

CLEITTON RAIAN BATISTA PEREIRA

Avaliação de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, Guaratinguetá/SP

Cleitton Raian Batista Pereira

Avaliação de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, Guaratinguetá/SP

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Mariana Ferreira Benessiuti Motta

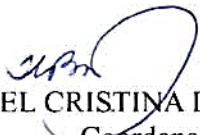
Coorientador: Prof^o Dr^o Paulo Valladares Soares

P436a	Pereira, Cleiton Raian Batista Avaliação de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, Guaratinguetá/SP / Cleiton Raian Batista Pereira – Guaratinguetá, 2022. 92 f : il. Bibliografia: f. 92-98 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. Orientadora: Profª Drª Mariana Ferreira Benessiuti Motta Coorientador: Prof. Dr. Paulo Valladares Soares 1. Erosão. 2. Solos - Análise. 3. Mecânica dos solos. I. Título. CDU 624.131
-------	---

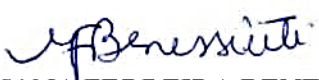
CLEITTON RAIAN BATISTA PEREIRA

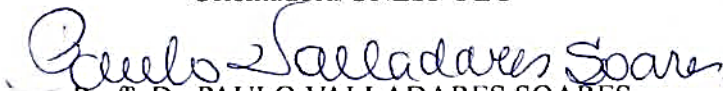
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

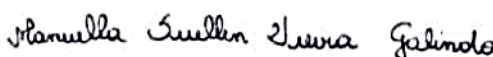

Prof.^a. Dr. ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^a. Dr. MARIANA FERREIRA BENESSIUTI MOTTA
Orientadora/UNESP-FEG


Prof.^o. Dr. PAULO VALLADARES SOARES
Coorientador/UNESP-FEG


Prof.^o. Dr. GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO
UNESP-FEG


Eng.^a Geotécnica MANUELLA SUELLEN VIEIRA GALINDO, M.Sc
ALTA Geotecnia Ambiental

Outubro de 2022

DADOS CURRICULARES

CLEITTON RAIAN BATISTA PEREIRA

NASCIMENTO 14.08.1998 – Esperança / PB

FILIAÇÃO Edimilson Pereira da Silva
Lenizete Batista dos Santos

2017/2022 Bacharel em Engenharia Civil com Ênfase em Geotecnia pelo Programa de Estudos Aprofundados
Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Dedico este trabalho a Deus, e de maneira especial à minha família e a todos àqueles que depositaram confiança em mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pela presença constante na minha vida e a todos os dons que a mim foram concedidos.

A minha mãe, Lenizete, maior exemplo de determinação e perseverança a qual eu tive a sorte de ter em minha vida. Pelo amor e carinho, o meu obrigado.

Aos meus pais de criação, Fátima e Antônio, agradeço por todo o amor e carinho que a mim foram dados.

A minha orientadora, Prof^a Dr. Mariana Ferreira Benessiuti Motta, agradeço acima de tudo pelo exemplo, pelo carinho e dedicação. Agradeço por todos os momentos de incentivo, orientações e auxílio que me trouxeram até aqui.

Ao Prof^o Dr. George de Paula Bernardes, a minha primeira referência no meio da Engenharia Geotécnica, a quem eu tive a honra de ser aluno, muito obrigado pelo carinho e incentivo.

Ao Prof^o Dr. Paulo Valladares Soares, meu coorientador, por me acompanhar ao longo desses anos, por todas as conversas e orientações que foram cruciais no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof^o Dr. Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso, por ter aceitado o meu convite para ser membro dessa banca.

Aos meus amigos que compartilham comigo esses últimos cinco anos, de maneira especial a Sara, Mylena, Isabelle, Elizabeth, Mateus, Thiago, Rafael Fukai, Rafael Perez e a todos da República Labiryntho.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos, Flávio Bernardes, muito obrigado pelo acompanhamento e instrução.

Ao Prof^o Dr. Mateus Ricardo Nogueira Vilanova pela disponibilização do laboratório de Análises Químicas para realização dos ensaios.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil, o meu muito obrigado pela qualidade de ensino que a mim foi transmitido.

A Engenheira Geotécnica Ruth de Castro, por todos os ensinamentos comigo compartilhados acerca da Geotecnia Experimental.

A Engenheira Manuella Gallindo, pela paciência, incentivo, por compartilhar comigo toda a sua experiência e ter aceitado participar dessa banca.

A toda equipe da ALTA Geotecnia, que me acolheram e contribuíram significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

O meu muito obrigado a todos os técnicos, servidores, auxiliares e demais membros da nossa comunidade universitária.

E por fim, agradeço a Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, eterna FEG, por ter me propiciado um ensino público, gratuito e de qualidade. Agradeço a UNESP pela concessão da bolsa BAAE I durante o ano de 2018.

*“Magnificat anima mea Dominum
Et exultavit spiritus meus in Deo salutari meo.
Quia respexit humilitatem ancillæ suæ: ecce
enim ex hoc beatam me dicent omnes
generationes.
Quia fecit mihi magna qui potens est, et
sanctum nomen eius.
Et misericordia eius a progenie in progenies
timentibus eum.
Fecit potentiam in brachio suo, dispersit
superbos mente cordis sui.
Deposuit potentes de sede et exaltavit humiles.
Esurientes implevit bonis et divites dimisit
inanes,
Suscepit Israel puerum suum recordatus
misericordiæ suæ,
Sicut locutus est ad patres nostros, Abraham et
semini eius in sæcula.”*

Cântico de Maria (Magnificat)

RESUMO

Os processos erosivos ocorrem em todas as regiões do planeta, se mostrando eficazes modificadores da paisagem e da forma, gerando importantes degradações ambientais e custos socioeconômicos. O sentido amplo do ciclo natural da erosão pode ser classificado como o conjunto de processos pelos quais os solos são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto para o outro a partir de um agente erosivos. A erodibilidade é um dos principais fatores que regem a erosão, definida como a ausência de resistência do solo aos processos erosivos. Sendo uma característica intrínseca do solo variável de muitos fatores condicionantes (e.g. distribuição granulométrica, coesão, capacidade de infiltração e resistência a tração). Com isso, o presente trabalho visa compreender os mecanismos da avaliação de um solo do Pingo de Ouro/Guaratinguetá, a partir dos métodos indiretos, que classificam a susceptibilidade à erodibilidade dos solos frente as caracterizações geotécnicas clássicas, e através métodos propostos pela metodologia MCT para solos tropicais. Associado a esse estudo, a pesquisa envolveu a determinação da curva característica solo-água (SWCC) e a verificação do solo frente a variação da sucção/umidade e resistência a tração. Os resultados dos métodos diretos apontaram que o solo estudado sofre os efeitos da erodibilidade, de modo especial a erosão hídrica, sendo classificado como um solo de média a média alta susceptibilidade à erosão. Os métodos indiretos se mostraram pouco aderentes aos resultados observados nos ensaios de determinação direta. A curva característica solo-água apresentou um comportamento bimodal, característico de alguns solos coluvionares e residuais, com valor de entrada ar próximo a 5kPa. Esse resultado atrelado aos mecanismos dos solos não saturados e de alta porosidade aponta uma alta susceptibilidade desse solo à erosão superficial. A avaliação do comportamento sob os efeitos do teor de saturação do solo à resistência a tração levou a uma relação exponencial crescente da sucção e da tração, contudo o estudo não contemplou a avaliação das amostras na saturação residual. De forma ampla, o solo estudado apresentou diante dos estudos e ensaio susceptibilidade aos processos erosivos hídricos, apresentando uma perda de resistência abrupta frente os processos de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Erodibilidade. Erosão. Solos não saturados. Curva característica solo-água.

ABSTRACT

Erosive processes occur in all regions of the planet, proving to be effective modifiers of landscape and shape, generating important environmental degradation and socioeconomic costs. The broad sense of the natural erosion cycle can be classified as the set of processes by which soils are degraded, dissolved or weathered and transported from one point to another from an erosive agent. Erodibility is one of the main factors governing erosion, defined as the absence of soil resistance to erosive processes. Being an intrinsic characteristic of the soil, it varies from many conditioning factors (e.g. granulometric distribution, cohesion, infiltration capacity and tensile strength). With this, the present work aims to understand the mechanisms of evaluation of a soil from Pingo de Ouro/Guaratinguetá, from the indirect methods, which classify the susceptibility to erodibility of soils in the face of classical geotechnical characterizations, and through methods proposed by the MCT methodology for tropical soils. Associated with this study, the research involved the determination of the soil-water characteristic curve (SWCC) and the verification of the soil against the variation of suction/moisture and tensile strength. The results of the direct methods showed that the studied soil suffers the effects of erodibility, especially water erosion, being classified as a soil of medium to medium high susceptibility to erosion. The indirect methods showed little adherence to the results observed in the direct determination assays. The soil-water characteristic curve showed a bimodal behavior, characteristic of some colluvial and residual soils, with air inlet value close to 5kPa. This result linked to the mechanisms of unsaturated and high porosity soils points to a high susceptibility of this soil to surface erosion. The evaluation of behavior under the effects of soil saturation to tensile strength led to an exponentially increasing relationship between suction and traction, however the study did not include the evaluation of samples at residual saturation. In a broad way, the studied soil presented, before the studies and test, susceptibility to water erosive processes, presenting an abrupt loss of resistance in the face of saturation processes.

KEYWORDS: Erodibility. Erosion. Unsaturated soils. Soil–water characteristic curve.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos erosivos na região da bacia do Rio Paraíba do Sul – bairro Pingo de Ouro – Guaratinguetá/SP.	16
Figura 2 - "Splashing" ou salpicamento e formação de poça.	19
Figura 3 – Fluxograma do processo erosivo.....	20
Figura 4 - Erosão superficial (a) laminar, (b) linear.	21
Figura 5 – Nomograma de Wishmeier e Mannering (1969).....	30
Figura 6 - Ábaco de classificação dos solos à erodibilidade de Molinero Junior <i>et al.</i> (2011).	31
Figura 7 - Grau de dispersão em solos pelo ensaio <i>crumb test</i> , avaliação qualitativa.....	33
Figura 8 - Sucção <i>versus</i> Massa Total Erodida.....	36
Figura 9 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.	37
Figura 10 – Representação da interface solo-ar-água, através de uma geometria elipsóide: a) em um tubo cilíndrico, b) interface elipsóide finita, c) um exemplo nos poros do solo.	38
Figura 11 - Variação das distribuições de poropressão com o tempo.	38
Figura 12 – Tipos de fluxo da técnica do papel filtro (a) com contato, (b) sem contato.	41
Figura 13 – Curva de retenção típica - SWCC.	43
Figura 14 – Curva de retenção típica - SWCC.	44
Figura 15 – Estrutura e distribuição do tamanho dos poros de solos com características unimodal e bimodal.	46
Figura 16 – Área de Estudo - Centro de Convivência – ILA, Pingo de Ouro – Guaratinguetá/SP.	47
Figura 17 – Mapeamento das unidades geológicas do município de Guaratinguetá.....	48
Figura 18 – Mapeamento do relevo do município de Guaratinguetá.	49
Figura 19 – Coleta de amostra do tipo deformada (a) saco com amostragem em laboratório, (b) processo de coleta da amostra	51
Figura 20 – Coleta de amostra do tipo indeformada em anel metálico (a) cilindro após coleta, (b) e (c) procedimento de talhagem da amostra em campo	51
Figura 21 – (a) Amostras em anéis de PVC – talhagem, (b) armazenagem.	52
Figura 22 – Coleta de amostra do tipo indeformada do tipo bloco (a) abertura e preparação do local de coleta, (b) talhagem do bloco em campo e (c) armazenagem e identificação da amostra	53
Figura 23 – Etapa de sedimentação do ensaio sedimentométrico comparativo.	56

Figura 24 – Procedimento para realização do ensaio teor de matéria orgânica (a) Preparo das amostras nos recipientes de porcelana, (b) Amostras nos recipientes de porcelana posicionadas na mufla.....	58
Figura 25 – <i>Crumb test</i> – (a) preparação da amostra e (b) submersão do solo	59
Figura 26 – Ensaio de desagregação por imersão (a) amostra com imersão parcial, (b) amostra com imersão total.....	60
Figura 27 – Amostras do ensaio de desagregação	60
Figura 28 – Etapa de saturação das amostras submetidas à imersão parcial.....	61
Figura 29 - Materiais e montagem do ensaio de infiltrabilidade - MCT.	63
Figura 30 - Curva típica ensaio de Infiltrabilidade – MCT.	64
Figura 31 – Preparo das amostras do ensaio de perda de massa específica.	65
Figura 32 – Processo de imersão das amostras.....	65
Figura 33 – Prensa e equipamentos utilizados para realização dos ensaios de compressão diametral.....	70
Figura 34 – Resultado dos ensaios de dispersão rápida (<i>Crumb test</i>).	74
Figura 35 – Resultado dos ensaios de desagregação – Imersão Parcial.	74
Figura 36 – Resultado dos ensaios de desagregação – Imersão Total.	75
Figura 37 – Amostras dos ensaios de erodibilidade específica após a imersão de 24 horas. ...	77
 Gráfico 1 – Número de publicações com a palavra-chave “ <i>erodibility</i> ” na base do ICE, nos últimos 5 anos.....	15
Gráfico 2 - Série histórica dos dados climáticos de Guaratinguetá/SP (1999-2022).	50
Gráfico 3 - Curva de calibração para os papéis filtro Whatman nº 42 e Schleicher & Schuell nº 589.	66
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica – sedimentometria comparativa.	72
Gráfico 5 – Resultado dos ensaios de infiltrabilidade – metodologia MCT.....	76
Gráfico 6 – Curva característica solo-água (SWCC) – Umidade volumétrica <i>versus</i> Sucção Matricial.....	80
Gráfico 7 – Resistência à tração <i>versus</i> Sucção Matricial.....	81

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1– Enfoque do estudo da erodibilidade por diferentes áreas do conhecimento.....	24
Quadro 2– Ordem de susceptibilidade a erosão, modelo de Gray e Leiser (1989).	28
Quadro 3 – Faixa do modelo de Santos e Castro (1967).	28
Quadro 4 – Critério adotado por Santos (2001) de avaliação da erodibilidade pelos limites de consistência.....	29
Quadro 5 – Critério adotado por Santos (2001) de avaliação da erodibilidade pelo coeficiente de uniformidade.....	29
Quadro 6 – Classificação para o Ensaio de Dispersão Rápida (<i>crumb test</i>).....	33
Quadro 7 – Parâmetros Físicos da curva SWCC.....	43
Quadro 8 – Equações matemáticas dos modelos proposto para a curva SWCC.....	45
Tabela 1– Faixa do modelo de Bouyoucos (1935) e Maningel <i>et al.</i> (2002), do Fator de Erodibilidade.	27
Tabela 2 - Técnicas para a medição da sucção em solos.	40
Tabela 3 – Tempo de equilíbrio para medição da sucção total.	42
Tabela 4– Classificação para o ensaio sedimentométrico comparativo.	57
Tabela 5 – Resumo da caracterização geotécnica.....	71
Tabela 6 – Distribuição granulométrica sedimentométrico comparativo.....	73
Tabela 7– Resultado do ensaio de perda de passa por imersão.	77
Tabela 8 – Dados da curva característica do solo (SWCC).	78
Tabela 9 – Parâmetros de ajuste da curva característica solo-água pelo modelo de Van Genutchen (1980).	79
Tabela 10 – Resultado dos ensaios de resistência à tração com variação de sucção	80
Tabela 11– Resultado dos modelos de avaliação de erodibilidade – diretos e indiretos.	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	GENERALIDADES	15
1.2	OBJETIVOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	EROSÃO	18
2.1.1	Erosão Hídrica	19
2.1.2	Agentes Erosivos	21
2.2	ERODIBILIDADE DOS SOLOS	23
2.2.1	Modelos de Avaliação de Erodibilidade pela Caracterização Geotécnica	25
2.2.2	Dispersibilidade em solos Argilosos	31
2.2.3	Metodologia MCT (Mini, Compactado, Tropical) - Adaptado	34
2.2.4	Relação da Erodibilidade e a Sucção	35
2.3	MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS	36
2.3.1	Sucção no solo	39
2.3.2	Medida de Sucção no solo	39
2.3.3	Curva de Retenção de Água no Solo – SWCC	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
3.1.1	Aspectos geológicos e geomorfológicos	48
3.1.2	Aspectos Climáticos	49
3.2	AMOSTRAGEM E COLETA DE AMOSTRA	50
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	53
3.3.1	Limites de Consistência, densidade relativa dos grãos e ensaio sedimentométrico comparativo	54
3.3.2	Teor de Matéria Orgânica	57
3.4	ENSAIOS DE ERODIBILIDADE	58
3.4.1	Ensaio de dispersão rápida (<i>Crumb test</i>)	58
3.4.2	Ensaio de Desagregação	59
3.5	ENSAIOS PELA METODOLOGIA MCT - Adaptado	61
3.5.1	Ensaio de infiltrabilidade	61
3.5.2	Ensaio de erodibilidade específica (perda de massa por imersão)	64
3.6	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA: MÉTODO DO	

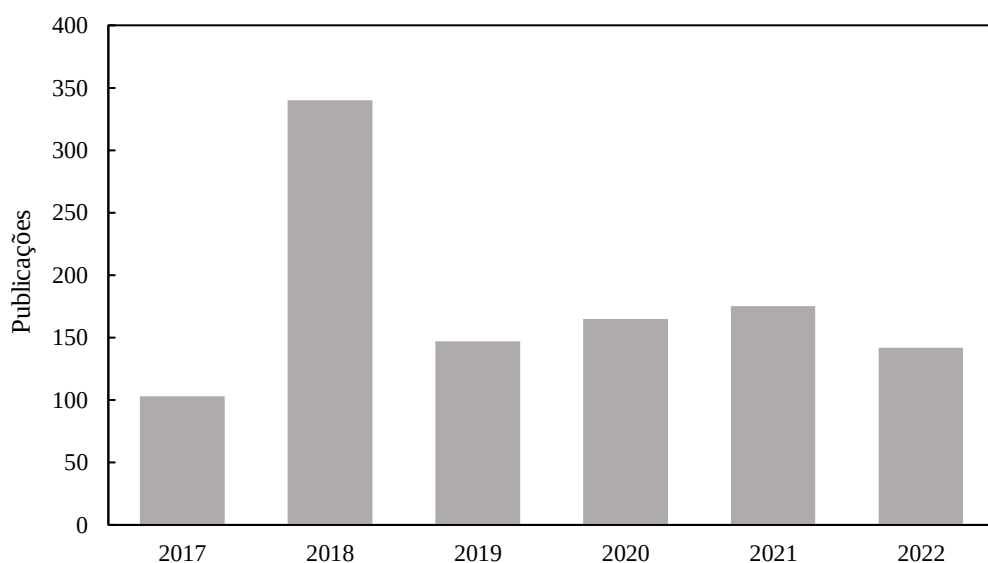
	PAPEL FILTRO	66
3.7	ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM VARIAÇÃO DE SUÇÃO	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	71
4.2	ENSAIOS DE ERODIBILIDADE	73
4.2.1	Ensaio de dispersão rápida (<i>Crumb test</i>)	73
4.2.2	Ensaio de Desagregação	74
4.2.3	Ensaio de infiltrabilidade	75
4.2.4	Ensaio de erodibilidade específica (perda de massa por imersão)	76
4.3	CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO (SWCC) E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ..	78
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE AVALIAÇÃO	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS....	84
5.1	CONCLUSÃO	84
5.2	SUGESTÕES.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O conjunto dos processos erosivos vem acarretando grandes impactos negativos com a degradação do meio físico. Ocorrendo principalmente em países de clima tropical, seus efeitos são capazes de ocasionar a contaminação de rios e nascentes, e acelerar os processos de assoreamento de cursos d'água. Na agricultura, o efeito pode causar o aumento do carreamento de nutriente, gerando diminuição na fertilidade de solos, decorrendo em impactos socioeconômicos. Sua maior interferência é vista na área da infraestrutura civil, muitos processos de instabilização são iniciados pelos processos erosivos, resultando na degradação das infraestruturas existentes, contribuindo para o aumento dos problemas sociais. Pela importância em diversas áreas da sociedade, o tema vem ganhando espaço no meio científico. O levantamento da quantidade de publicações do tema “erodibilidade” na base de dados do ICE - *Institution of Civil Engineers* (Gráfico 1), mostrou essa tendência, em que anualmente são publicados em média 179 artigos em revistas de grande impacto no meio geotécnico (e.g. *Geotechnique*, *Dams and Reservoirs* e *Geotechnical Research*).

