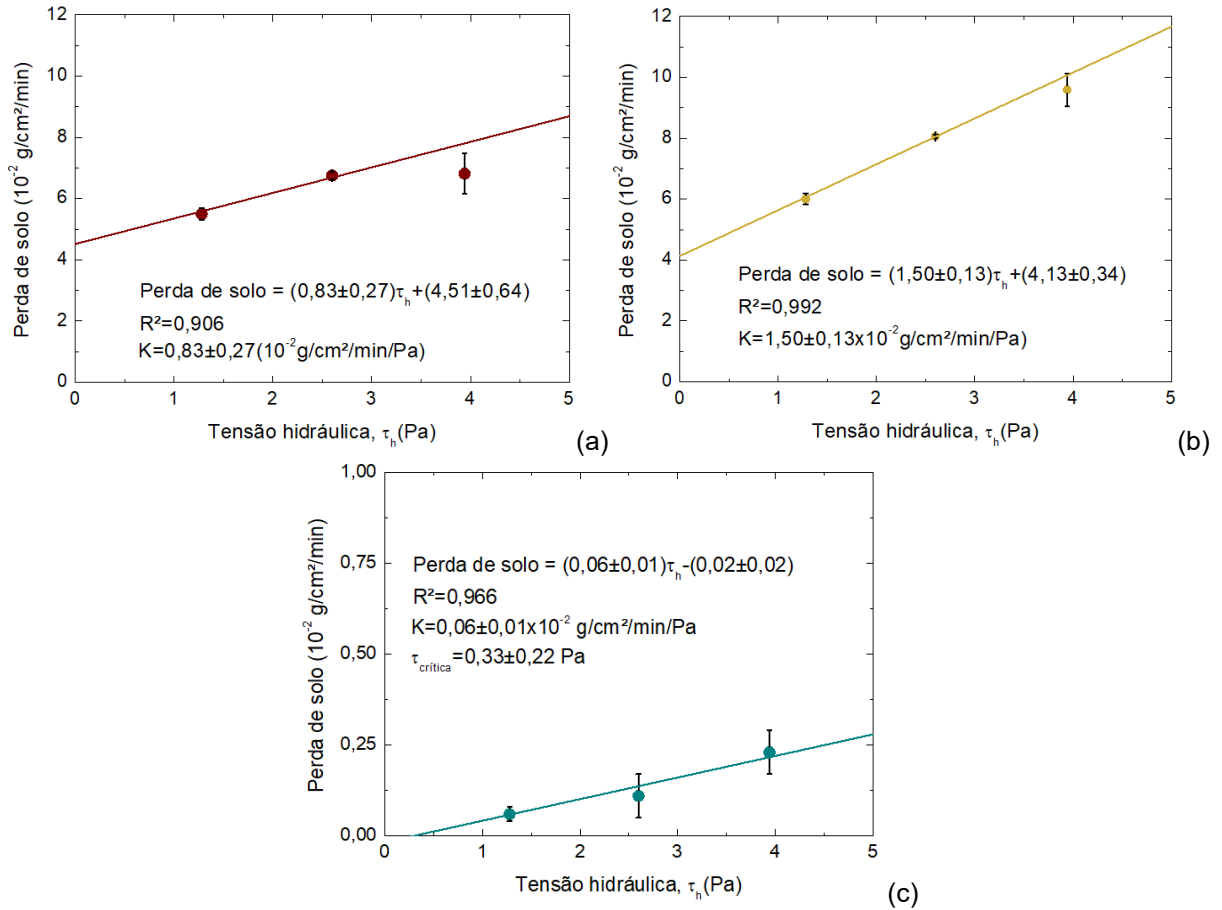
Bastos (1999) descreve que o tempo padrão para o cálculo das taxas de erosão pode variar conforme o tempo de estabilização de PS, que é influenciada pelo tipo de solo e às condições de fluxo de ensaio. Além disso, o autor também retrata que o uso de tempos iniciais pode superestimar a erodibilidade do solo, devido ao efeito dinâmico da primeira onda de fluxo, que é definida como o impacto da primeira frente de escoamento que atinge a amostra. Entretanto, destaca que no caso de solos muito erosivos, a adoção de tempos finais tem resultados influenciados pela alteração da regularidade do escoamento superficial, devido a geração de sulcos nos corpos de prova.

Comparando os tempos empregados por Silva (2021) e Venturini (2019), verifica-se que ambos os autores empregaram os tempos de estabilização da perda de solo para cálculo do parâmetro K. Sendo assim, considerando os tempos adotados por Silva (2021), Venturini (2019) e o exposto por Bastos (1999), para o cálculo da taxa de erodibilidade (K) da presente pesquisa adotou-se o tempo de 18 min, uma vez que o provável tempo de estabilização de PS para todas as amostras ocorre após esse período.

A taxa de erodibilidade do solo (K) em cada condição de análise foi determinada a partir da regressão linear entre a tensão hidráulica atuante (τ_h) e a perda de solo por unidade de tempo referente a 18 min ($PS_{t=18 \text{ min}}$). Nas Figuras 57, 58 e 59 é possível visualizar a regressão linear entre a perda de solo por unidade de tempo e tensão hidráulica atuante para as nove condições de análise, onde o

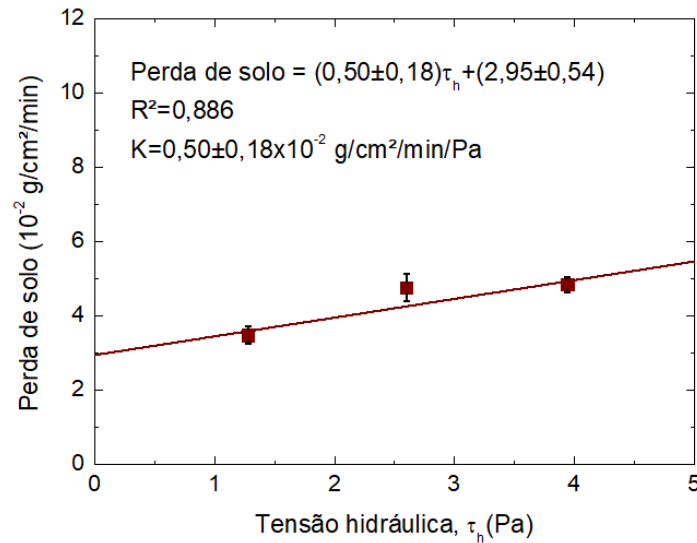
parâmetro K corresponde ao coeficiente angular da reta ajustada [τ_h , PS] (BASTOS *et al.*, 2001).