Gráfico 1 – Número de publicações com a palavra-chave “erodibility” na base do ICE, nos últimos 5 anos.



Fonte: ICE Virtual Library (2022).

Na bacia do Rio Paraíba do Sul, os problemas relativos à erosão são frequentes, sendo estudados por diversos autores (e.g. Soares (2005), Santos (2006), Benessiuti (2011), Rossetti (2011), Souza *et al.* (2018)). Tais eventos estão diretamente relacionados à fragilidade do meio físico da região, pelos fatores naturais e antrópicos com origens no “ciclo do café” (durante o século XIX). Santos (2006) aborda os principais agentes causadores como: o desmatamento, as queimadas, o uso agropecuário inadequado, a extração mineral, o uso e ocupação irregular de encostas e estradas vicinais mal planejadas e sem conservação. Rossetti (2011) destaca dentre os processos, os frequentes transbordamentos do Rio Paraíba do Sul e seus afluentes, a contaminação dos solos pelo esgotamento sanitário e a disposição inadequada dos resíduos sólidos (alguns desses processos são apresentados na Figura 1). Bennesiutti (2011) correlaciona esses agentes com os processos de movimentos de massa na região.

Figura 1 – Processos erosivos na região da bacia do Rio Paraíba do Sul – bairro Pingo de Ouro – Guaratinguetá/SP.



Fonte: Retirado de Google Earth (2022).

O sentido amplo do ciclo natural da erosão pode ser classificado como o conjunto de processos pelos quais os solos são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto para o outro a partir de um agente erosivos, sendo esses divididos em dois: (a) agente geológico – conjunto de ações naturais do meio, que ocorrem de forma gradativa e mais lenta; e (b) agente antrópico – conjunto de ações humanas que aceleram o processo, impedindo a adaptação do meio, gerando impactos mais rápidos e significativos a pequeno e médio prazo. Pascoto (2020) classifica a influência à susceptibilidade à erosão pelas características

geológicas-geotécnicas do solo: textura, permeabilidade, erodibilidade etc.; pela superfície: declividade, uso e ocupação dos solos, sistemas de drenagem etc.; e das características locais: chuva – índice pluviométrico, temperatura, erosividade etc.

A erodibilidade é um dos principais fatores que regem a erosão, é definida por Mascarenhas *et al.* (2015) como a ausência de resistência do solo aos processos erosivos. Sendo uma característica intrínseca do solo, podendo ser retratada como a maior facilidade, ou não, com que as partículas do solo são destacadas e transportadas, pelos agentes erosivos. Porto *et al.* (2018) descreve que a erodibilidade constitui uma propriedade de grande complexidade, em função de um grande número de fatores condicionantes, como por exemplo: tamanho de partículas, propriedade dos agregados, da coesão, da capacidade de infiltração do solo, da textura, da composição química e orgânica do material, além de fatores relacionados à resistência dos constituintes ao destacamento (e.g. resistência à tração – Bastos (1999), Camapum de Carvalho *et al.* (2015), e Souza *et al.* (2018)).

Neste contexto, este trabalho visa compreender esses mecanismos de susceptibilidade à erosão em solo no bairro do Pingo de Ouro, associado a influência da erosão hídrica superficial e dos ciclos de umedecimento do solo (advindo das ações antrópicas e naturais), correlacionando esses efeitos na resistência a tração do solo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é a avaliação laboratorial de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, em Guaratinguetá – SP. Como objetivos específicos, tem-se os seguintes itens elencados abaixo:

- i. Caracterização geológica-geotécnica da região do Pingo de Ouro, Guaratinguetá - SP;
- ii. Determinação dos principais índices físicos, percentual de matéria orgânica, e de consistência do solo estudado;
- iii. Classificação da erodibilidade a partir da Metodologia MCT;
- iv. Determinação e avaliação do comportamento quanto a erodibilidade a partir dos ensaios de dispersão rápida, desagregação e sedimentometria comparativa ;
- v. Entendimento da curva característica do solo pelo método do papel filtro e a resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral para diferentes valores de sucção/umidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

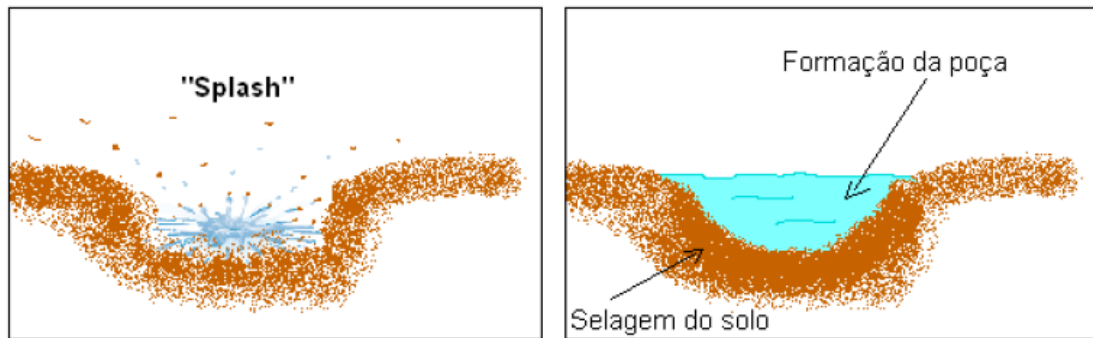
2.1 EROSÃO

Diuturnamente o nosso ambiente e a paisagem que muitas vezes se parece perene, sofrem e estão sujeita a alterações, essas que são causadas por agentes atmosféricos e pelos seres vivos (agentes antrópicos). Ao passar dos períodos geológicos as montanhas perdem altura, as escarpas costeiras desmoronam e rios cavam vales mais profundos na terra (SANTOS, 2006).

O termo erosão descende do latim, “*erodere*”, que significa corroer, aquilo que corrói. Dessa forma, atribuindo uma definição abrangente, pode-se considerar a erosão como um conjunto, ou ciclo, de processos que envolvem a desagregação, o transporte e a disposição de sedimento do solo, subsolo e rocha em decomposição pelos agentes erosivos (BASTOS (1999), SOARES (2005), SANTOS (2006), BERTONI e LOMBARDI NETO (2014), MASCARENHA *et al.* (2015) e PASCOTO (2021)). Mascarenha *et al.* (2015) descrevem que o processo em si é uma forma natural de modelagem do relevo e atua de modo conjugado aos processos de formação dos solos, porém vem sofrendo interferência e aceleração atribuída aos agentes antrópicos.

O processo de formação de crosta, é um dos mecanismos mais importantes que antecede o escoamento superficial (também conhecido com *runoff*). Para Nacinovic (2013), o processo ocorre nos primeiros 5 a 10 minutos de chuva e dependem das características do solo e da intensidade da chuva. Inicialmente, ocorre a absorção da água pelo agregado, seguindo da expansão da argila, causando a dispersão e ruptura dos agregados, gerando a dispesibilidade no material, que então será erodido pelo salpicamento ou lixiviado para os espaços intergranulares, selando o solo (ilustrado na Figura 2), dessa forma os agregados logo abaixo da crosta ficam protegidos pelo impacto da gota de chuva, reduzindo a erosão. Porém, essa selagem do solo induz na diminuição da permeabilidade do solo, formando poças, que ao longo da chuva se interligam e começam o processo de escoamento.

Figura 2 - "Splashing" ou salpicamento e formação de poça.



Fonte: Nacinovic (2013).

Em regiões próximas aos trópicos (tropicais e subtropicais), que apresentam médias de precipitações anuais elevadas, os processos erosivos devido ao efeito da água são mais intensos e representam a maior parcela dos eventos. A associação dessa condicionante com o relevo, o uso de ocupação do solo, e a erodibilidade dos solos, são determinantes no entendimento da susceptibilidade dos terrenos à erosão hídrica. A incidência de solos não saturados nessas regiões é natural, apresentando um perfil de solo compreendido entre a superfície terrestre e a zona freática. A então denominada zona ativa (zona não saturada), sofre ao longo do tempo variação constante do grau de saturação e sucção, portanto grande parte dos processos erosivos iniciam-se em solos não saturados.

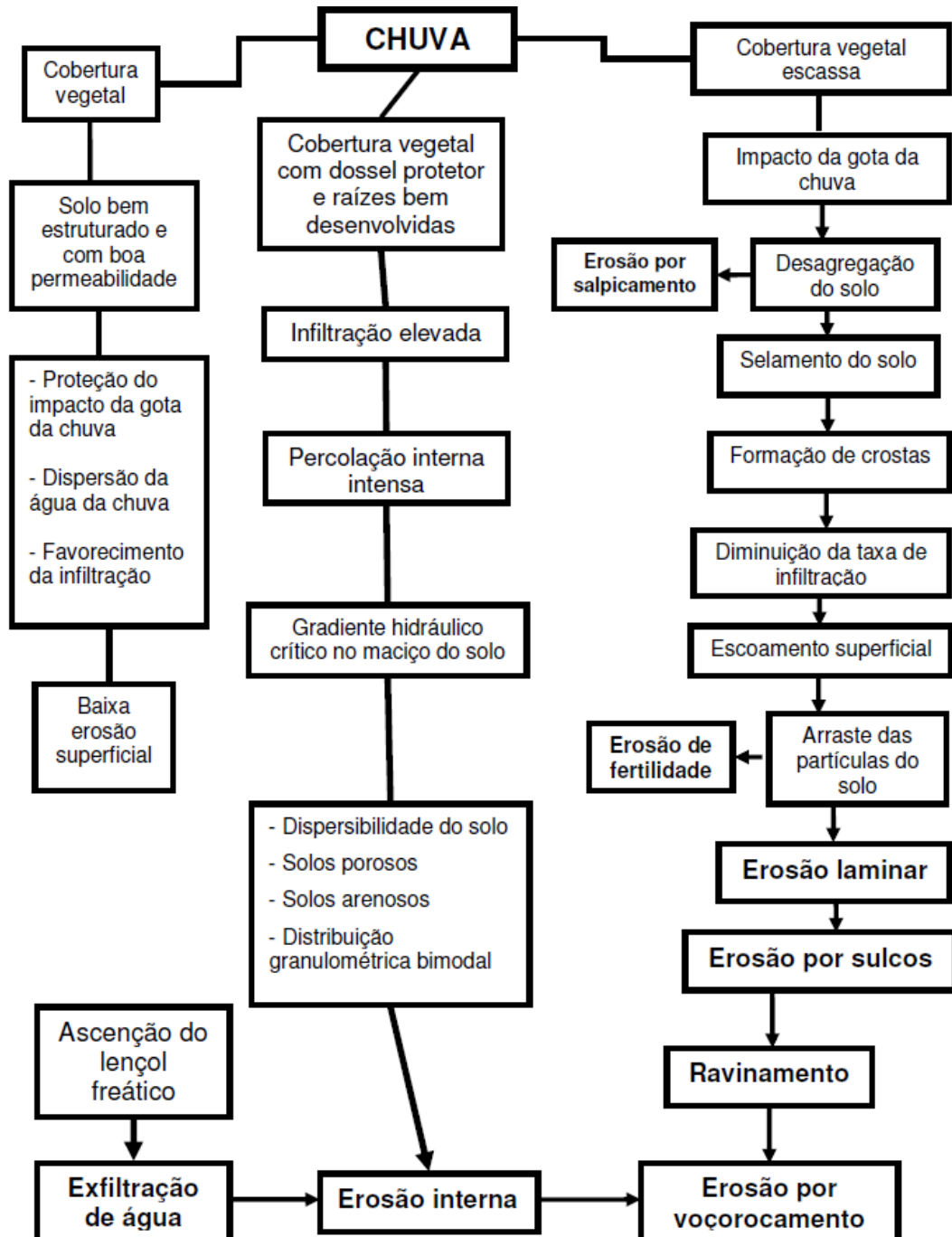
2.1.1 Erosão Hídrica

A erosão hídrica é categorizada como a interação do solo com a água e a cobertura vegetal, resultando no transporte do material degradado e na deposição desse material em partes mais baixas do relevo. É definida como um processo complexo extremamente e variável, cuja manifestação é advinda da somatória entre os componentes climáticos, do solo, da topografia, da vegetação e da erodibilidade com a precipitação pluvial.

Dessa forma, como as regiões tropicais e subtropicais são caracterizadas pela alta amplitude pluviométrica, são também as regiões mais afetadas pela erosão hídrica, podendo ser classificada em função da sua ocorrência entre Erosão Superficial e Erosão Interna.

Nacinovic (2013) resume os processos erosivos no solo, advindo da erosão hídrica, no fluxograma representado pela Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo erosivo.



Fonte: Nacinovic (2013).

• Erosão Superficial

Também conhecida como erosão por embate, a erosão superficial inicia-se pelo impacto das gotas de chuva ou pelo escoamento da água na sua superfície. A mesma é dividida em três subprocessos: destacamento de partículas pelo impacto das gotas de chuva; destacamento de

partículas dos solos por meio das tensões de atrito do deflúvio superficial; e o transporte das partículas.

As erosões superficiais são classificadas em duas: laminares e lineares, a sua definição é dada em função do desenvolvimento dos processos erosivos. Quando tem-se a ocorrência de escoamento superficial com grande potencial de arraste, dissolução e desagregação do solo, o escoamento superficial é classificado como resultado da erosão laminar. Quando se observa a incidência apenas de algumas faixas e sulcos de erosão, após chuvas ou carregamentos superficiais, o processo é classificado como erosão linear. A diferença dos dois cenários é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Erosão superficial (a) laminar, (b) linear.



Fonte: Mascarenha *et al.* (2015).

- **Erosão Interna**

Os processos de erosão interna em maciços de solos se originam pelo elevado gradiente hidráulico associado ao grau de dispersibilidade dos solos. Esse processo pode ser caracterizado como *piping*, quando a partir do arraste das partículas argilosas do solo ou esqueletização, a formação de túneis, que transportam difusamente as partículas. Esse processo apresenta grande ocorrência em terrenos estratificados ou em horizontes com permeabilidades distintas. Ocorrendo nesses casos a concentração de percolação em zonas de maior permeabilidade, acarretando o aumento do gradiente hidráulico no ponto, desencadeando o processo (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

2.1.2 Agentes Erosivos

Os agentes erosivos são denominados todos aqueles que causam, ou afetam, diretamente à erosão. Eles são classificados entre: agentes ativos e agentes passivos.

- **Agentes Ativos**

- Água: como agente ativo, a água atua no processo de erosão através dos efeitos de infiltração e de escoamento. Ela atua na movimentação de remoção de materiais, na dissolução de minerais, na diminuição da sucção mátrica do solo e na redução da resistência do solo (cisalhamento e tração).
- Temperatura: atua, influenciada pela insolação, provocando dilatações e contrações sucessivas que enfraquecem o solo, gerando ciclos de secagem e umedecimento no solo.
- Vento: considerado um agente secundário, ele é responsável pelo transporte de material que já foi desagregado, tendo maior impacto em terrenos planos, onde não se manifesta escoamento.
- Ação Antrópica: correspondem as ações mobilizadas pelo homem, sendo considerado como um agente acelerador dos processos. Dentre as atividades que contribuem para a aceleração do processo, destacam-se: desmatamento de áreas extensas, da mata ciliar e de terrenos de encostas; práticas agrícolas de culturas perenes, monoculturas e cultivos intensivos; queimadas; escavações e movimentações de terra; alterações do escoamento natural das águas; impermeabilização do solo, construções e compactação; atividades de mineração; dentre outras.

- **Agentes Passivos**

- Topografia: a topografia do terreno condicionada também com a rugosidade da superfície e o aumento da declividade, provoca o aumento de erosão. Dessa forma, terrenos com grandes declividades são mais sujeitos à erosão, associado com o comprimento de rampa (o quanto a água escorre superficialmente sem interferências), intensificando os processos erosivos pelo ganho de energia cinética.

- Tipo de Solo: o processo de formação dos solos, os minerais constituintes, a mineralogia, a textura e estrutura, o tamanho das partículas, a permeabilidade e demais propriedades são aspectos que diferem a intensidade do processo erosivo e da erodibilidade dos solos.
- Cobertura Vegetal: é capaz de proteger o solo quanto a erosão pluvial, aumentando a evapotranspiração e a infiltração. Além disso, a cobertura vegetal protege o solo, reduzindo o impacto das gotas de chuva, também sendo uma barreira física ao transporte de material, reduzindo a velocidade de escoamento da água.
- Formações Superficiais: são classificados como os materiais passíveis de erosão que afloram na superfície: rochas, rochas alteradas, depósitos aluviais, coluviais e glaciais. A erosão para essas formações superficiais dos materiais constituintes e do comportamento a infiltração, ao escoamento, da declividade e do grau de alteração.

2.2 ERODIBILIDADE DOS SOLOS

A erodibilidade pode ser classificada como a falta de resistência dos solos aos processos erosivos, ou como a propriedade do solo que figura a maior ou menor facilidade com que as partículas dele são destacadas e transportadas pela ação dos agentes erosivos (BASTOS, 1999 e MASCARENHA *et al.*, 2015). O estudo é compartilhado por outras áreas do conhecimento (Quadro 1), tal como a engenharia geotécnica, a geologia de engenharia e a engenharia ambiental, contudo cada área especifica um enfoque diferente para análise do tema.

Quadro 1– Enfoque do estudo da erodibilidade por diferentes áreas do conhecimento.