Figura 57 – Regressão linear para o solo compactado em: (a) 1,48-20%; (b) 1,48-50% e (c) 1,48-91,08%

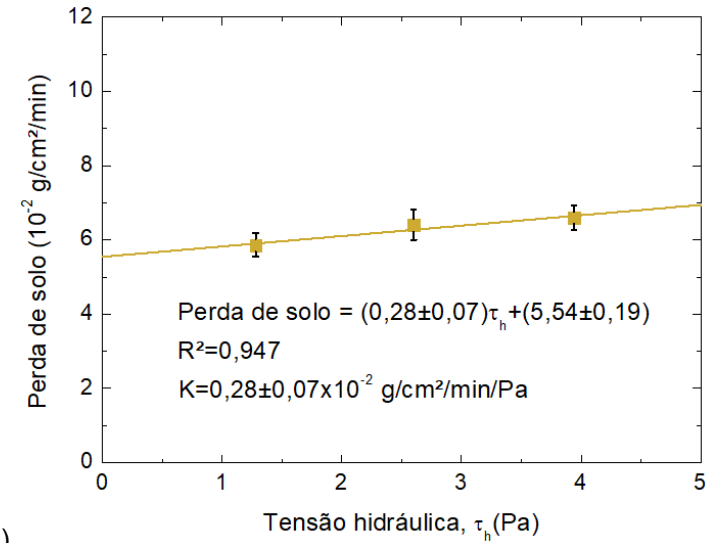


Fonte: Autora (2023)

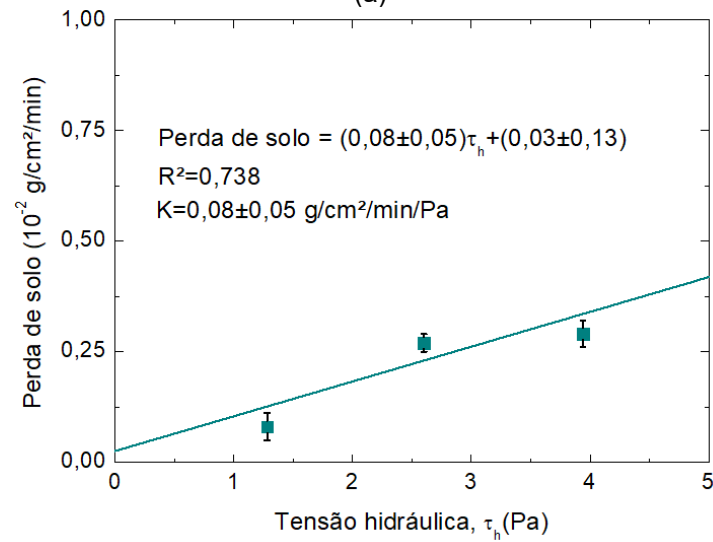
Figura 58 – Regressão linear para o solo compactado em: (a)1,57-20%; (b)1,57-50% e (c)1,57-93,49%



(a)



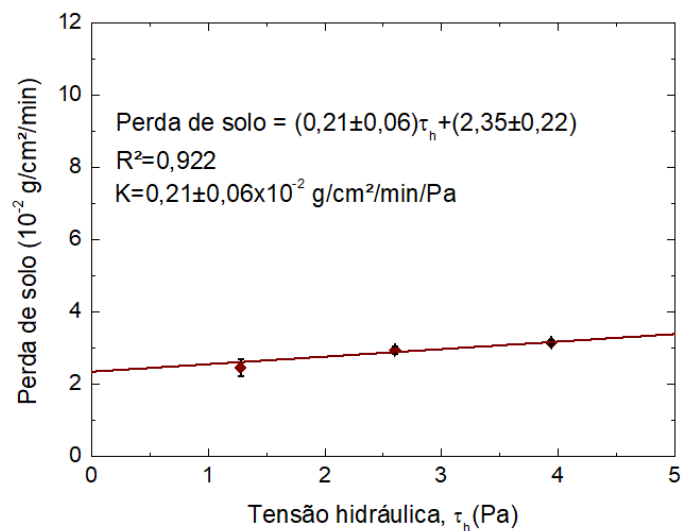
(b)



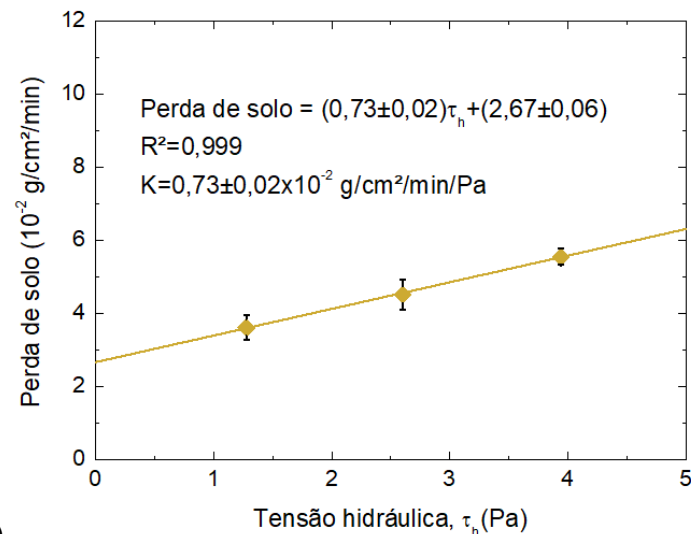
(c)

Fonte: Autora (2023)

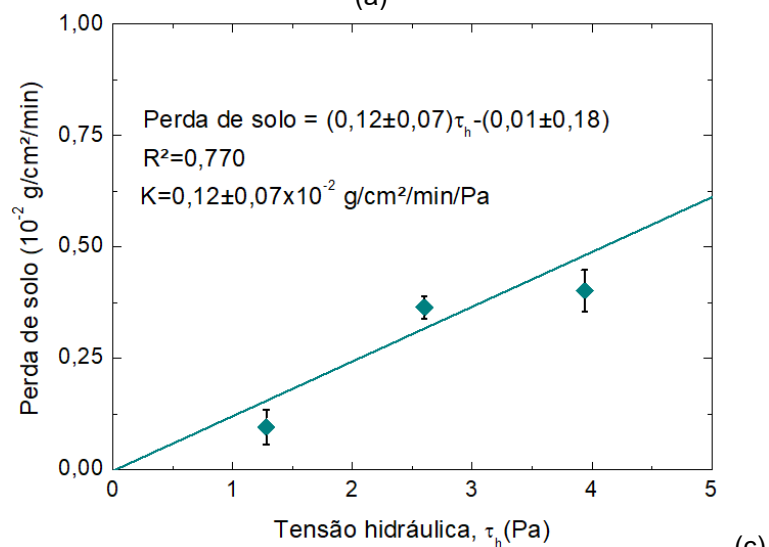
Figura 59 – Regressão linear para o solo compactado em: (a)1,66-20%; (b)1,66-50% e (c)1,66-95,60%



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora (2023)

A regressão linear apresentou bom R^2 na maioria das análises, exceto em EI-20% (Figura 58a), EI-93,49% (Figura 58c) e EM-95,60% (Figura 59c), que apresentaram coeficiente de ajuste menor do que 0,90. O parâmetro K pode ser obtido a partir da regressão linear em todos os casos, entretanto a tensão hidráulica crítica ($\tau_{critica}$), que representa a tensão limite para o início do processo erosivo, pode ser identificada apenas em EN-91,08% (Figura 57c) ($\tau_{critica} = 0,33$ Pa). Já nos demais casos apresentou valores negativos. Segundo Bastos (1999) o intercepto do eixo das tensões hidráulicas na parte negativa é fisicamente incoerente, e pode ter relação com a dispersibilidade dos resultados e das simplificações na estimativa da tensão hidráulica atuante.

Na pesquisa de Silva (2021) os valores de tensão hidráulica crítica situaram-se na faixa de 2 a 7 Pa, Venturini (2019) obteve valores na ordem de 1 a 2 Pa, e Bastos (1999) encontrou resultados no intervalo de 0,25 a 1,25 Pa. Em todas as pesquisas elencadas, os autores obtiveram alguns resultados de $\tau_{critica}$ não identificados, semelhante ao encontrado nas análises do presente estudo.

A Tabela 26 sumariza as características das amostras (densidade, grau de saturação e inclinação), os resultados de tensão hidráulica atuante, R^2 e taxa de erodibilidade (K).

Tabela 26- Valores de taxa de erodibilidade obtidos por regressão linear entre perda de solo e tensão hidráulica

		PS $t=18min$ (10^{-2} g/cm ² /min)			R^2	K (10^{-2} g/cm ² /min/Pa)
Inclinação		5°	10°	15°		
$\tau_h \pm 0,01$ (Pa)		1,28	2,60	3,94		
$\rho_d \pm 0,01$ (g/cm ³)	Grau de saturação					
1,48	20%	5,49 $\pm$ 0,20	6,75 $\pm$ 0,12	6,81 $\pm$ 0,66	0,906	0,83 $\pm$ 0,27
	50%	6,00 $\pm$ 0,19	8,06 $\pm$ 0,06	9,59 $\pm$ 0,54	0,992	1,50 $\pm$ 0,13
	91,08%	0,06 $\pm$ 0,02	0,11 $\pm$ 0,06	0,23 $\pm$ 0,06	0,966	0,06 $\pm$ 0,01
1,57	20%	3,49 $\pm$ 0,23	4,77 $\pm$ 0,36	4,85 $\pm$ 0,21	0,886	0,50 $\pm$ 0,18
	50%	5,86 $\pm$ 0,31	6,41 $\pm$ 0,41	6,6 $\pm$ 0,33	0,947	0,28 $\pm$ 0,07
	93,49%	0,08 $\pm$ 0,03	0,27 $\pm$ 0,02	0,29 $\pm$ 0,03	0,738	0,08 $\pm$ 0,05
1,66	20%	2,46 $\pm$ 0,23	2,95 $\pm$ 0,10	3,16 $\pm$ 0,06	0,922	0,21 $\pm$ 0,06
	50%	3,62 $\pm$ 0,33	4,52 $\pm$ 0,41	5,55 $\pm$ 0,22	0,999	0,73 $\pm$ 0,02
	95,60%	0,10 $\pm$ 0,04	0,36 $\pm$ 0,03	0,40 $\pm$ 0,05	0,770	0,12 $\pm$ 0,07

Fonte: Autora (2023)

O parâmetro K pode ser empregado na classificação do solo quanto a sua tendência de sofrer erosão. Neste intuito, Bastos *et al.* (2001) propõem que solos com: $K < 1 \times 10^{-3}$ têm baixa erodibilidade; $1 \times 10^{-3} < K < 1 \times 10^{-1}$ possuem média erodibilidade; e $K > 1 \times 10^{-1}$ apresentam alta erodibilidade. De acordo com os resultados obtidos (Tabela 16), o solo compactado na $S_{rótima}$ e densidades de $1,48 \text{ g/cm}^3$, $1,57 \text{ g/cm}^3$ e $1,66 \text{ g/cm}^3$ apresenta baixa erodibilidade. Já nas demais condições o solo possui erodibilidade média. Os resultados que indicam a média erodibilidade são coincidentes com valores de K ($1,36 \cdot 10^{-2}$ e $2,84 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$) obtidos por Silva (2021), que avaliou a erodibilidade de solos da Formação Guabirotuba presentes em canais de drenagem urbana no município de Curitiba/PR.

Considerando alguns valores de K para solos classificados como lateríticos, os resultados para amostras com secagem ao ar variam entre $12,90$ e $30,85 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$, e para pré-umedecidas estão entre $0,03$ e $3,99 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ (VENTURINI, 2019; BASTOS, 1999). Já em amostras com teor de umidade natural os valores de K variam de $0,07$ a $4,91 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ (OLIVEIRA *et al.*, 2021; VENTURINI, 2019; BASTOS, 1999).

Em comparação aos valores de K apresentados na literatura para solos lateríticos, verifica-se que o solo da presente pesquisa apresenta maior resistência à erosão. Cabe salientar que os solos avaliados pelos pesquisadores possuem formações geológicas e propriedades geotécnicas distintas às do solo em análise. Por esse motivo, para efeitos de comparação de K foi considerado apenas o critério de solos com comportamento laterítico.

Assim como os resultados de perda de solo (PS), observa-se que os valores de K são maiores para saturação de 50% em comparação a 20%, e à medida que a densidade aumenta o parâmetro K diminui. Os resultados são corroborados com Bandeira *et al.* (2021), Foltz *et al.* (2009) e Bastos (1999), que avaliaram a erodibilidade de solos em diferentes graus de saturação.

Entretanto, o solo com grau de saturação ótimo apresenta maior erodibilidade com o aumento da densidade, que pode ter relação com a menor permeabilidade não saturada do solo em $1,66 \text{ g/cm}^3$ ($5,4 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$) em relação às densidades de $1,57 \text{ g/cm}^3$ ($1,4 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$) e $1,48 \text{ g/cm}^3$ ($2,4 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$). Outra provável justificativa seja a influência de variabilidade da amostragem aleatória, devido a igualdade estatística entre os grupos EM-EI-EM-5°, EM-EI-10°, EM-EI-15° e EI-EN-15°, apontada no Teste de Tukey (Apêndice 1).

Analisando as três densidades, o K em EN-50% e 20% de saturação apresentam maior suscetibilidade à erosão em comparação à EM e EI. Entretanto, o valor de K em EI-50% apresenta redução em relação a EI-20% e EM-50%. Uma possível explicação seja o maior valor de k_w em EI-50% ($7,7 \times 10^{-10}$ cm/s), quando comparado à condutividade hidráulica não saturada de EN-50% e EM-50%, que reduz o impacto da tensão hidráulica na desestruturação do solo (CAVALCANTI e CAMAPUM DE CARVALHO, 2017; BORMA *et al.*, 2015; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006; JACINTHO *et al.*, 2006).

Além disso, também foi constatado no Teste de Tukey (Apêndice 1) que os grupos de 5°, 10° e 15° em EI-50% não apresentam diferenças estatisticamente significativas. A igualdade estatística entre os grupos 5°, 10° e 15° em EI-50% indica que as diferenças entre os tratamentos não são diferentes o suficiente para excluir a possibilidade de que a diferença ocorra pela variabilidade da amostragem aleatória. Logo, o erro associado pode estar superestimado, e a regressão linear entre a perda de solo e a tensão hidráulica atuante esteja convergindo para resultados limitados.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, as principais conclusões sobre a influência da sucção na erodibilidade de um solo argiloso compactado em diferentes graus de saturação (20%, 50% e $S_{r\text{ótima}}$) e densidades (1,48, 1,57 e 1,66 g/cm³) são resumidas a seguir:

- Uma curva característica no formato bimodal foi obtida para o solo compactado com densidade de 1,48 g/cm³, que indica a presença de uma distribuição heterogênea de poros. Entretanto, quando o solo foi compactado em densidades maiores, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³, obteve-se uma forma unimodal para as curvas características. A partir dessa observação, pode-se concluir que o aumento da densidade do solo influencia diretamente no formato da curva característica, que tende a forma unimodal devido à diminuição do índice de vazios e, consequentemente, redução do tamanho dos poros;
- As taxas de erodibilidade obtidas apresentaram variações em todas as condições analisadas. Dentre todos os grupos analisados, o solo compactado com teor de umidade ótima, nas três densidades, apresentou os menores valores de K, o que classificou o material como solo de baixa erodibilidade. Já nos grupos com menor saturação inicial, 20% e 50%, o solo apresenta maior suscetibilidade à erosão, com as maiores perdas de massa para o solo compactado em saturação inicial de 50%, em todas as densidades avaliadas;
- Na análise isolada da saturação, observou-se que o solo com maior densidade tem menor tendência de perda de massa. Assim como observado isoladamente o efeito da inclinação, constatou-se que as inclinações mais elevadas conferiram o aumento do potencial erosivo do solo, pela maior tensão hidráulica atuante. Deste modo, pode ser concluído que a erodibilidade do solo é influenciada pelo grau de saturação, densidade e inclinação, sendo o grau de saturação o fator mais significativo;
- Na investigação da condutividade hidráulica do solo compactado nas densidades de 1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³, observou-se que k_w tende a ser equivalente ao coeficiente de permeabilidade saturada até o

primeiro valor de entrada de ar, em todos os casos. Porém, kw diminui acentuadamente quando a fase ar passa a ser contínua, ou seja, a partir de graus de saturação correspondentes a zona de dessaturação do solo. Além disso, também se constatou que os menores valores de condutividade hidráulica foram encontrados para o solo compactado em maior densidade, que apresenta menor índice de vazios;

- O solo compactado em grau de saturação correspondente ao trecho de dessaturação, 50%, apresentou menor resistência à erosão nas três densidades. Neste estágio a condutividade hidráulica é menor e pode contribuir para o aumento da força de percolação em atuação conjunta à tensão hidráulica, que é aplicada no escoamento superficial. Deste modo, entende-se que a faixa de sucção no trecho de dessaturação não possui efeito relevante na redução do impacto da tensão hidráulica atuante. Por outro lado, o solo compactado em grau de saturação próximo à zona residual, 20%, apresenta uma faixa de sucção muito elevada, que confere um aumento da sua resistência à erosão. Neste sentido, constata-se que, embora a condutividade hidráulica seja baixa, são necessários valores de tensão hidráulica muito altos para superar os valores de sucção que mantém a estrutura do solo estável.

Em virtude dos resultados obtidos na pesquisa, comprova-se que o grau de saturação do solo, que está relacionado à sucção atuante, possui efeito preponderante no seu maior ou menor potencial erosivo. Sendo que para menores graus de saturação iniciais, as faixas elevadas de sucção contribuem na redução da erodibilidade do solo.

Em sugestão para o desenvolvimento de trabalhos futuros, propõem-se:

- Realização do ensaio de Inderbitzen com vazões maiores do que 7,50 l/min; amostras com índices de vazios diferentes de 0,80, 0,69 e 0,60; e inclinações superiores a 15°, uma vez que 10° e 15° apresentaram valores de perda de solo iguais estatisticamente;
- Determinação da erodibilidade através da Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1979), com ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade

específica, em comparação aos resultados obtidos no ensaio de Inderbitzen;

- Determinação da taxa de infiltração do solo nas três densidades (1,48 g/cm³, 1,57 g/cm³ e 1,66 g/cm³) e graus de saturação (20%, 50% e Sótima) utilizados na presente pesquisa;
- Adoção de tempos de ensaio superiores a 18 min, a fim de verificar como a taxa de infiltração influencia na erodibilidade do solo compactado em menores graus de saturação iniciais.

REFERÊNCIAS

- ALBADRI, W. M.; NOOR, M. J. M.; ALHANI, I. J. The relationship between the shear strength and water retention curve of unsaturated sand at different hydraulic phases. **Acta Geotechnica**. v.16, n.9, p. 2821-2835, september. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01189-7>.
- ALMEIDA, J. G. R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- ALMEIDA, J. G. R.; ROCHA, M. F.; GITIRANA JR., G. D. F. N. A influência da sucção na erodibilidade de um solo compactado: estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTROOESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO, 3, 2013, Cuiabá. **Anais[...]**. Cuiabá: ABMS, 2013.
- ALMEIDA, J.G.R., ROMÃO, P. D. A., MASCARENHA, M.M. D. A., SALES, M.M. Erodibilidade De Solos Tropicais Não Saturados Nos Municípios De Senador Canedo E Bonfinópolis (Go). **Geociências**. v.34, p. 441–451. 2015.
- ALMEIDA, J. L. D. **Determinação da taxa de infiltração da água através de sensores termopares e de capacitância (FDR) em um solo arenosiltoso remoldado em laboratório**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- ALMEIDA, J. L. D.; MACHADO, C. F.; MUÑOZ, Y. O.; PUDELL, P. C. A.; IZZO, R. L. D. S. Análise da expansibilidade de quatro solos presentes na estratigrafia da Formação Guabirotuba, extraídos de uma mesma obra em Curitiba (PR). *In*: XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos[...]**. Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/cobramseg-2022/papers/analise-da-expansibilidade-de-quatro-solos-presentes-na-estratigrafia-da-formacao-guabirotuba-extraidos-de-uma-mesma-ob#>. Acesso em: 13 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13601**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5298-16**: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. West Conshohocken: ASTM, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken: ASTM, 2017.

AYALEW, H. **Assessment of stress/volume-controlled soil-water retention properties of unsaturated sandy soils**. 2013. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – Faculty of the Graduate School, University of Texas, Arlington, 2013.

AZMI, M.; RAMLI, M. H.; HEZMI, M. A.; MOHD YUSOFF, S. A. N.; ADEL, M. N. A. Estimation of Soil Water Characteristic Curves (SWCC) of mining sand using soil suction modelling. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** v. 527, 012016, 2019. 11th International Conference on Geotechnical Engineering in Tropical Regions (GEOTROPIKA), 2019, [Kuala Lumpur, Malaysia]. DOI:10.1088/1757-899X/527/1/012016.

BALDOVINO, J. A.; IZZO, R. L. D. S.; EKINCI, A. Strength Relationship Equation for Artificially Stabilized Rammed Sedimentary Soils. **Buildings**. v.12, n. 9, september. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12091433>.

BALDOVINO, J. A.; IZZO, R. L. D. S.; SILVA, E. R. D.; ROSE, J. L. Sustainable Use of Recycled-Glass Powder in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 32, n.5, 2020. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003081.

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 188–194, 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.10.001.

BANDEIRA, A. P. N.; MACEDO, C. C. A.; CLARINHO, G. S.; LIMA, M. G. D. S.; NETO, J. B. D. S. Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. **Soil and Rocks**, v. 44, n. 1, 2021. DOI: 10.28927/SR.2021.052420.

BASSO, L. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis – RS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico–pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. n.1, p. 17–25, nov. 2000.

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

BICALHO, K. V.; MACHADO, S. L.; GERSCOVICH, D. M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.12. p. 297- 326.

BORMA, L. D. S.; GITIRANA JR., G. D. F. N.; LUIZ, G. C. Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.13. p. 327-365.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper, n.3, Colorado: Colorado State University, 1964.