Área do Conhecimento	Enfoque – Linhas de Pesquisa
Engenharia Ambiental	Estudo das características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam a erodibilidade dos solos e dos horizontes superficiais, estudo de modelos de previsão de perda de solos e dos impactos do manejo no processo erosivo.
Hidráulica	Estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo d'água em estruturas hidráulicas (e.g. canais em terra).
Geologia de Engenharia	Estudos concentrados no diagnóstico ambiental da erosão, nas condicionantes geológicas e geomorfológicas da erosão regional e no relato de obras para controle de erosão.
Engenharia Geotécnica	Modelagem dos mecanismos de erosão, obras de estabilização e redução dos processos erosivos, avaliação dos comportamentos erosivos e determinação das relações físicas e químicas dos solos com a susceptibilidade à erosão.

Fonte: Adaptado de Ahmed (2009) e Oliveira e Araujo (2018).

Particularizada, portanto, como a susceptibilidade a erosão hídrica, a erodibilidade é uma das propriedades de comportamento do solo de maior complexidade. Pascoto (2020) apresenta a necessidade da determinação das propriedades físicas e químicas do solo em laboratório, através das amostras de campo para entendimento dos solos frente à erodibilidade.

O mecanismo associado à erodibilidade é função das características intrínsecas de cada solo, dessa forma, como a erosão hídrica é caracterizada pelo destacamento das partículas pelas forças hidráulicas, o estudo e ela propriamente dita, estão diretamente relacionados com os parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento e à tração. De forma clara, em um escoamento superficial, em que apenas a camada superficial é atingida pelo evento, a resistência mobilizada é dada integralmente em função da coesão do solo, por isso que os solos com altas frações de areia apresentam maior susceptibilidade à erosão do que os solos argilosos (MASCARENHA *et al.* 2015).

Dentre as características do solo que influenciam na contextualização da erodibilidade, diversos autores destacam a textura, a estruturação do solo, a estabilidade dos agregados, o teor de matéria orgânica, a mineralogia, a constituição química, a permeabilidade, o grau de compactação, a pedologia e a sucção. (BASTOS (1999), AHMED (2009), ARAUJO e DE CAMPO (2013), MASCARENHA *et al.* (2015), SOUZA *et al.* (2018) e PASCOTO (2021)).

Guerra (1999 *apud* Camapum de Carvalho *et al.*, 2015, p. 586)¹ aponta o papel da estabilidade do agregado² do solo na avaliação de erodibilidade, destacando o aumento da resistência ao impacto da chuva e a redução da crosta do topo do solo. A estruturação³ do solo também tem uma participação significativa no estudo, já que solo com agregados maiores e mais estáveis apresentam maior porosidade, o que consequentemente aumenta a infiltração no solo, reduzindo o escoamento superficial.

A condutibilidade hidráulica do solo (permeabilidade) rege a capacidade de infiltração do solo, que tem relação inversamente proporcional à susceptibilidade do solo a erosão, ou seja, quanto mais permeável o solo menor é o escoamento superficial, e consequentemente sua erodibilidade será menor. Dessa forma, solos arenosos apresentariam menos susceptibilidade à erosão, a afirmação é válida apenas quando comparados solos arenosos que apresentam boa estruturação e estabilidade dos agregados com solos arenosos mal estruturados.

Outro fator determinante nos processos erosivos é a constituição química do solo, que tem influência direta com a erodibilidade interna quanto à dissolução em água ou qualquer outro líquido. A dispersibilidade dos solos é regida pela reação dos cátions de sódio presentes no solo com o líquido que percola. O sódio age aumentando a espessura da camada de água difusa, reduzindo, portanto, as forças de atração entre as partículas, consequentemente diminuindo a resistência ao destacamento das partículas (MASCARENHA *et al.*, 2015).

2.2.1 Modelos de Avaliação de Erodibilidade pela Caracterização Geotécnica

Os modelos de avaliação de susceptibilidade à erosão de solos se desenvolveram ao longo dos anos e, de modo geral, os primeiros modelos que foram apresentados à academia não tinham metodologias próprias. Em grande parte, estes eram baseados em fatores empíricos, observados

¹ GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: ABMS, p.17-55, 1999. *apud* CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. Solos não saturados no contexto geotécnico. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. 763 p.

² União das partículas sólidas do solo.

³ A estruturação do solo é a forma a qual as partículas do solo se arranjam. Descrevendo a maneira como as partículas são agregadas. Designa a maneira que as partículas são dispostas para formar o esqueleto do solo.

pelo comportamento dos solos frente as condições hídricas, e ou, correlacionado com os índices físicos dos solos (e.g. distribuição granulométrica, limites de consistência e teor de matéria orgânica). Ao passar do tempo tais proposta de avaliação indireta da erodibilidade foram refinadas, acrescentando correlações quanto a sucção do solo, a gênese, a condutibilidade hídrica e a capacidade de sorção.

Meira (2008 *apud* Oliveira e Araujo, 2018, p.64)⁴ aborda que os modelos de avaliação da erodibilidade dos solos através dos ensaios de caracterização geotécnica devem ser usados de forma cautelosa. Tais correlações devem apenas ser usada em abordagens preliminares do problema, sendo essa uma forma de caracterizar a facilidade ou não dos solos a erosão de modo indireto. Pinheiro *et al.* (2022) acrescenta que tais correlações apresentam grande dispersão de dados, com uma validade, em muita parte das vezes, restrita ao universo de solos as quais foram desenvolvidas, corroborando com a afirmação anterior.

Ademais, tais modelos são representados muitas vezes, por serem estudos experimentais, na forma de faixas de valores máximos e mínimos admissíveis, como ábacos, ou até mesmo índices. A seguir é apresentado uma breve introdução de alguns desses modelos:

- Bouyoucos (1935) e Maningel *et al.* (2002): os dois autores propõem a classificação a partir da distribuição granulométrica dos solos, podendo ser calculado de maneira indireta pela equação (1). Os valores obtidos pela expressão são enquadrados nas classes apresentadas na Tabela 1.

$$K = \frac{\%Areia + \%Silte}{\%Argila} / 100 \quad (1)$$

Onde:

K : Fator de Erodibilidade;

%Areia: Porcentagem de Areia no solo;

%Silte: Porcentagem de Silte no solo;

%Argila: Porcentagem de Argila no solo.

⁴ MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2008. *apud* OLIVEIRA, F. F.; ARAUJO, R. C. Uso de parâmetros geotécnicos como indicadores da erodibilidade de solos. **Geotecnia**, Lisboa, v. 142, p. 63-75, 2018.

Tabela 1– Faixa do modelo de Bouyoucos (1935) e Maningel *et al.* (2002), do Fator de Erodibilidade.

Fator de Erodibilidade	Classe de Erodibilidade
$0,01 < K < 0,03$	Baixo
$0,03 < K < 0,06$	Médio
$K > 0,06$	Alto

Fonte: Modificado de Oliveira e Araujo (2018).

Os autores pressupõem, portanto, a partir da sua formulação que a fração argilosa no solo é um agente ligante, dificultando o destacamento das partículas, consequentemente melhorando sua característica erosiva, e que as partículas mais grossas do que a areia não seriam destacáveis.

- Santos (1953): a proposta também é baseada na distribuição granulométrica do solo, estabelecida de forma simplificada. A avaliação é feita da seguinte forma:

Solos de Comportamento Regular ou Bom:

$49\% \leq \% \text{ que passa pela peneira \#40} < 96\%$.

- Gray e Leiser (1989): os autores correlacionam, a partir do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS/ASTM) ⁵ um modelo comparativo e qualitativo da susceptibilidade à erosão dos solos, apresentando em ordem de grau de erodibilidade os solos a partir da determinação do solo pela carta de plasticidade de Casagrande, considerando os limites de Atteberg como critério de avaliação. A ordem de susceptibilidade é apresentada no Quadro 2.

Gray e Leiser (1989) corroboram com os estudos de Bouyoucos (1935) e Maningel *et al.* (2002), declarando que os solos com maior fração argilosa na sua curva granulométrica apresentam menor tendência à erosão e que as frações maiores do que areia tem maior dificuldade ao destacamento, por isso são menos erosivos.

⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-2487-17**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). Pennsylvania, ASTM, 2016.

Quadro 2– Ordem de susceptibilidade a erosão, modelo de Gray e Leiser (1989).

Classificação do Solo (SUCS)	Grau de Susceptibilidade à Erosão
ML	Mais Erosivo  Menos Erosivo
SM	
SC	
MH	
OL	
CL	
CH	
GM	
SW	
GP	
GW	

Fonte: Modificado de Oliveira e Araujo (2018).

Onde: ML – silte baixa plasticidade; SM – areia siltosa; SC – areia argilosa; MH – silte alta plasticidade; OL – argila orgânica; silte orgânico; CL – argila pouco plástica; CH – argila muito plástica; GM – pedregulho siltoso; GP – pedregulho mal graduado e GW – pedregulho bem graduado.

- Santos e Castro (1967): o modelo apresenta faixa de valores para correlação entre a erodibilidade do solo e os limites de consistência, onde os limites de consistência tem forte ligação com a resistência ao cisalhamento e o desprendimento das partículas do solo. Os critérios e os intervalos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Faixa do modelo de Santos e Castro (1967).

Índices para o Modelo	Classe de Erodibilidade
$LP \leq 32\%$ $IP \leq 17\%$	Comportamento Bom ou Regular
$LL < 50\%$ $IP \text{ próximo de } 20\%$	Solos Altamente Erodíveis

Fonte: Modificado de Oliveira e Araujo (2018).

- Santos (2001): a proposta do modelo de avaliação à erodibilidade dos solos apresentada pelo autor é baseado nos limites de consistência do solo, relacionando o índice de plasticidade (IP), com a distribuição granulométrica do solo, associado pelo coeficiente de uniformidade (Cu). Os critérios adotados são apresentados nos quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Critério adotado por Santos (2001) de avaliação da erodibilidade pelos limites de consistência.

Índice de Plasticidade	Classe de Erodibilidade
$IP > 15$	Boa resistência à erosão
$15 > IP > 6$	Média resistência à erosão
$IP < 6$	Baixa resistência à erosão

Fonte: Oliveira e Araujo (2018).

Quadro 5 – Critério adotado por Santos (2001) de avaliação da erodibilidade pelo coeficiente de uniformidade.

Coeficiente de Uniformidade	Classe de Erodibilidade
$Cu < 5$	Solos Erodíveis
$5 < Cu < 15$	Solos de média erodibilidade
$Cu > 15$	Solos de baixa erodibilidade

Fonte: Oliveira e Araujo (2018).

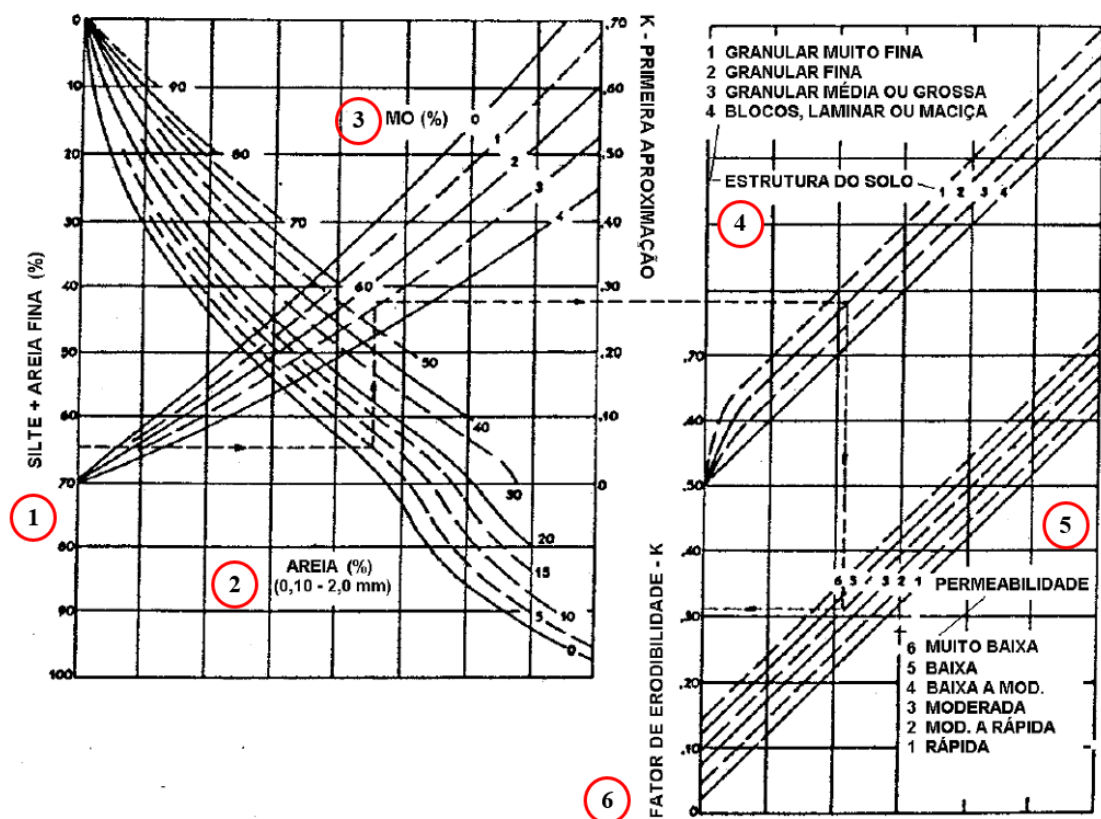
De modo geral, a proposta do autor indica que, quanto maior a plasticidade do solo, que é função da fração argilosa no solo, menor a susceptibilidade dele à erosão, e quanto mais fechada a granulometria, ou seja, tão quanto melhor for a distribuição granulométrica, menor vai ser a erodibilidade do solo.

- Wischmeier e Mannering (1969): o modelo determina a partir das propriedades dos solos, a influência combinada da velocidade de escoamento superficial e a quantidade de

partículas envolvidas, por meio dos dados de entrada: frações granulométricas, tipo de estrutura, classe de permeabilidade e teor de matéria orgânica (na qual se correlacionam diretamente com a capacidade do solo a resistir ao destacamento e ao transporte). O nomograma para determinação do fator de erodibilidade é representado pela Figura 5.

Bastos (1999) destaca a contribuição do percentual de matéria orgânica na tendência de retardar o início do escoamento superficial, a agregação do material aumenta a capacidade de infiltração do solo, diminuindo o escoamento superficial, reduzindo as perdas de solo, de modo especial em solos arenosos e siltosos.

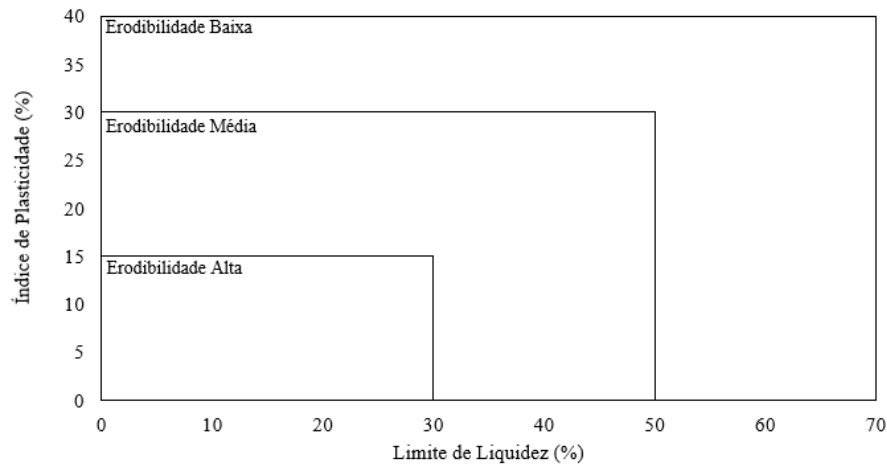
Figura 5 – Nomograma de Wishmeier e Mannering (1969).



Fonte: Modificado de Wishmeier e Mannering (1969)

- Molinero Junior *et al.* (2011): o modelo avalia a partir dos índices de consistência a susceptibilidade a erosão, desenvolvendo um ábaco de classificação separado por zonas, apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Ábaco de classificação dos solos à erodibilidade de Molinero Junior *et al.* (2011).



Fonte: Molinero Junior *et al.* (2011).

2.2.2 Dispersibilidade em solos Argilosos

O estudo e avaliação da dispersibilidade dos solos, no contexto de determinação da susceptibilidade a erosão é de grande importância. (BASTOS (1999), CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* (2015) e SOUZA *et al.* 2018). Também conhecida como dispersão coloidal, o efeito de dispersão em solos argilosos ocorre quando as forças de repulsão entre as partículas de argila são superiores às forças de atração, formando uma suspensão quando entra em contato com a água durante a percolação (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

As argilas dispersivas não apresentam parâmetros críticos de fluxo bem definidos, já que elas podem entrar em suspensão até mesmo em situações hidrostática. Portanto, verifica-se que a dependência da dispersibilidade é regida pelas condições de contorno em que ela se encontra, sendo o ambiente, a química do fluido, a umidade natural e sucção os fatores determinantes, o que a faz ser considerada uma propriedade variável a partir do seu estado.

Torna-se relevante o estudo de dispersibilidade a partir das condições não saturadas dos solos, com base na mecânica dos solos não saturadas. A diferenciação do comportamento de desagregação dos agregados em estruturas não saturadas foi observada por Bastos (1999). A presença de ar ocluso quanto à saturação do solo faz com que a água seja absorvida por capilaridade, comprimindo o ar ocluso, gerando pressões essas que podem romper as ligações entre as partículas argilosas. As tensões combinadas entre a expansão da argila e as pressões pela compressão do ar ocluso são determinantes na desagregação dos agregados do solo, tão maior quanto a sucção do solo.

A determinação da dispersibilidade não pode ser correlacionada com os parâmetros geotécnicos da mecânica dos solos clássica. De modo geral, existem métodos qualitativos que avaliam o comportamento do solo frente a imersão, representados pelo ensaio de dispersão rápida (*crumb test*) e ensaios de desagregação (com imersão parcial e total), e ensaios que determinam quantitativamente a dispersão, como o ensaio de sedimentometria comparativa (também conhecido como ensaio de dispersão SCS).

- *Crumb Test*: ou ensaio de dispersão rápida, foi originalmente proposto na década de 60, por engenheiros australianos, com metodologia descrita por Rallings (1966), com as modificações propostas por Sherard *et al.* (1976), aplicando materiais e métodos simplificados para a classificação qualitativa da dispersão em solos argilosos. Para Mascarenha *et al.* (2015), pelas características simplificada dos materiais usados e da metodologia empregada no ensaio, assim como a indefinição das avaliações qualitativos, os resultados são recomendados apenas em fases iniciais de estudos.

Holmgren e Flanagan (1977 *apud* Bastos, 1999, p. 35)⁶ elenca mecanismos e fatores que influenciam nos resultados dos ensaios, citando a relação do agregado que envolve os fenômenos de hidratação, desaeração, fraturamento, expansão osmótica e finalmente a dispersão. De acordo com Head (2011), para muitos solos o uso de água desaerada é um bom indicador de dispersão, porém em muitas argilas dispersivas a reação em água destilada não apresenta nenhuma reação. Dessa forma, é proposto a realização do ensaio com duas soluções, a com água destilada e uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), na concentração 0,001 mol/l. A avaliação observacional, inerente ao ensaio, é ilustrada com a classificação do Quadro 6 associado com resultados apresentados por Davies *et al.* (2009), indicados na Figura 7.

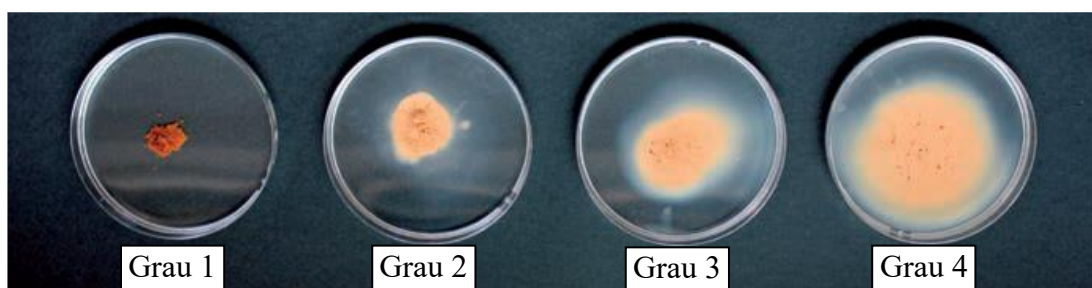
Camapum de Carvalho *et al.* (2015) destaca que quando o ensaio indica a ocorrência de dispersão, há alta possibilidade de se tratar de um solo de fácil erosão, porém, o inverso não é necessariamente verdade.

⁶ HOLMGREN, G. G. S.; FLANAGAN, C. P. Factor affecting spontaneous dispersion of soil material as evidenced by the crumb test. **ASTM - Special technical publication**, Philadelphia, n. 623, p.218-239, 1977 *apud* BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1999.

Quadro 6 – Classificação para o Ensaio de Dispersão Rápida (*crumb test*).

Grau de susceptibilidade a dispersão	Descrição da Classificação Qualitativa
Grau 1 – Não dispersivo	Sem reação: o torrão pode espalhar-se no fundo do recipiente, contudo não se observa sinais de turvação, seja na água ou na solução de NaOH.
Grau 2 – Levemente dispersivo	Reação leve: aparecimento de turbidez na água, na região de superfície do torrão, na água ou na solução de NaOH.
Grau 3 – Moderadamente dispersivo	Reação moderada: aparecimento de nuvens de colóide em suspensão, de fácil detecção, frequentemente espalhando-se em finas estrias na base do recipiente, porém não chega a cobrir toda a área do mesmo.
Grau 4 – Altamente dispersivo	Reação forte: nuvem coloidal cobrindo toda a base do recipiente, frequentemente numa camada muito fina. Em casos extremos a água toda do recipiente fica turva.

Fonte: Adaptado de Silveira *et al.* (1974), Sherard *et al.* (1976) e Head (2011).

Figura 7 - Grau de dispersão em solos pelo ensaio *crumb test*, avaliação qualitativa.

Fonte: Adaptado de Davies *et al.* (2009).

- **Sedimentometria Comparativa (Ensaio de dispersão SCS):** O ensaio sedimentométrico comparativo é uma das metodologias para a avaliação da dispersibilidade em solos argiloso, cuja fração argilosa deve ser maior do que 12% (partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm). Segundo Ramidan (2003), a metodologia correlaciona o grau de dispersão dos solos medido em valores percentuais, pela formulação de Volk (1938), obtido pela relação da porcentagem de partículas com diâmetro menor de 0,005mm, das curvas granulométricas realizadas sem e com defloculante

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) descreve a utilização desse ensaio também para a classificação quanto a análise do estado de agregação dos solos, onde a presença marcante de agregados nos solos é apresentada pelas menores porcentagens de fração argilosa nas curvas granulométricas executadas sem o defloculante. A partir da utilização do defloculante, há um

aumento significativo da porcentagem das partículas finas retidas, das frações silte e argila, o que correlaciona o potencial significativo de agregação das partículas do solo.

- Ensaio de desagregação por imersão (total e parcial): também conhecido como “*slakin test*”, o ensaio é bastante utilizado para a avaliação qualitativa do efeito dispersivo e de desagregação do solo. O ensaio apresenta metodologia capaz de prever a influência da água no solo quando submerso, verificando a estabilidade do corpo de prova.

A amostra imersa totalmente simula o cenário de inundação abrupta (e.g. grande volume de chuva em um espaço de tempo curto ou rompimento de tubulações), enquanto a amostra imersa em etapas representa o cenário mais favorável, em que ocorre a ascensão lenta do lençol freático, e a água ascende por capilaridade.

2.2.3 Metodologia MCT (Mini, Compactado, Tropical) - Adaptado

Para Bastos (1999), a metodologia MCT – Mini, compactado e tropical cobre as lacunas deixadas pelas classificações geotécnicas da mecânica dos solos clássica, associando esses estudos aos critérios de erodibilidade nos solos.

A classificação dos solos tropicais proposta pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) teve seu desenvolvimento apresentado por Nogami e Villibor (1981) e Cozzolino e Nogami (1993). Para a classificação geotécnica utilizando a metodologia, são preconizados a realização de ensaios e metodologias específicas, seguido pela classificação em ábacos. De modo geral, para a determinação com o emprego da metodologia, Bastos (1999) apresenta a necessidade de três ensaios: ensaio de compactação mini-MCV, o ensaio de perda de massa por imersão e o ensaio de infiltrabilidade.

Nesse estudo têm a utilização das Metodologia MCT – Adaptado, o termo “adaptado” é amplamente utilizado na literatura (e.g. Bastos (1999), Camapum de Carvalho *et al.* (2015), Mascarenha *et al.* (2015), Souza *et al.* (2018), etc.), essa variação é dada essencialmente pelo fato da análise da erodibilidade nos solos nas condições *in situ*, ou seja, em que é preservada as condições estruturas do solo sem o emprego da compactação, retirando o “C” da Metodologia MCT.

Segundo Nogami e Villibor (1979) o critério de erodibilidade é essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão, atribuindo duas propriedades para previsão do comportamento dos solos tropicais frente à erosão: a erodibilidade específica e a infiltrabilidade.

Portanto os critérios para avaliação do potencial de erosão em solos baseados na metodologia fundamentada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção (obtido pelo ensaio de infiltrabilidade), e a perda de massa por imersão (esse obtido pelo ensaio de erodibilidade específica).

A infiltrabilidade é uma propriedade hidráulica, intrínseca dos solos não saturados, cujo conceito é baseado na facilidade ou não com que a água tem em infiltrar no solo através da sua superfície, controlado sobretudo pelos efeitos da sucção. Dessa forma, o ensaio de infiltrabilidade consiste na determinação dessa propriedade, cuja quantificação é dada pelo parâmetro de sorção, submetendo o solo a um fluxo ascendente por ascensão capilar.

O ensaio de erodibilidade específica avalia a perda de massa do solo frente a imersão completa, ou seja, avalia de modo quantitativo a erodibilidade específica hídrica do solo. A metodologia leva em considerações os conceitos de sucção dos solos, na prática caracterizando um cenário de saturação rápida no solo. A massa erodida após o período de 24 horas de imersão é quantificada em porcentagem.

Portanto, a partir do coeficiente de sorção do solo, e da porcentagem de perda de massa específica, Nogami e Villibor (1979) propõem a relação $Pi/s = 52$ como limite ao critério de erodibilidade.

2.2.4 Relação da Erodibilidade e a Sucção

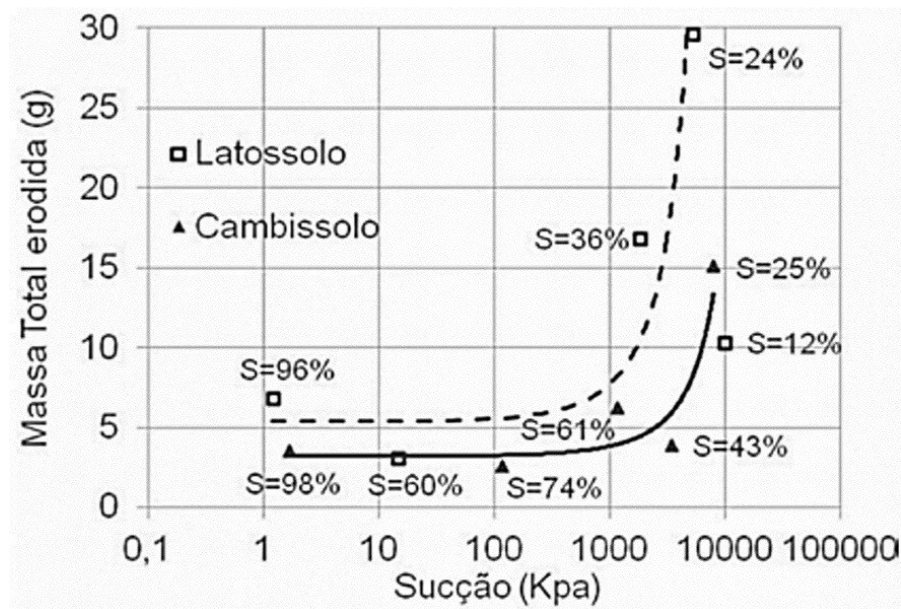
Como apresentado anteriormente, nas regiões tropicais a maioria dos solos estão na fase não saturada. Portanto, grande parte dos processos erosivos iniciam-se em solos não saturados, passando à condição saturada apenas com a evolução do processo.

Segundo Bastos (1999) a sucção exerce papel fundamental na avaliação mecânica dos solos não saturados e na resistência frente ao avanço dos processos erosivos. Dessa forma, a erodibilidade é caracterizada por uma variável temporal, que tem seu comportamento intimamente relacionado pelo estado de tensões efetivas dos solos, onde as tensões induzidas pela sucção matricial são responsáveis pelo ganho de resistência. Mascarenha *et al.* (2015) propõe a observação de que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e a inundação, parcela essa que é diminuída pela redução da sucção (conforme será apresentado no item 2.3).

Almeida (2014) avaliou a influência da sucção na perda de massa de solos a partir do ensaio Inderbitzen. Para entender o comportamento dos solos com diferentes níveis de sucção, foram moldados corpos de provas com diferentes teores de umidade (grau de saturação) em

amostras de latossolos e cambissolos. Os resultados dos ensaios são plotados no gráfico apresentado na Figura 8. O comportamento descrito por Bastos (1999) e Mascarenha *et al.* (2015) é também observado para essas amostras, onde em geral, quanto maior é a sucção inicial do solo, maior é a perda de massa total erodida.

Figura 8 - Sucção *versus* Massa Total Erodida.



Fonte: Adaptado de Almeida (2014).

2.3 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS

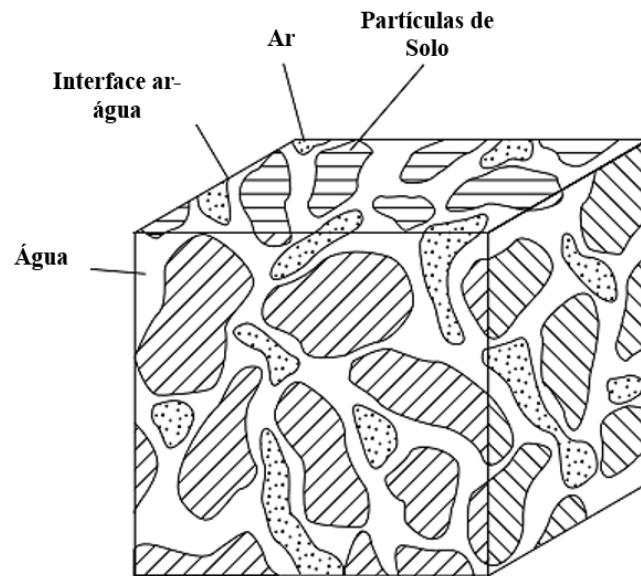
Na natureza, os solos são encontrados como uma mistura de fases. O conjunto de partículas sólidas e ar constituem um solo seco, enquanto uma mistura de partículas sólidas e água constituem um solo saturado. Porém, entre esses dois extremos temos os solos não saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Um solo não saturado é considerado um sistema trifásico (Figura 9), constituindo-se pelas fases: líquida (composta geralmente por água), gasosa (formado pelo ar livre – mistura de gases), e sólida (constituída pelos grãos do solo).

Fredlund e Morgenstern (1977) sugerem, a partir da definição de fase, a introdução de uma quarta fase independente, referente a interface ar-água, denominada membrana contrátil. A característica dessa película dar-se pela possibilidade de exercer tensão de tração nos materiais contíguos, influenciando diretamente o comportamento mecânico do solo como um

todo, denominada tensão superficial. Para que ocorra o equilíbrio entre as solicitações, a superfície do líquido se contrai, ficando tracionada (MOTTA, 2016).

Figura 9 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.

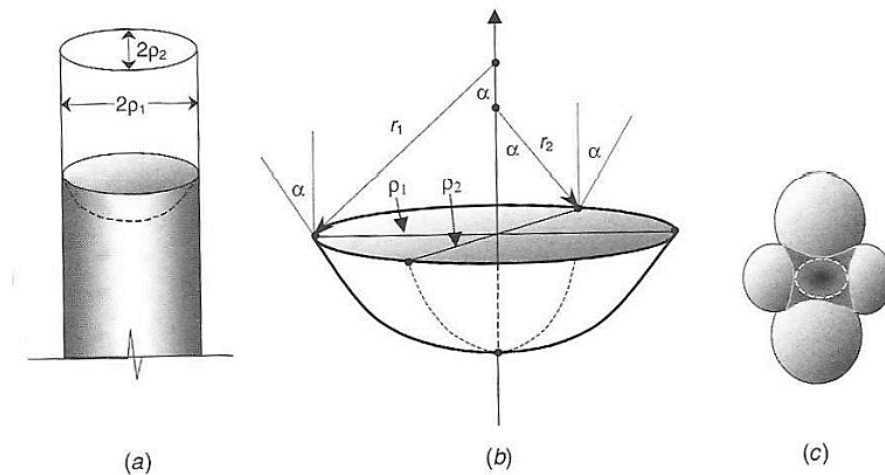


Fonte: Modificado de Charles e Menzies (2007).

Motta (2016) explica que essa capacidade dos solos de exercerem a tensão de tração é o resultado da propriedade chamada tensão superficial, atribuído pelo fenômeno de capilaridade nos solos. O princípio é manifestado pelos vazios interconectados nos solos não saturados, que quando colocados em contato com uma superfície livre de água, esta sobe dentro dos vazios interconectados até atingir a posição de equilíbrio (altura de ascensão capilar - h_c). Dessa forma, a partir dos princípios da capilaridade, quanto menor é o diâmetro do tubo (nesse caso os vazios do solo), maior é a altura (Figura 10).

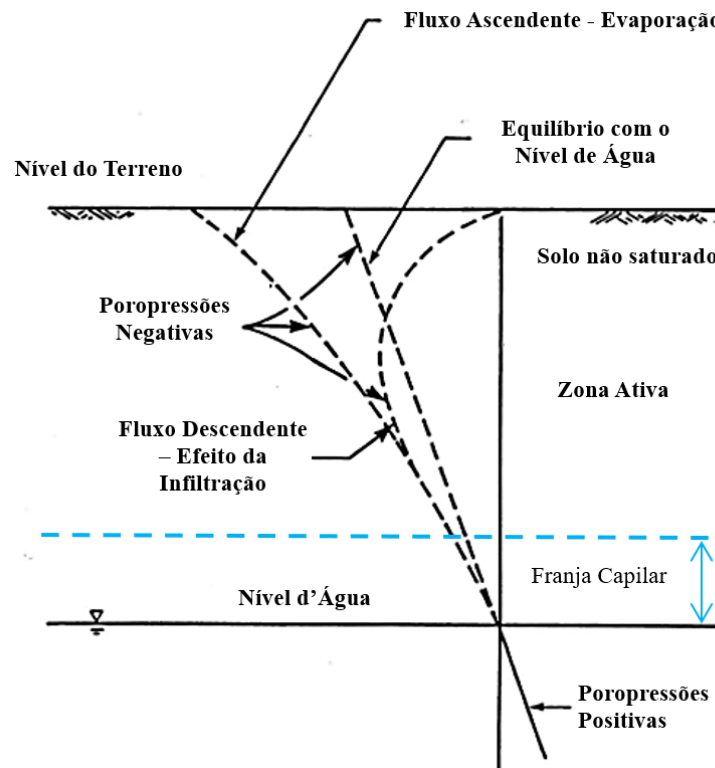
O desenvolvimento desse conceito resulta na compreensão de que nas camadas não saturadas dos solos as pressões na água intersticial são negativas e sua magnitude é mensurada pelo tipo de fluxo, infiltração ou evaporação, conforme representado na Figura 11. Já na região entre a camada não saturada e o nível freático, encontramos uma região saturada, denominada franja capilar, que tem sua saturação promovida pela capilaridade dos poros do solo. O entendimento desse conceito, portanto, explica a perda de resistência dos solos quando umedecidos, que a medida com que a infiltração avança no solo, as poropressões que antes que eram negativas passam a se anulam ou torna-se positivas, alterando o estado de tensões efetivas.

Figura 10 – Representação da interface solo-ar-água, através de uma geometria elipsóide: a) em um tubo cilíndrico, b) interface elipsóide finita, c) um exemplo nos poros do solo.



Fonte: Lu e Likos (2004 *apud* Motta, 2016, p.29)⁷

Figura 11 - Variação das distribuições de poropressão com o tempo.



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2007)⁸.

⁷ LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 584p. *apud* MOTTA, M. F. B. **Caracterização físico-hídrico-estrutural e efeito do aumento da pressão do ar na resistência de solos tropicais não saturados**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Centro Técnico Científico – Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), Rio de Janeiro. 2016.

⁸ GERSCOVICH, D. M. S. **Resistência ao Cisalhamento – Solos Não Saturados**, Anotações de aula – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. UERJ, 2007, p.80.

2.3.1 Sucção no solo

A sucção nos solos, ou poropressões negativas, podem ocorrer tanto em solo saturados quanto em solos não saturados (VETTORELLO e MARINHO, 2021). O entendimento da sucção total nos solos é dado pela grandeza de tensões que indica a característica que um solo não saturado tem de incorporar e reter água nos seus vazios (MARINHO, 2005).

Em solos não saturados, a sucção total é composta pela soma da sucção matricial, decorrentes dos efeitos combinados da capilaridade (principalmente em solos arenosos), de adsorção (mais representativa em solos argilosos) e da sucção osmótica, proveniente das características químicas, e da presença de solutos na água intersticial. (MARINHO (2005), MOTTA (2016) e SAAB (2016)).