BURDINE, N. T. Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**. n.198, p. 71-78. 1953.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O. D.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. *In: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. São Paulo: ABMS, 2006. cap.2. p. 39- 91.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Ecosystemas em áreas urbanas, periurbanas e rurais: uma análise com o olhar voltado para o Distrito Federal**. Distrito Federal: UNB- Universidade de Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/p-diversas>. Acesso em: 01 nov. 2022.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FÁCIO, J.A. Estudo da erodibilidade de solos do Distrito Federal. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*, 10., 1994, Foz do Iguaçu/PR. **Anais [...]** Foz do Iguaçu/PR: ABMS, 1994. v.4, p.1245–1252.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C.; SALES, M. M.; MASCARENHA, M. M. D. A.; ANGELIM, R. R.; LUZ, M. P. D. **Cartilha: Erosão em Borda de Reservatório**. v. 1. Goiânia: UFG, 2016.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. D. F. N. Unsaturated soils in the context of tropical soils. **Soil and Rocks**. v.44, n. 3, july-september. 2021. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2021.068121>.

CAMPOS, C. J. M. D. **Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru-SP**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

CARVALHO, L. M. D.; OLIVEIRA, A. M. D.; RODRIGUEZ, T. T.; SANTOS, G. D.; STEPHAN, A. M. Avaliação da Erodibilidade dos Solos da Erosão do Jardim Botânico de Juiz de Fora. *In*: XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos[...]**. Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/cobramseg-2022/papers/avaliacao-da-erodibilidade-dos-solos-da-erosao-do-jardim-botanico-de-juiz-de-fora->. Acesso em: 08 out. 2022.

CASTRO, C. L. D.; SOARES, A. B.; AGUIAR, M. F. P. D. Soil-water characteristic curve of polypropylene fibrereinforced sandy soil. **Soil and Rocks**. v.45, n.3, july-september. 2022. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2022.070021>.

CASTRO, M. D. D. **Influência da sucção na perda de massa de um solo arenoso laterítico submetido ao efeito de ondas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

CAVALCANTE, A. L. B.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Probabilidade de ruptura transiente de taludes não saturados em bordas de reservatórios. *In*: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. cap.20. p. 469- 488.

CHAMECKI, P. R. **Metodologias de laboratório para estudos da erosão hídrica em solos: aplicação a uma argila da formação Guabirotuba**. 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS-CNM. **Danos e Prejuízos Causados por Desastres no Brasil entre 2013 a 2022**. Estudos Técnicos/Defesa Civil - abril de 2022. 2022. Disponível em: <http://www.desastres.cnm.org.br/>.

DELCOURT, R. T.; CAMPOS, T. M. P. D.; ANTUNES, F. D. S. Interrelationship among weathering degree, pore distribution and water retention in an unsaturated gneissic residual soil. **Engineering Geology**, n. 299. 2022. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106570.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 258/2023 – ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2023.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211–223. 1994. DOI: 10.1029/93wr02676.

EYO, E. U.; NG'AMBI, S.; ABBEY, S. J. An overview of soil–water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. **Journal of King Saud**

University – Engineering Sciences. v.34, n.1, p. 31-45, january. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.013>.

FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 1991.

FELIPE, R. D. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. 1. ed. Curitiba: MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná, 2011.

FELIPE, R. D. S.; FALCADE, D.; LOYOLA, L. C. D.; JUNIOR, O. S. **Formação Guabirotuba – Uso e Ocupação**: Sugestões para as análises de processos de projetos para ocupação. Curitiba: Divisão de Geologia / GEGE / DIGET / IAT, 2022.

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

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação serra geral**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOT, W. J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of Environmental Management**. n. 90, p. 2542-2550. 2009. DOI: [10.1016/j.jenvman.2009.01.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.014).

FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; RENARD, K. G.; YODER, D. C.; MCCOOL, D. K.; PORTER, J. P. Support practice factor (P). *In*: **Predicting soil erosion by water: a guide to conservationa planning with the revised universal soil loss equation (rusle)**. Tucson/AZ: US Department of Agriculture, 1997. cap. 6, p. 183-252.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**. v. 103, n. 5, p. 447–466, may. 1977. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. FREDLUND, M. D.; **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

FREDLUND, D. G. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE**. v. 132, n. 3, p. 286-321, march. 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(286)).

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 32, n. 4, p. 521-532, august. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1139/t94-061>.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 32, n. 4, p. 521-532, august. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1139/t94-061>.

FREDLUND, D. G. Seepage in saturated soils. Session 3 on Groundwater and Seepage Problems. *In*: Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981, Stockholm. **Proceedings[...]**. Stockholm: University of Saskatchewan, v4, p. 629–641, june. 1981.

FREIRE, E. P. Ensaio Inderbitzen Modificado: Um Novo Modelo para Avaliação do Grau de Erodibilidade do Solo. *In*: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001, Goiânia. **Anais[...]**. Goiânia: ABGE, 2001.

FREIRE, O., PESSOTTI, J. E. S. Erodibilidade dos solos do estado de São Paulo. **Anais Da Escola Superior De Agricultura Luiz De Queiroz**. v. 31, p. 333-350. 1974. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761974000100026>.

GARDNER, W.R. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils, Highway Research Board Special Report 40. *In*: International Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, 1958, Washington, p. 78-87.

GEOTECHNICAL CONSULTING & TESTING SYSTEMS - GCTS. **GCTS: SWC-150 User's Guide e Reference Manual**. 2007. Disponível em: [https://www.gcts.com/product/soil-water-characteristic-curve/#:~:text=The%20Fredlund%20SWCC%20Device%20\(SWC,SWCC\)%20for%20a%20soil%20sample](https://www.gcts.com/product/soil-water-characteristic-curve/#:~:text=The%20Fredlund%20SWCC%20Device%20(SWC,SWCC)%20for%20a%20soil%20sample).

GITIRANA JR., G. D. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**. v. 130, n. 2, p. 209-212, february. 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:2\(209\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(209)).

GITIRANA JR., G. D. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. *In*: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. cap.9. p. 205- 229.

GITIRANA JR., FREDLUND, D. G.; LIMA, M. C. G. Fluxo em Solos não Saturados e o Processo Erosivo. *In*: **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. São Paulo: ABMS, 2006. cap.9. p. 285- 319.

GOOGLE EARTH PRO. 2023. Disponível em: https://earth.google.com/web/search/25%C2%B026%2744.69%22S;+49%C2%B021%2714.34%22O/@-25.44564583,-49.3537512,954.04259873a,358.684823d,30.00000051y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCcVXV3fnbjnAERdNBoYDcJnAGb1i1ea9q0jAIXZYMI__rkjA?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=pt-BR.

HJULSTRÖM, F. Studies of morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. **Geological institute bulletin**. v. 25, p. 221-527. 1935

IBRAHIM, A.; MUKHLISIN, M.; ALIAS, R. Influence of hydraulic properties to residual soil. **Physuc and Chemistry of the Earth**. n. 129. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103345>.

INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**. v.1, n.7, p.553–554. 1961.

JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. D. F.; SANTOS, R. M. M. D.; GUIMARÃES, R. C.; LIMA, M. C. G. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. *In: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. São Paulo: ABMS, 2006. cap.3. p. 93-156.

KHAN, A.; RAHMAN, A. Quantification of Soil Erosion by Integrating Geospatial and Revised Universal Soil Loss Equation in District Dir Lower, Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: Part B (Life and Environmental Sciences)*. v.58, n. 4, p.17–28. 2021. DOI: [https://doi.org/10.53560/PPASB\(58-4\)678](https://doi.org/10.53560/PPASB(58-4)678).

KORMANN, A. C. M. **Comportamento geomecânico da formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**. v.32, n.9, p.2697-2703, september. 1996. DOI: 10.1029/96wr01776.

LI, P.; PAN, Z.; XIAO, T.; WANG, J. Effects of molding water content and compaction degree on the microstructure and permeability of compacted loess. **Acta Geotechnica**. n.18, p. 921–936. 2023. DOI: [//doi.org/10.1007/s11440-022-01592-8](https://doi.org/10.1007/s11440-022-01592-8).

LI, X.; LI, J.H.; ZHANG, L.M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters. **Comput. Geotech.** n.57, p. 85–96. 2014. DOI:[//10.1016/j.compgeo.2014.01.004](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.004).

LIMA, A.; RODRIGUES, R. A. Terminologia e simbologia. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.1. p. 1- 20.

LIMA, F. M. D. **Faciologia e ambientes deposicionais da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba-PR**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

LIMA, M. C.; ALMEIDA, J. G. R.; MEDEIROS, G. F.; MORTARI, D.; ROMÃO, P. D. A.; MASCARENHA, M. M. D. A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Sulcos, ravinas e voçorocas. *In: Erosão em Borda de Reservatório*. Goiânia: UFG, 2017. cap. 4, p. 65-90.

LIMA, M. J. D.; ZORNBERG, J. G.; PALMEIRA, E. M. Barreiras capilares em coberturas evapotranspirativas. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.20. p. 555- 580.

LIU, J.; YANG, Y.; ZHENG, Q.; SU, X.; ZHOU, Z. Response of soil aggregate stability and rill erodibility to soil electric field. **Catena**. v.215, august. 2022. DOI: [//doi.org/10.1016/j.catena.2022.106338](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106338).

LIU, H.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; DU, H. Use of osmotic tensiometers in the determination of soil-water characteristic curves. **Engineering Geology**. n.312. 2023. DOI: [//doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106938](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106938).

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. New Jersey: John Wiley e Sons, Inc., 2004.

MA, Y. **Multy Scale Research of Loess Structure**. 2017. Thesis (Doctor of Science) – Northwest University, Xi' an, China.

MACEDO, L. T. D. S. D.; MORAES JÚNIOR, J. L. D. S.; SANTOS, A. D. L.; FARIAS FILHO, M. S. Mapeamento de Voçorocas e do Risco de Erosão em Área Urbana no Oeste do Estado do Maranhão. **Revista GeoUECE**. v. 8, n. 14, p. 298-313, jan-jun. 2019.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Potenciais de água no solo. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.4. p. 79- 96.

MACHADO, S.L.; ZUQUETTE, L.V. Transporte de massa e mecanismos de retenção em solos não saturados. *In: V Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados*. São Carlos, v. 2, p. 545-572. 2005.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA JR., G. D. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.10. p. 231- 256.

MASCARENHA, M. M. D. A.; MAHLER, C. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; NACINOVIC, M. G. G.; BANDEIRA, A. P. N.; ALMEIDA, J. G. R. Erosão. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. cap.21. p. 581- 612.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A. Slope Lenght and Steepness Factors (LS). *In: Predicting soil erosion by water: a guide to conservationa planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Tucson/AZ: US Department of Agriculture, 1997. cap. 4, p. 101-142.

MENEZES, M.B.M.D., PEJON, O.J. Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**. n.29, p.211–228. 2010.

MESQUITA, M.D.G.B.D.F., MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo The dependence of the saturated hydraulic conductivity on physical soil properties. **Ciência Rural**. p.963–969. 2004.

MIGUEL, M. G.; BONDER, B. H. Soil–Water Characteristic Curves Obtained for a Colluvial and Lateritic Soil Profile Considering the Macro and Micro Porosity. **Geotech Geol Eng**. v.30, p.1405-1420. 2012. DOI: //doi.org/ 10.1007/s10706-012-9545-y.

MILANI, D.M., FERREIRA, J.W. DOS S., CASAGRANDE, M.D.T., ANDRELLO, A.C., TEIXEIRA, R.S. Effect of Sandy Soil Partial Replacement by Construction Waste on Mechanical Behavior and Microstructure of Cemented Mixtures. **Sustainability**. 14. 2022. DOI://doi.org/10.3390/su141912438.

MINERAIS DO PARANÁ S/A-MINEROPAR. **Mapa geológico do estado do Paraná: Folha de Curitiba**. Curitiba: MINEROPAR, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

MORAGODA, N.; KUMAR, M.; COHEN, S. Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities. **Earth-Science Rev.** n. 229, 104032. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104032>.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3. ed. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2005.

MUALEM, Y. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v. 12, p. 513–522. 1976.

MUÑOZ, Y. O.; IZZO, R. L. D. S.; ALMEIDA, J. L. D.; BALDOVINO, J. A.; ROSE, J. L. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirotuba formation. **Transportation Geotechnics**. v.31, november. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. **Eur. J. Soil Sci.** v.53, p. 449–463. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00443>.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. *In*: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais**. Rio de Janeiro: ABMS, 1994.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia. *In*: VIII Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, 1996, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABGE, 1996.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil Characterization of Mapping Units for Highway Purposes in a Tropical Area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. n.19, p. 196-199. 1979.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidade rodoviárias. *In*: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, 1981, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, CNPQ, ABMS, 1981.

OLIVEIRA, F. F.; ARAUJO, R. D. C. D. Uso de Parâmetros Geotécnicos como Indicadores da Erodibilidade de Solos. **Geotecnia**. n.142, p. 63-75, march. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.142.03>.

OLIVEIRA JR., J.C.D., DE PAULA SOUZA, L.C., DE FREITAS MELO, V., DA ROCHA, H.O. Spatial variability of mineralogical properties in soil of the guabirotuba formation of Curitiba (PR). **Rev. Bras. Cienc. do Solo**. n.35, p.1481–1490. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000500002>.

OLIVEIRA, A.D.D., PELAQUIM, F.G.P., ZANIN, R.F.B., DE MELO, T.R., FILHO, J.T., ANDRELLO, A.C., TEIXEIRA, R.S. The structure of tropical lateritic soils as an impacting factor in the shape of soil-water characteristic curves. **Soils and Rocks**. n.45, p.1–13. 2022. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2022.070521>.

OLIVEIRA, V.N.; GITIRANA, G.D.F.N., JR.; DOS ANJOS MASCARENHA, M.M.; SALES, M.M.; VARRONE, L.F.R.; DA LUZ, M.P. An Enhanced Flume Testing Procedure for the Study of Rill Erosion. **Water**. v.13, 2956. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13212956>.

OLIVEIRA, V.N. **Avaliação e modelagem de ensaios Inderbitzen com medição de sucção matricial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia - PPG, Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2019.

ORÊNCIO, M. V. **Fundamentos da mecânica dos solos não saturados**. São Carlos, 2021.

PAIVA, C. F. E. D. **Avaliação da erodibilidade de alguns horizontes residuais pertencentes à bacia do rio Una-Taubaté-SP**. 2004. Tese (Doutorado em Ciência) – Divisão de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

PASCOTO, T. V.; FUREGATTI, A. S.; PEIXOTO, A. S. P. Avaliação do fator erodibilidade nos processos erosivos, na cidade de São Manuel/SP. *In: XX COBRAMSEG*, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos[...]**. Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/cobramseg-2022/papers/avaliacao-do-fator-erodibilidade-nos-processos-erosivos-na-cidade-de-sao-manuel-sp>. Acesso em: 15 set. 2022.