Dessa forma, a sucção total dos solos é representada pelo conjunto das forças (matricial e osmótica), representada pela equação (2).

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_{osm} \quad (2)$$

Onde:

Ψ_t : Sucção total;

Ψ_m : Sucção matricial; e

Ψ_{osm} : Sucção osmótica.

De modo geral, frequentemente a sucção osmótica é considerada constante quando envolto em problemas com pequena amplitude de variação de teor de umidade, sendo tratada com pequena relevância em problemas práticos. Porém, em problemas que envolvam contaminação dos solos ou que envolvam grandes variações de teor de umidade, a parcela deve ser estudada com mais atenção, pois pode-se haver variação da sucção osmótica. (GITIRANA JUNIOR *et al.*, 2015).

2.3.2 Medida de Sucção no solo

As medidas das propriedades de solos não saturados exigem o emprego de técnicas para medição e controle da sucção dos solos, objetivando a determinação dos parâmetros não saturados do solo, assim como a previsão do seu comportamento. Dentre as técnicas existentes, a metodologia para a medição pode ser classificada entre direta e indireta.

A determinação direta é baseada na calibração de um parâmetro de fácil obtenção com a sucção (e.g. papel filtro e placa de pressão). Já a determinação indireta se baseia na quantidade de energia da água nos poros, essas práticas muitas vezes são usadas em campo (e.g. psicrômetros e tensiômetros) (MOTTA, 2016).

As técnicas mais utilizadas no meio geotécnico são apresentadas na Tabela 2, associada ao intervalo de aferição dos valores e o tempo necessário para o equilíbrio das sucções. Para o seguinte trabalho, pela sua versatilidade, economia e precisão, a obtenção da curva característica do solo-água é desenvolvida a partir da técnica do Papel Filtro – com contato. As demais técnicas são descritas por diversos autores (e.g. Fredlund e Rahardjo (1993), Marinho (1997), Marinho *et al.* (2015), Motta (2016), Saab (2016) e Vettorello e Marinho (2021)).

Tabela 2 - Técnicas para a medição da sucção em solos.

Técnica	Medida de Sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de Equilíbrio
Psicrômetro	Total	100 a 71000	minutos
Papel Filtro (com contato)	Mátrica	30 a 30000	7 dias
Papel Filtro (sem contato)	Total	400 a 30000	7 – 14 dias
Bloco poroso	Mátrica	30 a 30000	semanas
Sensor de Condutividade térmica	Mátrica	0 a 300	semanas
Placa de Sucção	Mátrica	0 a -90	horas
Placa de Pressão	Mátrica	0 a 1500	horas
Tensiômetro Padrão	Mátrica	0 a -100	minutos
Tensiômetro Osmótico	Mátrica	0 a 1500	horas
Tensiômetro tipo Imperial College	Mátrica	0 a -1800	minutos

Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993), Marinho (1997).

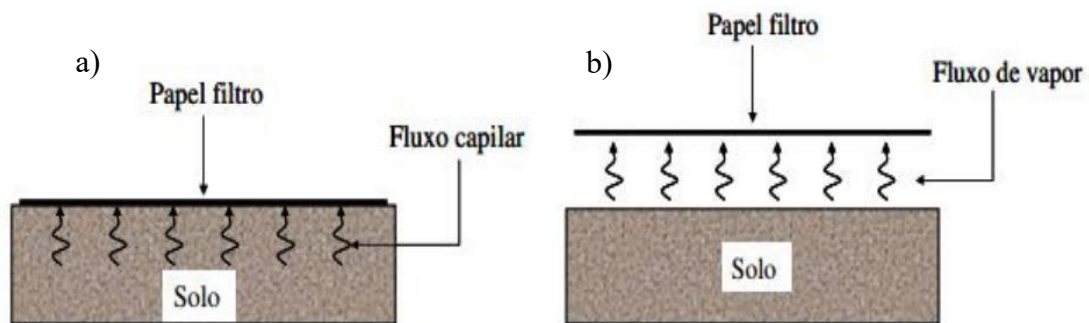
• Método do Papel Filtro

A técnica do papel filtro é, de fato, a mais simples e econômica para determinação de valores de sucção entre 30 kPa a 30 MPa. O modelo consiste na utilização do papel filtro do

tipo quantitativo como instrumento para a aferição dos valores de sucção matricial e/ou total pelo teor de umidade.

Para Marinho *et al.* (2015), quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorção, este passará do solo para o papel até que o equilíbrio seja alcançado. A medição da sucção matricial do solo é dada quando o fluxo ocorre por capilaridade pelo contato direto entre o papel filtro e o solo, pois apenas as tensões capilares são vencidas nesse processo, conforme apresentado na Figura 12a). Quando o fluxo é dado pelo vapor (ou seja, quando há espaço entre o solo e o papel), o espaço deixado fornece uma barreira para os sais, vencendo as forças osmóticas e capilares, medindo, portanto, a sucção total da amostra (Figura 12b)).

Figura 12 – Tipos de fluxo da técnica do papel filtro (a) com contato, (b) sem contato.



Fonte: Marinho *et al.* (2015).

Obtendo a relação entre a sucção e a umidade do material poroso (calibração), a sucção pode ser obtida pela curva de calibração. O princípio adotado prevê um estado de equilíbrio entre a sucção da amostra e a do material poroso, porém, com umidades diferentes (MARINHO *et al.* (2015) e MOTTA (2016)).

Os papéis filtro mais utilizados para a determinação da sucção nos solos são: o Whatman nº 42 e o Schleicher & Schuell nº 589, ambos do tipo quantitativo do Tipo II. Contudo, o papel filtro Whatman nº 42 é o mais recomendado por ser mais espesso e possuir poros menores.

Segundo Marinho (1994) o tempo de equilíbrio em que se deve manter o contato do solo com o papel filtro, para equilíbrio das sucções é definida em função do nível de sucção total da amostra. Os tempos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tempo de equilíbrio para medição da sucção total.

Nível de Sucção Total (kPa)	Tempo de Equilíbrio sugerido
0 – 100	> 30 dias
100 – 250	30 dias
250 – 1000	15 dias
1000 – 30000	7 dias

Fonte: Marinho (1994).

2.3.3 Curva de Retenção de Água no Solo – SWCC

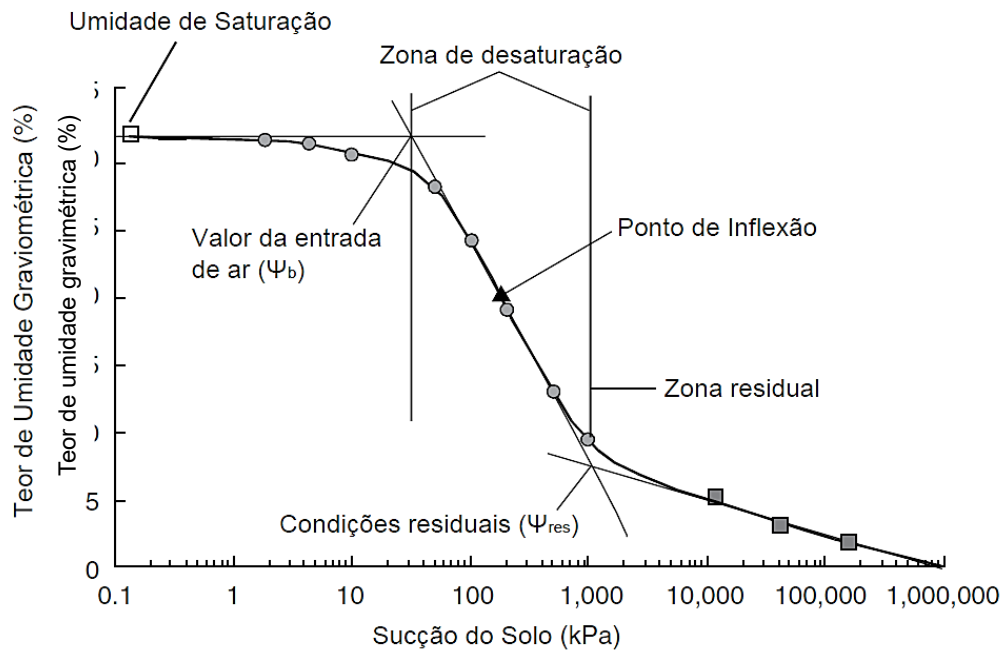
O principal meio de relacionar a sucção com a quantidade de água nos solos não saturados é obtido por meio da curva característica de retenção de água (também conhecida como curva característica). Gitirana Junior *et al.* (2015) demonstra que a curva característica do solo apresenta a forma a qual o solo administra a presença de água em seus poros, relacionando-a com a energia necessária para remover essa água.

A representação entre a quantidade de água no solo e seu estado de tensões depende de como essas duas grandezas são representadas, uma curva de retenção pode apresentar formato diferente quando relacionado a sucção com a umidade gravimétrica, grau de saturação ou umidade volumétrica, sendo necessária o conhecimento das variáveis de estado.

Uma curva de retenção, unimodal, pode ser dividida em três estágios, conforme apresentado na Figura 14. O primeiro estágio é compreendido pelos limites entre a umidade de saturação e o valor de entrada de ar, denominada zona saturada, em que todos os poros contém água. O segundo estágio, denominado zona de desaturação, é a fase de transição entre a zona satura e residual, onde ocorre a drenagem da fase líquida. O terceiro estágio é o então denominado estágio residual, onde a continuidade de água nos vazios é reduzida ou descontínua (CAVALCANTE *et al.* (2015), MARINHO *et al.* (2015), VILLAR *et al.* (2015) e VETTORELLO e MARINHO (2021)).

Essas divisões são definidas por parâmetros com significado físico, apresentado por Gitirana Junior *et al.* (2015) no Quadro 7.

Figura 13 – Curva de retenção típica - SWCC.



Fonte: Modificado de Charles e Menzies (2007).

Quadro 7 – Parâmetros Físicos da curva SWCC.

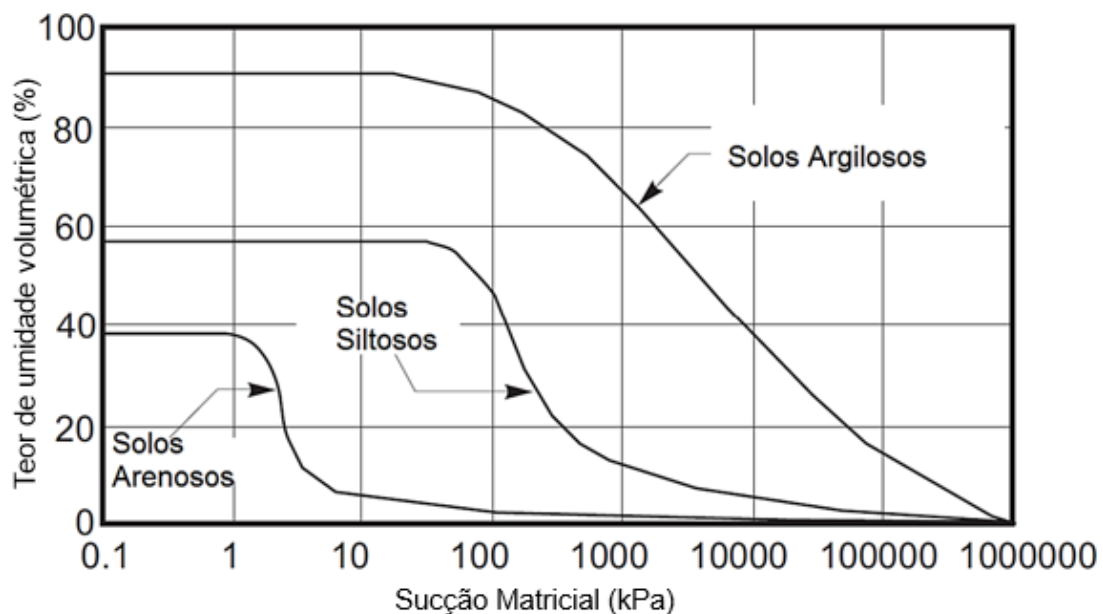
Parâmetro	Descrição
Valor de entrada de ar (Ψ_b)	Primeiro trecho – corresponde ao intervalo de sucção para o qual o material está completamente saturado. Esse trecho estende-se até o valor de sucção conhecido como valor de entrada de ar. Um possível significado físico do valor de ar, seria a máxima sucção que os maiores poros do material são capazes de suportar sem serem drenados.
Sucção Residual (Ψ_{res})	Segundo trecho – corresponde ao intervalo para o qual o solo sofre drenagem sob o efeito de aumento da sucção, sendo tal drenagem possível em termos de fluxo de água líquida, ou seja, a água a ser drenada está em uma condição relativamente livre nos poros do solo.
Grau de Saturação residual (S_{res})	Corresponde àquela quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que água drenada na forma de fluxo líquido. O grau de saturação determina o começo da terceira zona – estágio residual.

Fonte: Gitirana Junior *et al.* (2015).

Segundo Motta (2016), uma representação completa da curva SWCC consiste na determinação das curvas de umedecimento e secagem, onde a primeira representa a adsorção de água no solo, e a segunda, a dessorção da água, a diferença entre elas é conhecida como histerese.

Outro fator determinante para o comportamento da curva característica solo-água é a distribuição granulométrica dos solos (tipo de solo) e o arranjo estrutural. Motta (2016) observa que em solos argilosos, o desenvolvimento das sucções é maior para uma mesma umidade, do que para solos arenosos, essa tendência é representada pela significância participação da plasticidade na retenção de água. Em solos arenosos, pela sua estrutura, a dessaturação ocorre rapidamente após a entrada de ar. Os solos siltsos geralmente apresentam um comportamento médio (Figura 14).

Figura 14 – Curva de retenção típica - SWCC.



Fonte: Fredlund e Xing (1994).

O Quadro 8 apresenta algumas propostas na literatura dos modelos de previsão da curva característica dos solos. A curva é tradicionalmente modelada a partir dos dados experimentais, obtidos nos ensaios de medição de sucção. Segundo Gitirana Junior *et al.* (2015) a representação da curva de retenção, utilizada de forma contínua (por meio dos modelos), é necessária para análises numéricas envolvendo fluxo de água e na previsão de diversas propriedades de solos não saturados. De modo geral, quanto maior o número de parâmetros, maior a capacidade de ajuste da equação sob os dados experimentais, porém o custo dessa adição gera o aumento da complexidade da função.

Para Gerscovich e Sayão (2002), os solos brasileiros apresentam melhor ajuste nos modelos propostos por Gardner (1958), Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994).

Quadro 8 – Equações matemáticas dos modelos proposto para a curva SWCC.

Autoria	Ano	Equação	Parâmetros de ajuste
Gardner	1958	$\theta = \frac{1}{1 + q\Psi_m^n}$	Ψ_m : sucção matricial; q: valor da sucção de entrada de ar; n : inclinação do ponto de inflexão da SWCC.
Van Genuchten	1980	$\theta = \frac{1}{[1 + (\alpha\Psi_m)^n]^m}$	Ψ_m : sucção matricial; θ : umidade volumétrica; α, n, m : são parâmetros de ajuste.
Fredlund e Xing	1994	$\theta = C(\Psi_m) \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi_m}{\alpha} \right)^n \right]^m}$	Ψ_m : sucção matricial; θ : umidade volumétrica; θ_s : umidade volumétrica saturada; α, n, m : são parâmetros de ajuste.

Fonte: Motta (2016).

• Curva de Retenção Bimodal

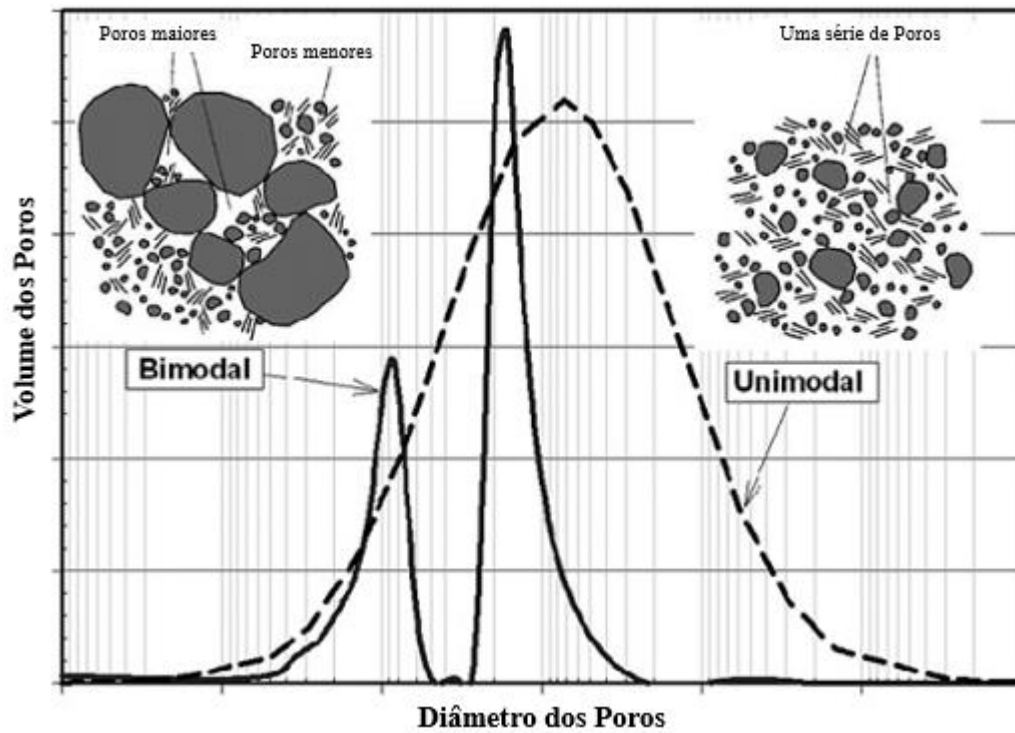
Muitos solos residuais e coluvionares, presentes nas regiões tropicais, apresentam distribuição granulométrica bimodal, resultando na característica bimodal da curva característica solo-água (SATYANAGA *et al.* (2013)).

Durner (1994) indicou que a distribuição bimodal do tamanho dos poros pode ser observada em solos com distribuição granulométrica descontínua, descrevendo a ocorrência de duas séries de poros, sendo governado pelo pelos grãos grossos (que geram grandes poros), e pelos grãos finos (que geram poros menores). Tal fenômeno ocorre pelo não preenchimento completo dos poros formados pelas partículas maiores (poros grandes), pela fração fina do solo.

A Figura 15 apresenta as considerações elucidadas por Durner (1994) e Satyanaga *et al.* (2013), observando as diferenças estruturais dos solos com comportamento unimodal e com o comportamento bimodal.

Motta (2016) destaca que, a partir do comportamento bimodal das curvas características, ela apresenta dois trechos de dessaturação de água e dois valores de entrada de ar (o primeiro referente a família de poros maiores, e o segundo ao dos poros menores).