PEJON, O. J.; RODRIGUES, V. G. S.; ZUQUETTE, L. V. Impactos Ambientais sobre o Solo. *In: Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. cap. 14, p. 317-343.

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

PUDELL, P.C.A. **Estudo do comportamento mecânico de solo da formação guabirotuba com adição de cal e pó de vidro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

QIAN, M.; ZHOU, W.; WANG, S.; LI, Y.; CAO, Y. The Influence of Soil Erodibility and Saturated Hydraulic Conductivity on Soil Nutrients in the Pingshuo Opencast Coalmine, China. **Int. J. Environ. Res. Public Health**. v.19, n.8. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19084762>.

RAMIREZ, E. F. **Introducing Unsaturated Soil Mechanics to Undergraduate Students through the Net Stress Concepts**. 2013. Thesis (Masters of Science) – Arizona State University, Arizona, 2013.

RENARD, K. G.; MCCOOL, D. K.; COOLEY, K. R.; FOSTER, G. R.; ISTOK, J. D.; MUTCHLER, C. K. Rainfall-Runoff Erosivity Factor (R). *In: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (rusle)*. Tucson/AZ: US Department of Agriculture, 1997. cap. 2, p. 19-64.

REZENDE, L. R. D.; CONCIANI, W.; DELGADO, A. K. C.; NÚÑEZ, W. P.; NERVIS, L. O.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Erosão em vias não pavimentadas e em obras de engenharia e suas consequências para os reservatórios. *In: Erosão em Borda de Reservatório*. Goiânia: UFG, 2017. cap. 19, p. 65-90.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. Projeto de Experimentos. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ROMKENS, M. J. M.; YOUNG, R. A.; POESEN, J. W. A.; MCCOOL, D. K.; EL-SWAIFY, S. A.; BRADFORD, J. M. Soil Erodibility Factor (K). *In: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (rusle)*. Tucson/AZ: US Department of Agriculture, 1997. cap. 3, p. 65-99.

ROMSHOO, S. A.; YOUSUF, A.; ALTAF, S.; AMIN, M. Evaluation of Various DEMs for Quantifying Soil Erosion Under Changing Land Use and Land Cover in the Himalaya. **Frontiers in Earth Science**. v.9, december. 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.782128.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R. D.; SILVA, P. A. H. D.; FIORI, C. O. Geomorfologia do município de Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.14, n.4, p. 327-341, out-dez. 2013.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H. D. Contribuição à geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR). **Boletim Paranaense de Geociências**. n.47, p. 123-142. 1999.

SALES, M. M.; SANTOS, E. C. G. D.; ANGELIM, R. R.; PALMEIRA, E. M. Prevenção e controle de processos erosivos de borda de reservatório. *In: Erosão em Borda de Reservatório*. Goiânia: UFG, 2017. cap. 21, p. 489-509.

SANTOS, R. M. M. D. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia**. 1997. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

SEKI, K. SWRC fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Journal Hydrology and Earth System Sciences**. v.4, p. 407-437. 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hessd-4-407-2007>.

SHAO, L.; WU, S.; GUO, X.; WEN, T. One-Dimensional Seepage of Unsaturated Soil Based on Soil-Water Characteristic Curve. **Processes** n.10. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122564>.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. Identification and Nature of Dispersive Soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. v.102, n. 4, april. 1976. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000256>.

SHERIDAN, G.J.; NOSKE, P.J.; LANE, P.N.J.; SHERWIN, C.B. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. **Catena**. v. 73, p. 49–62. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.08.006>.

SILVA, C. S. D. **Metodologia experimental para determinação de propriedades de erodibilidade em projetos de engenharia natural**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

SILVA, T. O. D.; PITANGA, H. N.; NETO, S. L. S. D.; FERRAZ, R. L.; PAES, B. S. T. Potencial Erosivo de Solos Tropicais a Partir de Ensaio Geotécnicos de Avaliação Direta e Indireta. **Geociências**. v.39, n.2, p.573-584. 2020.

SOUZA, M. P. D. **Levantamento dos Fatores Condicionantes e Deflagradores para o Desenvolvimento dos Processos Erosivos Na Borda Do Reservatório da UHE de Batalha (GO/MG)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

TAYLOR, R. K.; SMITH, T. J. The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. **Clay Minerals**. v. 21, n. 3, p. 235–260, september. 1986. DOI: 10.1180/claymin.1986.021.3.01.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 1943.

VANAPALLI, S. K.; LOBBEZOO, J. P. A Normalized Function for Predicting the Coefficient Permeability of Unsaturated Soils. *In: Unsaturated soils*. Lisse: Sweets and Zeitlinger, 2002. v. 1, p. 839–844.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n.5, p. 892-898, september-october. 1980. DOI:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

VENTURINI, J.A. **Avaliação do efeito da adição de raízes na erodibilidade de um solo arenoso**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

WANG, B.; ZHENG, F.; RÖMKENS, M.J.M.; DARBOUX, F. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. **Geomorphology, Elsevier**. v. 187, p. 1–10. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.018>.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 26, p.189-193. 1971.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1978.

WU, T.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; WANG, S.; LEI, L. Factors affecting the stability of soil aggregates of plinthosols in the middle reaches of the Yangtze River. **Catena**. n. 228, 107159. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107159>.

XIAO, T.; LI, P.; PAN, Z.; WANG, J. Effect of compaction condition on the water retention capacity, microstructure and its evolution during drying of compacted loess. **Geoenvironmental Disasters**. v.9, n.27. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00229-y>.

XU, P.; ZHANG, Q.; QUIAN, H.; LI, M.; YANG, F. An investigation into the relationship between saturated permeability and microstructure of remolded loess: A case study from Chinese Loess Plateau. **Geoderma**. n.382. 2021. DOI: [//doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114774](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114774).

YODER, D. C.; PORTER, J. P.; LAFLIN, J. M.; SIMANTON, J. R.; RENARD, K. G.; MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R. Cover-Management Factor (C). *In: Predicting soil erosion by water: a guide to conservationa planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Tucson/AZ: US Department of Agriculture, 1997. cap. 5, p. 143-182.

ZAMIN, B.; NASIR, H.; SIKANDAR, M. A.; AHMAD, W.; KHAN, B. J.; AHMAD, M.; BASHIR, M. T. Comparative Study on the Field- and Lab-Based Soil-Water Characteristic Curves for Expansive Soils. **Advances in Civil Engineering, Hindawi**. v.2022. 2022. DOI: [//doi.org/10.1155/2022/6390442](https://doi.org/10.1155/2022/6390442).

ZHANG, X.; MAVROULIDOU, M.; GUNN, M. J.; CABARKAPA, Z. Experiences gained using various axis translation technique apparatus to determine soil water retention curve. *In: Unsaturated Soils – Experimental Studies in Unsaturated Soils and Expansive Soils*. Newcastle, Australia: Taylor and Francis Group, 2010. p. 269- 274.

ZHOU, J.; REN, J.; LI, Z. An Improved Prediction Method of Soil-Water Characteristic Curve by Geometrical Derivation and Empirical Equation. **Mathematical Problems in Engineering, Hindawi**. v.2021. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9956824>.

ZHOU, W. H.; YUEN, K. V.; TAN, F. Estimation of soil–water characteristic curve and relative permeabilityfor granular soils with different initial dry densities. **Engineering Geology**. n.179, p.1-9. 2014. DOI: [//dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.013](https://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.013).