Figura 15 – Estrutura e distribuição do tamanho dos poros de solos com características unimodal e bimodal.



Fonte: Adaptado de Satyanaga *et al.* (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região escolhida para o desenvolvimento do estudo da susceptibilidade à erosão está intrinsecamente relacionada com o Projeto de Extensão Universitária da parceria entre o Departamento de Engenharia Civil (DEC) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG/UNESP) e o Instituto Lucas Amoroso – ILA, no desenvolvimento de estudos e trabalhos para a implantação do novo Centro de Convivência e Assistência. A área de estudo é apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Área de Estudo - Centro de Convivência – ILA, Pingo de Ouro – Guaratinguetá/SP.



Fonte: Autor (2022).

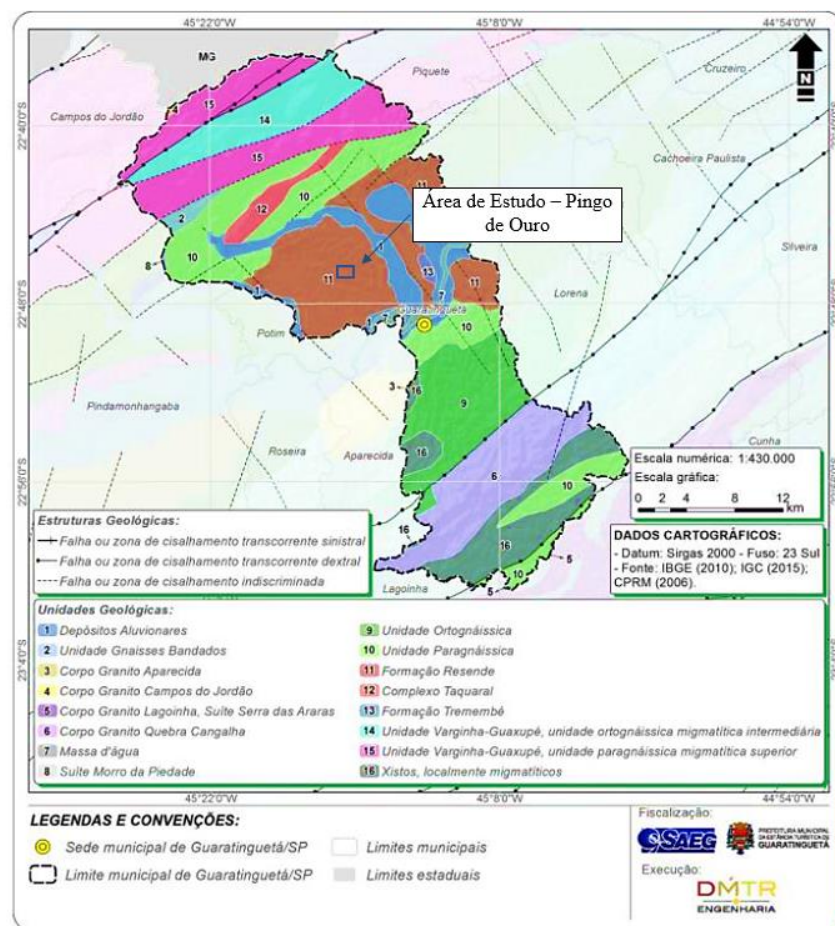
O bairro do Pingo de Ouro está localizado na região periférica da cidade Guaratinguetá, região do Vale do Paraíba – São Paulo, caracterizado pela baixa assistência dos serviços de infraestrutura, com enfoque na carência de infraestrutura sanitária e viária.

3.1.1 Aspectos geológicos e geomorfológicos

A cidade de Guaratinguetá abrange ao todo quinze unidades geológicas, conforme apresentado na Figura 17, onde a unidade de maior representatividade é a Paragnáissica, com predomínio de gnaisses paraderivados. No entanto, o bairro do Pingo de Ouro está localizado na Formação Resende, com predomínio de sedimentos arenosos (SOARES (2005) e STEINMETZ *et al.* (2020)). A região está localizada entre as escarpas e reversos da Serra da Mantiqueira, ao norte, e a Serra do Mar, ao sul, nos Tabuleiros e Colinas da Bacia Sedimentar de Taubaté, para Benessiuti (2011) e Soares (2005) a região é caracterizada geomorfológicamente pelos morros paralelos, morrotes baixos e colinas pequenas com espigões locais.

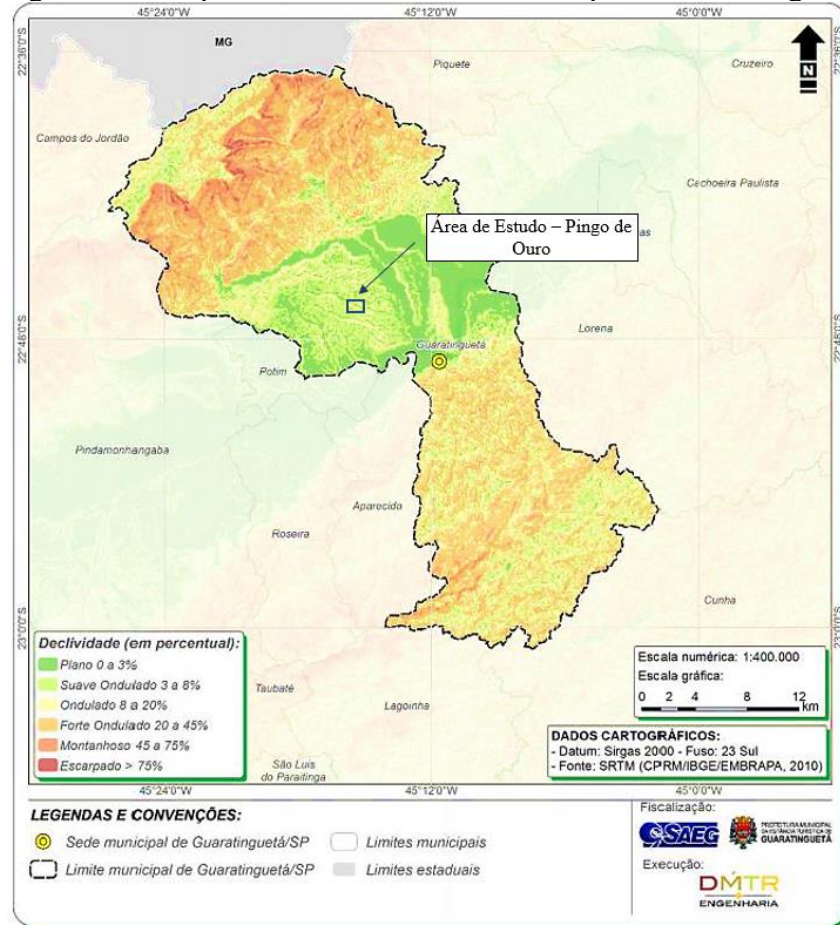
No que tange às características de relevo da área de estudo, elas são traduzidas por uma declividade entre Plano (0 a 3%) e Suave Ondulado (3 a 8%), conforme levantamento apresentado na Figura 18.

Figura 17 – Mapeamento das unidades geológicas do município de Guaratinguetá.



Fonte: Modificado de Steinmetz *et al.* (2020).

Figura 18 – Mapeamento do relevo do município de Guaratinguetá.

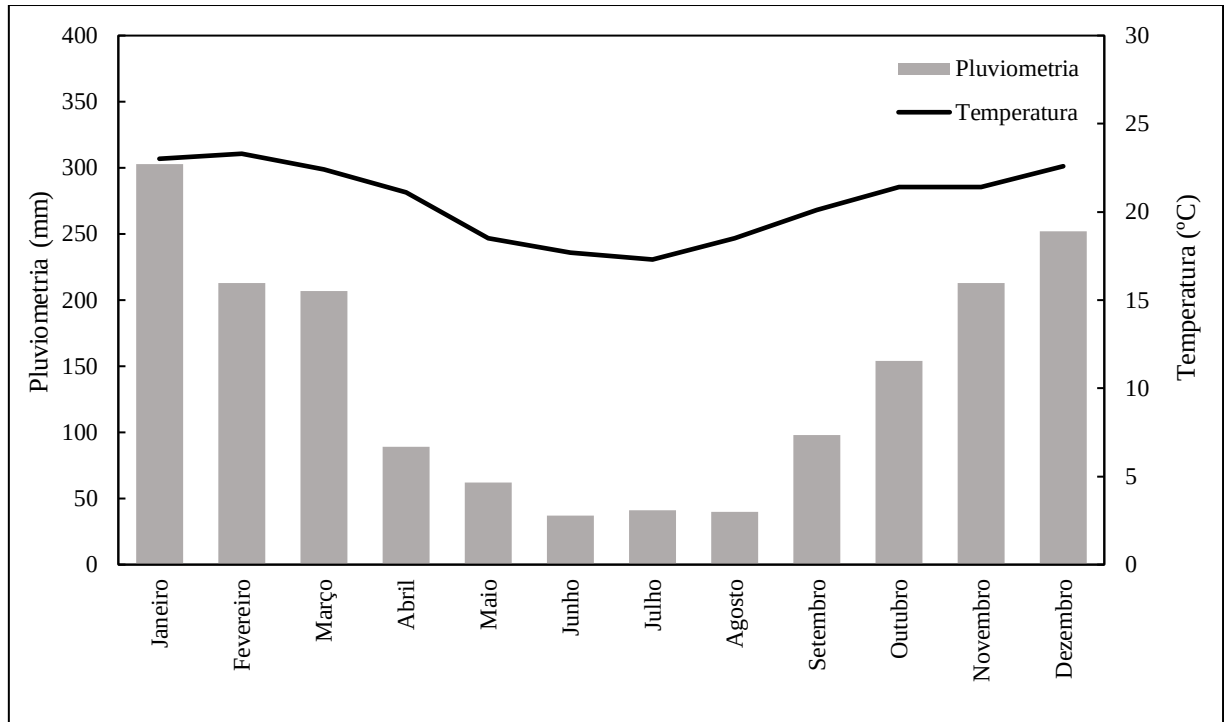


Fonte: Modificado de Steinmetz *et al.* (2020).

3.1.2 Aspectos Climáticos

O clima da região do bairro Pingo de Ouro em Guaratinguetá é classificado segundo a metodologia de Köppen-Geiger como Cwa - Temperado Úmido com Inverno Seco e Verão Quente. De acordo Steinmetz *et al.* (2020) a estação chuvosa ocorre de outubro até março e nos demais meses têm-se a estação de seca. O Gráfico 2 correlaciona a média pluviométrica dos últimos 23 anos durante os meses do ano, com a temperaturas médias observadas para o mesmo período. Observa-se que a média pluviométrica média anual é na ordem de 1318 mm, com temperatura média anual de 21 °C. Os meses de janeiro e fevereiro são os mais quentes do ano e apresentam as maiores médias pluviométricas (213 a 303 mm). Durante os meses de junho a agosto a região apresenta a época de inverno, com médias pluviométricas abaixo de 40mm.

Gráfico 2 - Série histórica dos dados climáticos de Guaratinguetá/SP (1999-2022).



Fonte: Autor (2022).

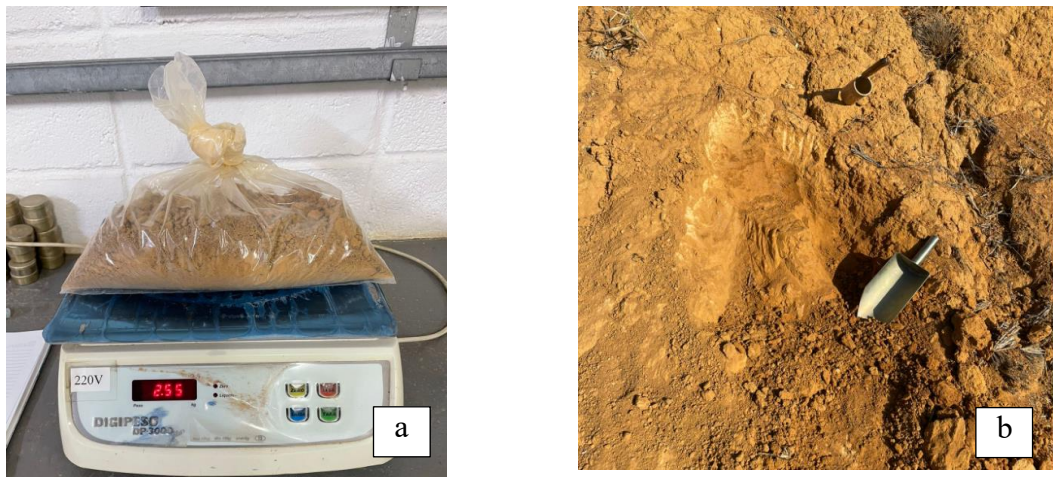
3.2 AMOSTRAGEM E COLETA DE AMOSTRA

A coletas das amostras foram realizadas em dois dias durante o mês de agosto de 2022, época caracterizada pelo baixo índice pluviométrico.

A especificidade inerente a cada tipo de ensaio solicita diferentes tipos de amostras para realização dos mesmos. Dessa forma, a fim de caracterizar devidamente com as condicionantes impostas em campo, os materiais do estudo foram coletados em diferente tipo de amostras, com o uso de diferentes metodologias e amostradores, conforme elencados a seguir:

- Amostras deformadas: as amostras foram coletas em sacos (conforme Figura 19), selados para garantir a preservação da umidade natural do solo, para tal amostragem foram realizados os principais ensaios de caracterização clássica (limites de consistência, densidade relativa dos grãos, umidade natural e ensaio sedimentométrico comparativo), e teor de matéria orgânica.

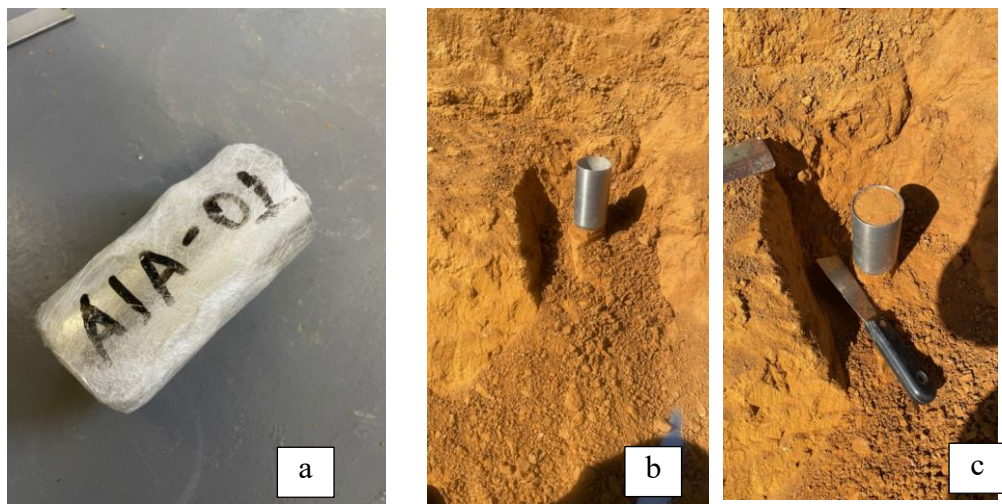
Figura 19 – Coleta de amostra do tipo deformada (a) saco com amostragem em laboratório, (b) processo de coleta da amostra



Fonte: Autor (2022).

- Amostras indeformadas em anéis metálicos cilíndricos biselados de parede fina (vide Figura 20): amostras coletadas com anéis biselados metálicos talhados em campo com razão de dimensões 1:2 (diâmetro: 5 cm e altura: 10 cm), envoltos com plástico filme com preservação da umidade e estrutura de campo. As amostras foram usadas para realização do ensaio de perda de massa por imersão com amostras indeformadas, para classificação MCT.

Figura 20 – Coleta de amostra do tipo indeformada em anel metálico (a) cilindro após coleta, (b) e (c) procedimento de talhagem da amostra em campo



Fonte: Autor (2022).

- Amostras em anéis de PVC: foram talhadas a partir das amostras indeformadas (apresentadas nos itens anteriores) em anéis de PVC, com altura de 2 cm e diâmetro de 5 cm, para realização dos ensaios de compressão diametral com variação da sucção e umidade. As amostras talhadas são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – (a) Amostras em anéis de PVC – talhagem, (b) armazenagem.



Fonte: Autor (2022).

- Amostras indeformadas do tipo bloco (vide Figura 22): amostras coletadas em blocos indeformados talhados em campos, com dimensões aproximadas de 15 x 15 x 15 cm, envoltos com plástico filme com preservação da umidade e estrutura de campo, e armazenados em caixa de isopor. As amostras foram usadas para realização dos ensaios de infiltrabilidade, imersão total e parcial, e dispersão rápida (*crumb test*).

Figura 22 – Coleta de amostra do tipo indeformada do tipo bloco (a) abertura e preparação do local de coleta, (b) talhagem do bloco em campo e (c) armazenagem e identificação da amostra



Fonte: Autor (2022).

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram realizados durante os meses de agosto a setembro de 2022, com exceção do ensaio de teor de matéria orgânica, todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos e Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil. O ensaio de teor de matéria orgânica foi realizado no laboratório de Análises Químicas e Biológicas.

3.3.1 Limites de Consistência, densidade relativa dos grãos e ensaio sedimentométrico comparativo

Os ensaios clássicos de caracterização da engenharia geotécnica são apresentados ao longo desse tópico, os mesmos foram executados seguindo as metodologias das principais normativas nacionais e internacionais, assim como recomendações e adaptações previamente apresentadas pela literatura (e.g. Bastos (1999), Pinto (2000), Head (2006), Fernandes (2014, 2016), Camapum de Carvalho *et. al.*(2015), Fernandes (2014 e 2016) e Massad (2016)).

Densidade Relativa dos Grãos

A densidade relativa dos grãos foi determinada pela metodologia empregada no Método A da ASTM D854/14 – “*Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*”, para determinação com picnômetro.

Limites de Consistência e Atividade Coloidal das argilas

Os ensaios para determinação dos limites de consistência dos solos – limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade – foram realizados a partir das metodologias preconizadas pelas normas ABNT NBR 6457/68 (Preparação de amostras: compactação e caracterização), ABNT NBR 6459/84 (Determinação do Limite de Liquidez) e ABNT NBR 7180/84 (Determinação do Limite de Plasticidade), e pelas recomendações propostas por Massad (2016).

A atividade coloidal da argila foi determinada a partir da equação (3).

$$A_t = \frac{IP}{\% \text{ Argila}} \quad (3)$$

Onde:

A_t : Atividade Coloidal das Argilas;

IP: Índice de plasticidade; e

% Argila: percentual de fração argilosa no solo.