ZHOU, J.; YU, J.L. Influences affecting the soil-water characteristic curve. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**. v.6A, n.8, p.797-804. 2005. DOI: [//10.1631/jzus.2005.A0797](https://doi.org/10.1631/jzus.2005.A0797).

ZIEBELL, A. **Mapeamento Geotécnico dos principais condicionantes de ruptura de taludes de corte da duplicação da BR-116 entre São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro (RS)**. 2017. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

APÊNDICE 1 - COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DE MÉDIAS DA PERDA DE MASSA DE SOLO (TESTE DE TUKEY)

ρ_d (g/cm ³)					
EN					
20%	valor-P	50%	valor-P	91,08%	valor-P
15° vs 5°	0,165	15° vs 5°	<0,001	15° vs 5°	0,095
15° vs 10°	0,903	15° vs 10°	0,003	15° vs 10°	0,186
10° vs 5°	0,017	10° vs 5°	<0,001	10° vs 5°	0,407
EI					
20%	valor-P	50%	valor-P	93,49%	valor-P
15° vs 5°	0,019	15° vs 5°	0,195	15° vs 5°	<0,001
15° vs 10°	0,970	15° vs 10°	0,660	15° vs 10°	0,813
10° vs 5°	0,019	10° vs 5°	0,321	10° vs 5°	0,001
EM					
20%	valor-P	50%	valor-P	95,60%	valor-P
15° vs 5°	0,078	15° vs 5°	0,002	15° vs 5°	<0,001
15° vs 10°	0,529	15° vs 10°	0,064	15° vs 10°	0,667
10° vs 5°	0,573	10° vs 5°	0,101	10° vs 5°	0,001
Grau de saturação					
20%					
5°	valor-P	10°	valor-P	15°	valor-P
EN vs EM	<0,001	EN vs EM	<0,001	EN vs EM	0,002
EN vs EI	<0,001	EN vs EI	0,009	EN vs EI	0,048
EI vs EM	0,012	EI vs EM	0,009	EI vs EM	0,126
50%					
5°	valor-P	10°	valor-P	15°	valor-P
EN vs EM	<0,001	EN vs EM	<0,001	EN vs EM	<0,001
EN vs EI	0,903	EN vs EI	0,006	EN vs EI	<0,001
EI vs EM	<0,001	EI vs EM	0,003	EI vs EM	0,057
Srótima					
5°	valor-P	10°	valor-P	15°	valor-P
EM vs EN	0,384	EM vs EN	0,001	EM vs EN	0,033
EM vs EI	0,657	EM vs EI	0,156	EM vs EI	0,184
EI vs EN	0,478	EI vs EN	0,017	EI vs EN	0,520
Inclinação					
5°					
EN	valor-P	EI	valor-P	EM	valor-P
50% vs 91,08%	<0,001	50% vs 93,49%	<0,001	50% vs 95,60%	<0,001
50% vs 20%	<0,001	50% vs 20%	<0,001	50% vs 20%	0,010
20% vs 91,08%	<0,001	20% vs 93,49%	<0,001	20% vs 95,60%	<0,001

10°					
EN	valor-P	EI	valor-P	EM	valor-P
50% vs 91,08%	<0,001	50% vs 93,49%	<0,001	50% vs 95,60%	<0,001
50% vs 20%	<0,001	50% vs 20%	0,005	50% vs 20%	0,020
20% vs 91,08%	<0,001	20% vs 93,49%	<0,001	20% vs 95,60%	0,003
15°					
EN	valor-P	EI	valor-P	EM	valor-P
50% vs 91,08%	<0,001	50% vs 93,49%	<0,001	50% vs 95,60%	<0,001
50% vs 20%	0,007	50% vs 20%	<0,001	50% vs 20%	<0,001
20% vs 91,08%	<0,001	20% vs 93,49%	<0,001	20% vs 95,60%	<0,001

Nota: Destacados os grupos estatisticamente iguais (valor-P>5%) em cor laranja.

ANEXO A - CÓDIGO ARDUINO DO MEDIDOR DE VAZÃO (SILVA, 2021)

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO DOS MEDIDORES DE NÍVEL D'ÁGUA E SENSOR DE UMIDADE

```

int Pulso; //Variável para a quantidade de pulsos
int j=0; //Variável para contagem
float vazaoagua; //Variável para armazenar o valor em L/min
float vazaoaguacorrigida; //Variável para correção do valor de vazão
float alturacorrigida; //Variável para correção do valor de nível d água
float valormedia=0; //Variável para tirar a média de vazão a cada 1 minuto
float alturamedia=0; //Variável para tirar a média de altura a cada 1 minuto
#define sensorPower 7 // Pino digital com +Vcc
#define sensorPin A1 // Pino A1 para receber dados
int val = 0; //variável para armazenar o nível d'água
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(sensorPower, OUTPUT); // Definindo D7 como OUTPUT
  digitalWrite(sensorPower, LOW); //Função para desligar o sensor
  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(0, incrpulso, RISING); //Configura a porta digital 2, para interrupção
}
void loop ()
{
  float level = readSensor(); //Obter a leitura do sensor e plotar
  alturacorrigida = level*0.1562-0.9323;
  ;
  Pulso = 0; //Começa do 0 variável para contar os giros das pás internas
  sei(); //liga interrupção
  delay (2000); //Espera 2 segundos
  cli(); //Desliga interrupção
  vazaoagua = Pulso / 5.5; //Converte para Litros/minuto
  vazaoaguacorrigida = vazaoagua*0.0781-2.1064; //realiza a calibração
  valormedia=valormedia+vazaoaguacorrigida; //Soma a vazão para o calculo da valormedia
  alturamedia=alturamedia+alturacorrigida; //Soma a altura para o calculo da altura media
  j++; //novo ciclo
  Serial.print(" L/minuto - "); //Imprime L/min
  Serial.println(vazaoaguacorrigida); //Imprime na serial o valor da vazão
  Serial.print("Altura Sensor (mm) - "); //Imprime Altura Sensor (mm)
  Serial.println(alturacorrigida); //Imprime o valor da altura corrigida
  if(j==60)
  {
    valormedia = valormedia/60; //valormedia dividindo por 60
    alturamedia = alturamedia/60; //alturamedia dividindo por 60
    Serial.print("\n Media por minuto = "); //Imprime a frase valormedia por minuto =
    Serial.print(valormedia); //Imprime o valor da valormedia
  }
}

```

```

Serial.println(" Litros/minutos - "); //Imprime L/min
Serial.print(alturamedia); //Imprime o valor da altuamedia
Serial.println(" milímetros - "); //Imprime milímetros
valormedia = 0; //Torna variável valormedia = 0, para uma nova contagem
alturamedia = 0; //Torna variável alturamedia = 0, para uma nova contagem
j=0; //Torna a o contador 0,para uma nova contagem
}
}
//Função para ler a altura de maneira não contínua (evitar que o sensor estrague)
int readSensor() {
    digitalWrite(sensorPower, HIGH); // Liga o sensor
    delay(100);                      // 10 milliseconds
    val = analogRead(sensorPin);     // Leitura do Sensor
    digitalWrite(sensorPower, LOW);  // Desliga o sensor
    return val;                      // Manda a leitura
}
void incrpulso ()
{
    Pulso++;
}

```