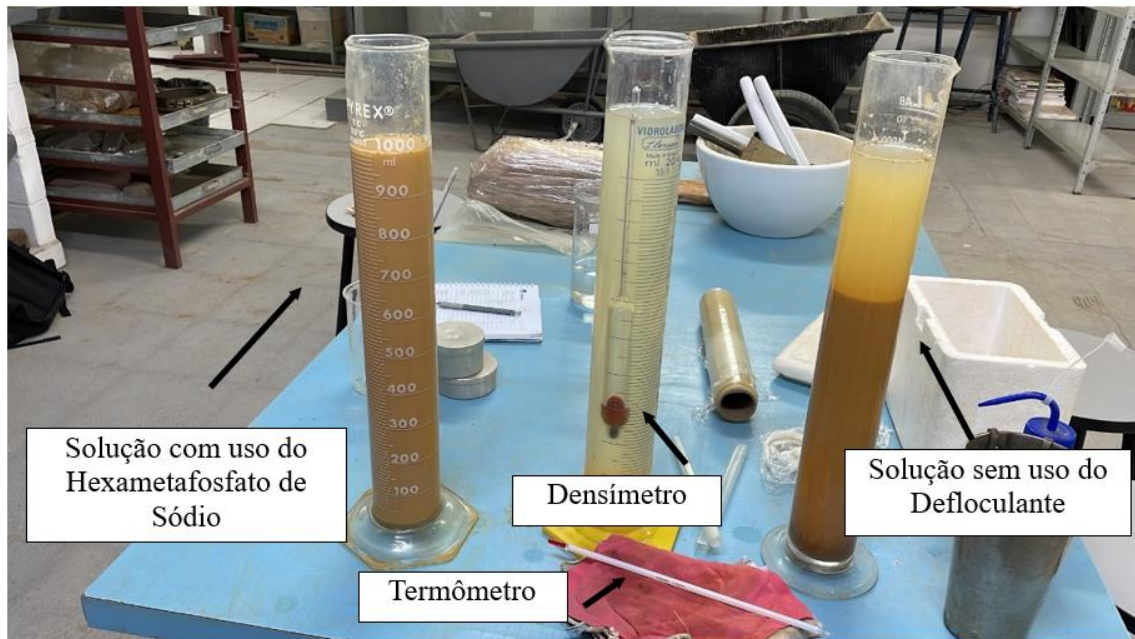
Ensaio Sedimentométrico Comparativo

O ensaio é referenciado pela norma ABNT NBR 13602 (1996), e consiste, de modo geral, na comparação entre as curvas granulométricas com o uso e sem o uso de defloculante, a metodologia foi proposta inicialmente por Volk (1938). Portanto, de modo geral o ensaio apresenta a mesma metodologia de um ensaio de granulometria comum (ABNT NBR 7181/2016: Solo - Análise granulométrica), diferenciando-se apenas pela amostra que não se utiliza o defloculante. O ensaio, é dividido em duas grandes etapas: (i) fase de peneiramento, comum aos dois ensaios, e (ii) fase de sedimentação.

(i) Fase de peneiramento: essa etapa consiste na passagem do solo pelo conjunto de peneira da série fina e da série grossa. As massas retidas em cada uma das peneiras devem ser aferidas em balança de precisão (0,01g). Essa fase é referenciada e normatizada pela ABNT NBR 13602 (1996).

(ii) Fase de sedimentação: nessa etapa o ensaio é dividido em duas análises – com uso de defloculante, nesse caso o hexametáfosfato de sódio, e sem o uso de defloculante – os ensaios são realizados em conjunto, conforme apresentado na Figura 23. Durante o ensaio as leituras de densidade para ambos as soluções devem ser feitas nos intervalos de 0,5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h , 4h, 8h, 16h e 24h, assim como a temperatura. Nessa etapa são utilizados: um cronômetro, um densímetro (devidamente calibrado), um termômetro (para aferição da temperatura das soluções) e um par de buretas com capacidade de 1000mL.

Figura 23 – Etapa de sedimentação do ensaio sedimentométrico comparativo.



Fonte: Autor (2022).

Ao fim dos ensaios, os resultados devem ser plotados de forma gráfica para avaliação comparativamente entre as duas curvas granulométricas, o resultado do percentual de dispersão é dado conforme apresentado na equação (4).

$$P_d = \frac{\% < 5\mu\text{m}_{\text{sem defloculante}}}{\% < 5\mu\text{m}_{\text{com defloculante}}} \quad (4)$$

Onde:

P_d : Percentual de dispersão;

$\% < 5\mu\text{m}_{\text{sem defloculante}}$: Porcentagem de particular com diâmetro menor do que 0,005mm na curva granulométrica sem o uso de defloculante;

$\% < 5\mu\text{m}_{\text{com defloculante}}$: Porcentagem de particular com diâmetro menor do que 0,005mm na curva granulométrica com o uso de defloculante.

Os valores, em percentual obtidos pela comparação, atribuídos a dispersão em solos argilosos podem ser classificados segundo o critério da Tabela 4.

Tabela 4— Classificação para o ensaio sedimentométrico comparativo.

Classificação da dispersibilidade	Valores
Baixa	$P_d < 20\%$
Média	$20\% < P_d < 25\%$
Alta	$25\% < P_d < 50\%$
Muito Alta	$P_d > 50\%$

Fonte: Adaptado de Volk (1938), e Ramidan (2003).

3.3.2 Teor de Matéria Orgânica

O método quantitativo para a determinação do teor de matéria orgânica, consiste nas etapas de queima desse material em altas temperaturas. Inicialmente o material é disposto em um recipiente de porcelana em estufa com temperaturas entre 105 e 110°C, por um período de 24 horas, ou até se observar constância na massa. Após esse período o material é levado para a queima em mufla (Figura 24) por um período de 4 horas, com temperatura igual a 400°C, conforme adaptações nos apontamentos da ABNT NBR 13600 (2022). O teor de matéria orgânica é dado pela equação (5):

$$\% \text{ M. O.} = \frac{M_{\text{est}} - M_{\text{mufla}}}{M_{\text{est}}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

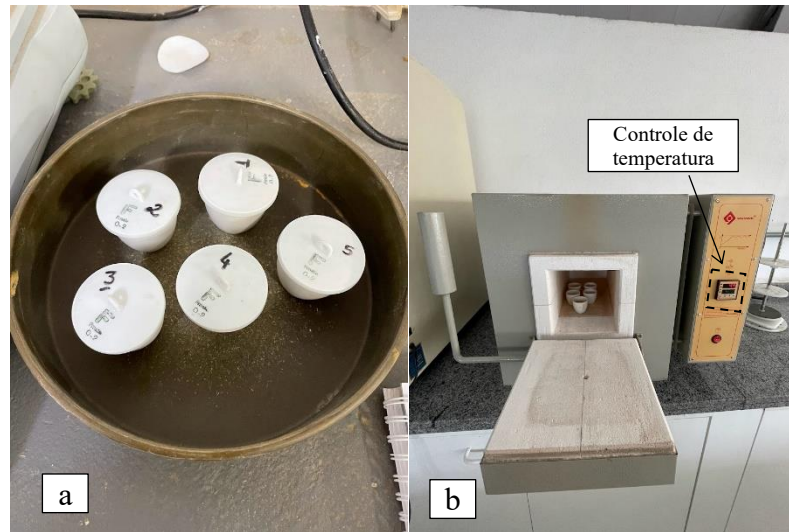
% M. O: Percentual de Matéria orgânica;

M_{est} : Massa do solo após seco em estufa;

M_{mufla} : Massa do solo após seco em mufla.

O procedimento utilizado para a determinação da matéria orgânica no solo seguiu as considerações de Campos (2006), no qual a temperatura submetida na mufla e o tempo de exposição de queima foram mensurados a fim de minimizar a perda de água de constituição dos argilominerais.

Figura 24 – Procedimento para realização do ensaio teor de matéria orgânica (a) Preparo das amostras nos recipientes de porcelana, (b) Amostras nos recipientes de porcelana posicionadas na mufla



Fonte: Autor (2022).

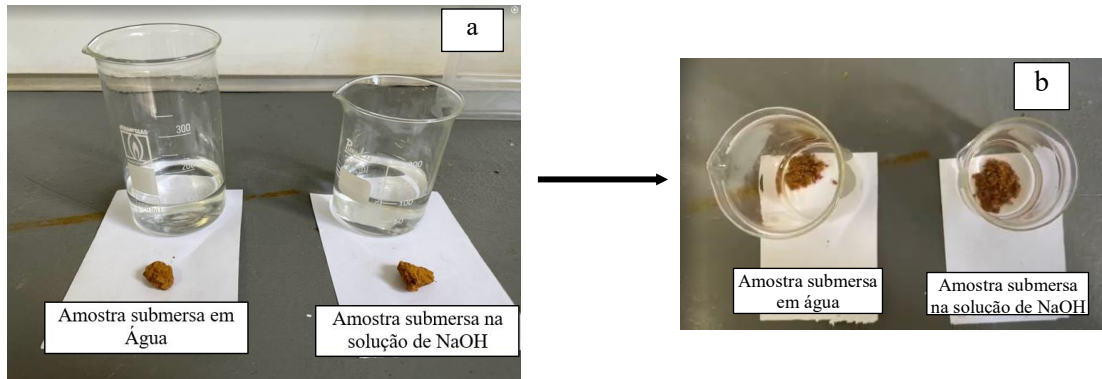
3.4 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

Os ensaios que caracterizam o potencial de erosão hídrica dos solos avaliam qualitativa e quantitativamente esse fenômeno. Portanto, são apresentados ao longo desse tópico as metodologias e referências utilizadas para a realização dos ensaios destinados para a avaliação direta e indireta da erodibilidade.

3.4.1 Ensaio de dispersão rápida (*Crumb test*)

O procedimento adotado para a realização dos ensaios segue as adaptações de Sherard *et al.* (1976) com as observações de Head (2011). São separados 2 torrões com dimensões aproximadas entre 6 e 10mm de diâmetro, com aproximadamente 3g de solo com preservação da estrutura e umidade natural, conforme apresentado na Figura 25. Em seguida os torrões são colocados nas vidrarias (uma apenas com água e a outra com solução de NaOH) e se observa a dispersão do material ao longo do tempo. Head (2011) recomenda a avaliação do comportamento nos primeiros 5-10 minutos, Sherard *et al.* (1976) apresenta classificação dos resultados qualitativos apresentado no Quadro 6, para a amostragem após uma hora de imersão.

Figura 25 – *Crumb test* – (a) preparação da amostra e (b) submersão do solo



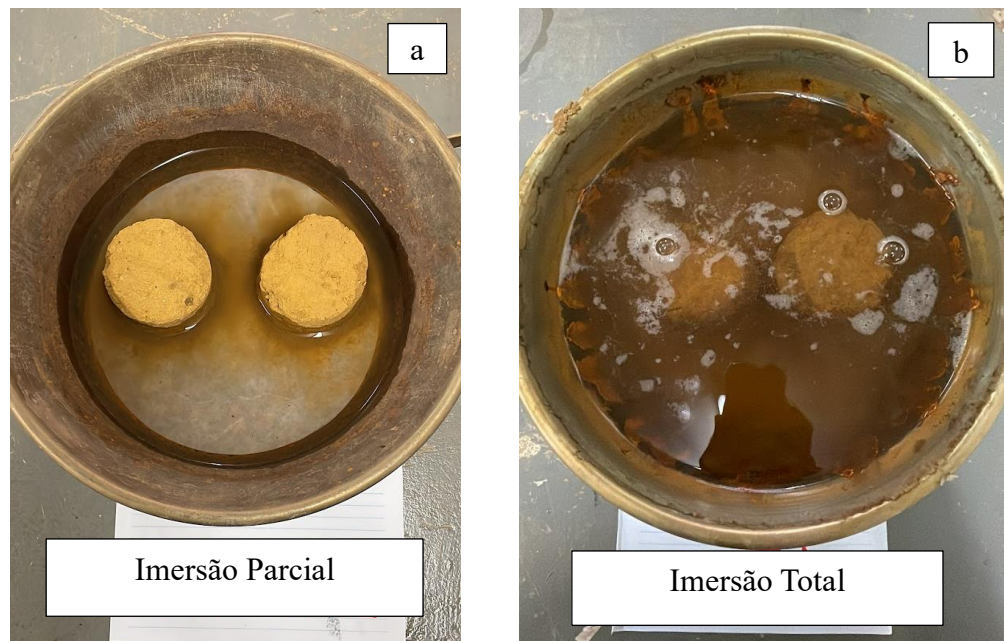
Fonte: Autor (2022).

3.4.2 Ensaio de Desagregação

O método empregado para a realização dos ensaios de desagregação é referenciado por Mascarenha *et al.* (2015). Para o procedimento devem ser talhadas dois pares de amostras indeformadas, de formato cilíndrico (diâmetro e altura de 5,0 cm), conforme elucidado na Figura 27.

A verificação dos efeitos da imersão do corpo de prova é realizada por duas metodologias: (i) imersão total da amostra, representado pela Figura 26a, nessa avaliação o corpo de prova é totalmente imerso no recipiente com água, e observado após um período de 24 h. (ii) imersão parcial da amostra, apresentado pela Figura 26b, para essa avaliação o processo de imersão é feita ao longo do tempo, no primeiro momento é imerso apenas a base da amostras, após 30 minutos então preenche-se o reservatório com 1/3 da altura da amostra, 2/3 da altura e completa imersão, com intervalo de 15 minutos a cada etapa, após essas etapas, o corpo de prova deve ser observado após 24h.

Figura 26 – Ensaio de desagregação por imersão (a) amostra com imersão parcial, (b) amostra com imersão total.



Fonte: Autor (2022).

Para o processo de imersão total, as amostras devem ser cuidadosamente postas em um recipiente, com uma pedra porosa na base, e posteriormente levada a imersão completa, a imersão deve ser feita pelas bordas do recipiente, a fim de evitar perturbações na amostra.

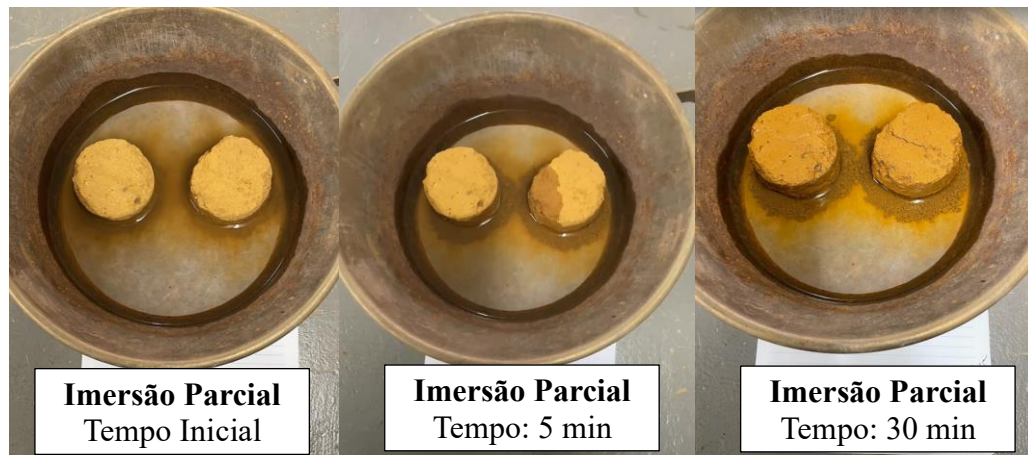
Para processo de imersão parcial as amostras devem ser dispostas sob uma pedra porosa, e o preenchimento da água deve ser até nível da base, após 30 minutos, em que se observa a saturação por capilaridade (Figura 28), deve-se preencher o recipiente de forma faseada, conforme apresentado no tópico 2.2.2, cuidadosamente pelas bordas do recipiente.

Figura 27 – Amostras do ensaio de desagregação



Fonte: Autor (2022).

Figura 28 – Etapa de saturação das amostras submetidas à imersão parcial



Fonte: Autor (2022).

Mascarenha *et al.* (2015) propõe para a avaliação dos resultados dos ensaios a seguinte análise: sem resposta (a amostra mantém a forma), abatimento (desintegração da amostra formando uma pilha), fraturamento (quebra da amostra em pedaços, mantendo a forma das faces externas), e dispersão (parede da amostra difusa, ocorrendo densa suspensão coloidal).

3.5 ENSAIOS PELA METODOLOGIA MCT - Adaptado

Ao longo desse tópico é apresentado o desenvolvimento das metodologias empregadas por Nogami e Villibor (1981) na classificação e determinação dos critérios de erodibilidade em solos tropicais, associadas a metodologia MCT – Adaptado.

3.5.1 Ensaio de infiltrabilidade

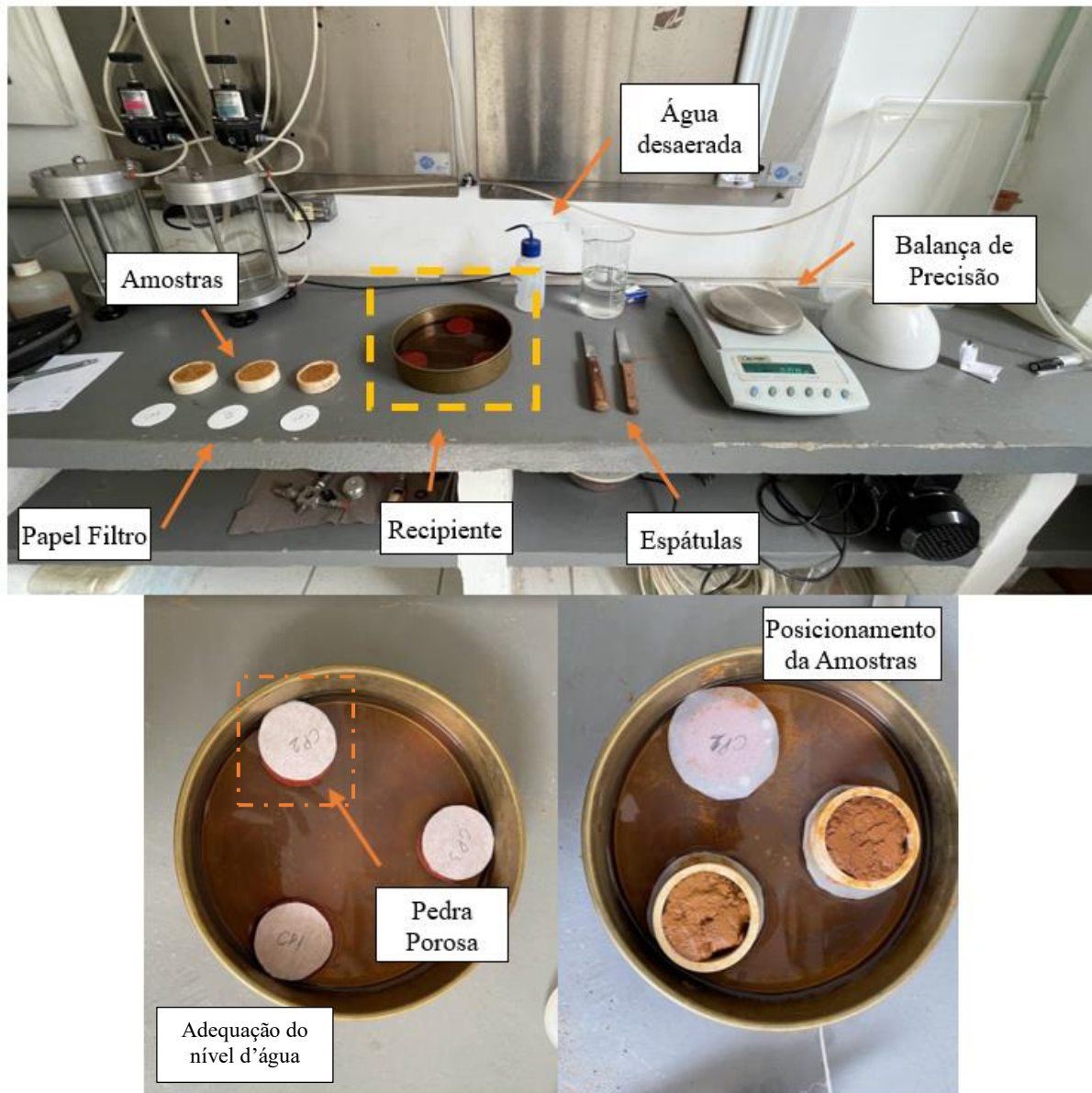
Conforme apresentado ao longo desse trabalho, o ensaio de infiltrabilidade (absorção) avalia e quantifica a velocidade de ascensão capilar dos solos pela metodologia MCT.

Para realização do ensaio, são moldadas amostras indeformadas de formato cilíndrico em amostradores de tubo de PVC, com diâmetro de 5,0 cm e altura de 2,0 cm. Após o preparo das amostras, as mesmas devem passar pelo processo de secagem ao ar, por um período mínimo de 72 horas. Ao longo do ensaio, as amostras devem ser posicionadas continuamente sobre uma lâmina freática, em toda a área de base corpo de prova, enquanto se observa a ascensão capilar.

Os materiais e arranjo do ensaio são ilustrados na Figura 29, e o procedimento básico para o ensaio seguiu os seguintes passos:

1. Inicialmente, posiciona-se as bases para o corpo de prova, com a colocação das pedras porosas e papel filtro (com dimensão ligeiramente maior do que o conjunto solo/amostrador) no recipiente.
2. Segue-se preenchendo o recipiente, com auxílio da pisseta nivela-se o nível de água com o topo do papel filtro, saturando-o. Ao longo do ensaio o nível de água deve ser mantido constante, preenchendo o recipiente com o avanço das frente de absorção das amostras.
3. As amostras devem-se ser pesadas (conjunto anel + solo), e então cuidadosamente posicionada em cima do papel filtro. Ao longo do ensaio, as amostras devem ser pesadas em intervalos de tempo em relação quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25 min, e assim por diante). O processo de pesagem deve ser feito de modo cuidadoso, para evitar a desestruturação da amostra.
4. Para pesagem, o executor deverá tirar a amostra com o auxílio de espátulas, evitando perdas de massa, levando-a a balança. Recomenda-se para esse procedimento a pesagem com o papel filtro da base do conjunto, ao término o ensaio afere-se a massa do papel filtro saturado.
5. O procedimento deve ser repetido a medida em que as leituras das massas se tornem constantes ou apresentem pouca variação.
6. Os resultados são plotados em função do volume de água absorvido por área da amostra pela raiz do tempo, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 29 - Materiais e montagem do ensaio de infiltrabilidade - MCT.



Fonte: Autor (2022).

A curva típica dos ensaios de absorção é representada por um trecho retilíneo inicial, seguido por um trecho de tendência (quase que horizontal), significando que a frente de umidade atingiu o topo da amostra. O coeficiente de sorção é representado pela inclinação de reta do primeiro trecho retilíneo, determinado pela equação (6).

$$s = \frac{L1 - L0}{t1 - t0} \quad (6)$$

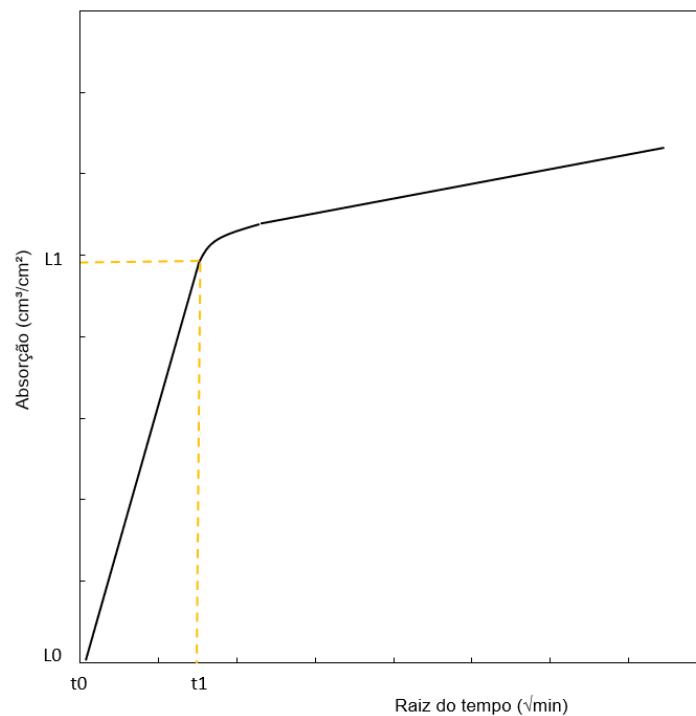
Onde:

s : coeficiente de sorção ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$);

L_0, L_1 : coordenadas verticais do ponto inicial e final, respectivamente, do primeiro trecho retilíneo; e

t_0, t_1 : coordenadas horizontais do ponto inicial e final, respectivamente, do primeiro trecho retilíneo.

Figura 30 - Curva típica ensaio de Infiltrabilidade – MCT.



Fonte: Adaptado de Bastos (1999).

3.5.2 Ensaio de erodibilidade específica (perda de massa por imersão)

Para a realização dos ensaios de perda de massa por imersão, são talhadas amostras indeformadas, em amostradores de PVC, com dimensões de 80 mm de altura e diâmetro de 40 mm. Os corpos de prova são talhados e dispostos ao ambiente para secagem, por um período mínimo de 72 horas.

Após o período, as amostras são posicionadas em anteparos de PVC seguidos pela extrusão da amostra em 10 mm. O procedimento de moldagem e preparação da amostra é apresentado na Figura 31.

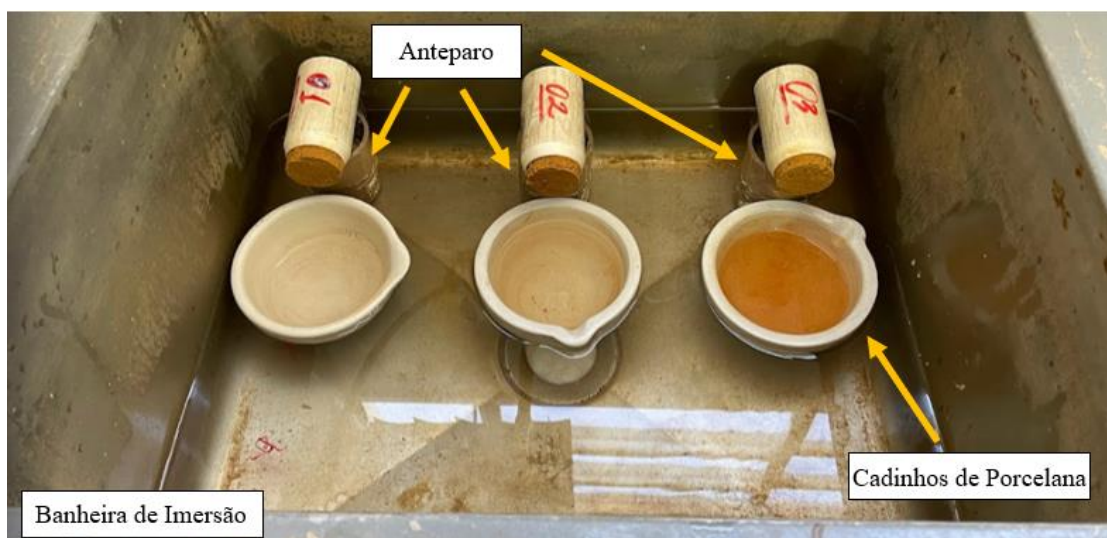
Figura 31 – Preparo das amostras do ensaio de perda de massa específica.



Fonte: Autor (2022).

As amostras então são levadas para à imersão, de tal forma que os corpos de prova sejam posicionados atrás dos cadinhos de porcelana, por um período de 24 horas. Após a etapa de imersão, a massa perdida disposta nos cadinhos é levada para a estufa (até constância de massa), e calculada a perda de massa de cada uma das amostras. O processo descrito é ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Processo de imersão das amostras.



Fonte: Autor (2022).

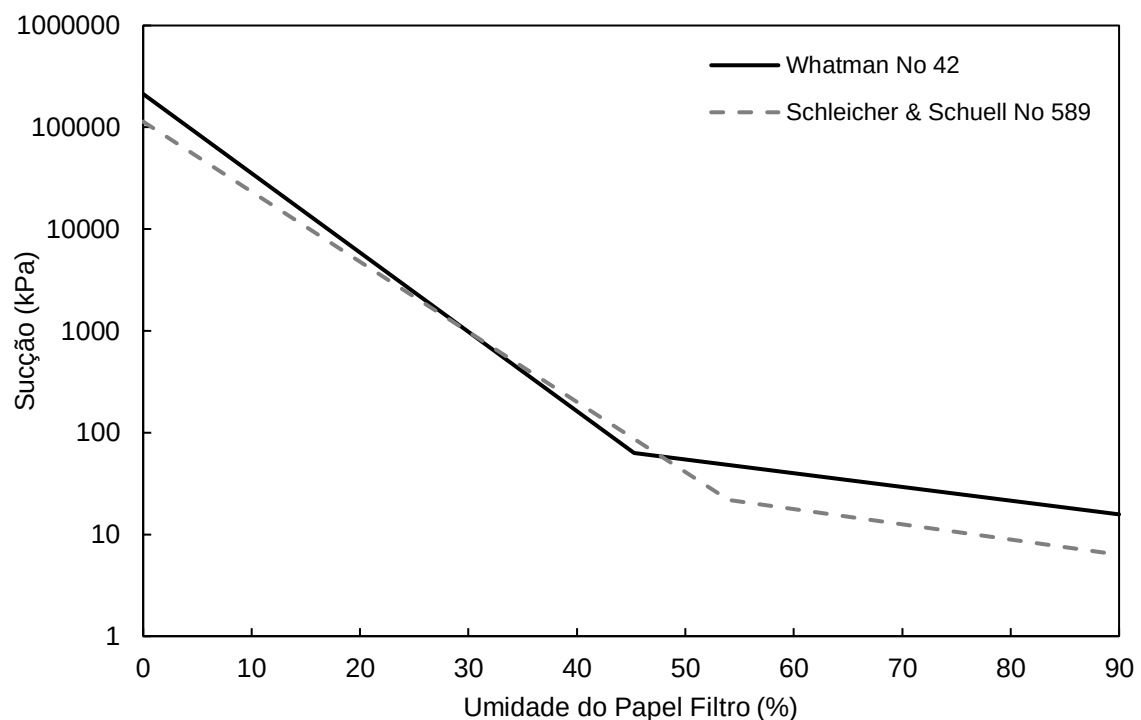
3.6 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA: MÉTODO DO PAPEL FILTRO

A determinação da curva característica solo-água com o emprego do método do papel filtro consiste na medição da sucção através do equilíbrio de fluxo entre a amostra e o papel filtro.

Para a determinação da curva característica do solo-água (SWCC - *Soil-water characteristic curve*), foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42, pelas recomendações de precisão nos valores de sucção. A calibração dos papéis filtros são apresentadas no Gráfico 3.

Motta (2016) destaca algumas observações para a obtenção precisa dos valores de sucção dos solos pela técnica do papel filtro, de modo especial o tempo de equilíbrio e o manuseio correto do papel (recomendando o uso de luvas ou pinças). O tempo de resposta do papel e a amostra é regida pela ordem de uma semana, contudo, Marinho (1994) correlaciona o período de equilíbrio com os valores de sucção total da amostra, ou seja, quanto maior a parcela da sucção matricial (solo como menores teores de umidade), maior deve ser o tempo de equilíbrio, conforme apresentado na Tabela 3.

Gráfico 3 - Curva de calibração para os papéis filtro Whatman nº 42 e Schleicher & Schuell nº 589.



Fonte: Adaptado de ASTM D5298 (2016).

Os materiais utilizados para a realização da medição de sucção matricial dos solos são relacionados abaixo:

- Papel Filtro do Tipo II – Quantitativo;
- Filme plástico e papel alumínio;
- Pinças e luvas;
- Caixa térmica;
- Balança analítica de precisão 0,0001 g, com câmara de pesagem; e
- Estufa.

O método consiste na medição da sucção, através do contato direto entre o papel filtro e a superfície da amostra. Para calibração da curva característica é relacionado uma série de corpos de prova, moldados nas condições indeformadas, em anéis de PVC biselados, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, com diferentes teores de umidade.

A metodologia empregada nessa monografia é apresentada nos procedimentos descritos por Marinho (1994) e Marinho *et al.* (2015).

Conforme apresentado nos tópicos anteriores, para a realização do ensaio são utilizados principalmente dois papéis filtros. Para a determinação da curva característica nesse trabalho foi utilizado o papel filtro do Tipo II - Whatman nº 42. Seguindo as recomendações de Camapum de Carvalho *et al.* (2015) e Marinho *et al.* (2015), em amostra com os maiores teores de saturação, em que o solo pode ser facilmente aderido ao papel filtro, foi utilizado um papel intermediário ao papel de medição, para evitar distorções durante o processo de determinação da sucção.

Os papéis devem ser cortados sem contato direto, empregando o uso de luvas e pinças. Os mesmos devem apresentar o tamanho máximo possível, no contato solo-papel, de modo a maximizar a precisão das medições de umidade do papel. Após colocação do papel no solo (topo e base), os conjuntos devem ser embrulhados em filme plástico, seguidos de uma camada de papel alumínio e novamente envoltos em uma camada de filme plástico, garantindo a fixação do papel e o solo.

Conforme recomendações elucidadas no item 2.3.2, as amostras devem permanecer por um período mínimo de 7 dias em repouso, para equalização das sucções matriciais, garantindo o mecanismo de transferência de umidade solo-papel filtro.

Após o período, o conjunto deve ser aberto com agilidade e precisamente serem postos na câmara de pesagem da balança de precisão (deve-se verificar a tara da balança antes da abertura do conjunto). No momento da retirada do papel deve iniciar a contagem do tempo, e

disposto na balança. Para os valores de tempo pré-determinado (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 90 segundos), a massa do papel deve ser medida. O valor equivalente ao tempo zero será utilizado para a determinação da umidade, devendo, portanto, ser calculado por meio da correção exponencial. O mesmo procedimento de pesagem deve ser aplicado para a obtenção da massa do papel filtro seco em estufa (105°), após duas horas.

Com a determinação do teor de umidade do papel, utiliza-se a equação de calibração para se obter a calibração. Para o papel filtro quantitativo Whatman nº 42, os valores de sucção podem ser definidos com a equação (7).

$$\begin{cases} \Psi_m = 10^{4,84-0,622 w_{pF}} & , \text{ para } w_{pF} \leq 47\% \\ \Psi_m = 10^{6,05-2,48 \log w_{pF}} & , \text{ para } w_{pF} > 47\% \end{cases} \quad (7)$$

Onde:

Ψ_m : Sucção matricial do solo; e

w_{pF} : Umidade do papel filtro.

O modelo utilizado nesse trabalho foi o proposto por Durner (1994) a partir da extensão do modelo simples de Van Genuchten (1980), conforme é apresentado na equação (8). A proposta apresentada é válida tanto para solos bimodais, quanto para solos multimodais, o modelo compreende a modelagem a partir da combinação de modelos, aumentando, portanto, o número de coeficientes.

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i S_i(\Psi_m)$$

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i \Psi_m)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (8)$$

Onde:

$S_i(h)$: subfunções dos modelos unimodais;

k : é o número de subsistemas formados pela distribuição de tamanho de poros, no caso do sistema bimodal, $k = 2$;

Ψ_m : valor da sucção matricial;

w_i : são os fatores de peso das subcurvaturas ($0 < w_i < 1$ e $\sum w_i = 1$); e

α_i, n_i, m_i : são os parâmetros das subcurvaturas, assim como no modelo unimodal.

Os resultados foram interpolados pelo uso do software SWRC Fit para modelos bimodais, com a combinação de duas modelagens da equação unimodal de Van Genuchten (1980), conforme representado pelas equações (9) e (10).

$$S_e = w_1[1 + (\alpha_1 \Psi_m)^{n_1}]^{-m_1} + (1 - w_1)[1 + (\alpha_2 \Psi_m)^{n_2}]^{-m_2}$$

$$m_i = 1 - 1/n_i \quad (9)$$

$$\theta = \theta_s \cdot S_e \quad (10)$$

Onde:

S_e : Grau de saturação;

θ : Teor de umidade volumétrica;

θ_s : Teor de umidade de umidade volumétrica para o solo saturado;

α_i, n_i e m_i : Parâmetros de ajuste do modelo;

w_i : são os fatores de peso das subcurvaturas ($0 < w_i < 1$ e $\sum w_i = 1$); e

Ψ_m : valor da sucção matricial;

Para tratamento dos dados e ajuste das curvas, foi utilizado o software SWRC Fit desenvolvida por Seki (2007) e Seki *et al.* (2022).

3.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM VARIAÇÃO DE SUÇÃO

Conforme apresentado nos itens anteriores, a resistência à tração é uma importante propriedade no estudo do comportamento do solo frente a susceptibilidade à erosão. Tornando importante a sua quantificação frente a variação de saturação do solo, dessa forma, para a sua determinação foi empregado o método de compressão diametral (também conhecido como *Brazilian Test*) com as amostras utilizadas para a determinação da curva característica (SWCC).

Os corpos de prova, após a submissão das etapas apresentadas no item 3.6, devem desembrulhados completamente e extrusados do anéis de PVC, nesse processo deve-se atentar a preservação da estrutura do solo (durante a extrusão), e a conservação da umidade, a fim de comparar os resultados de tração com a sucção do solo, sendo os corpos de prova encaminhado diretamente para a prensa de compressão, conforme apresentado na Figura 33.

As amostras devem então ser posicionadas entre dois apoios rígidos, paralelos entre si e opostos um ao outro no sentido do diâmetro. Segue-se, portanto, para o carregamento que é

dado pela deformação controlada da prensa (deslocamento vertical de 0,90 mm/min). A resistência a tração é obtida pela equação (11).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DH} \quad (11)$$

Onde:

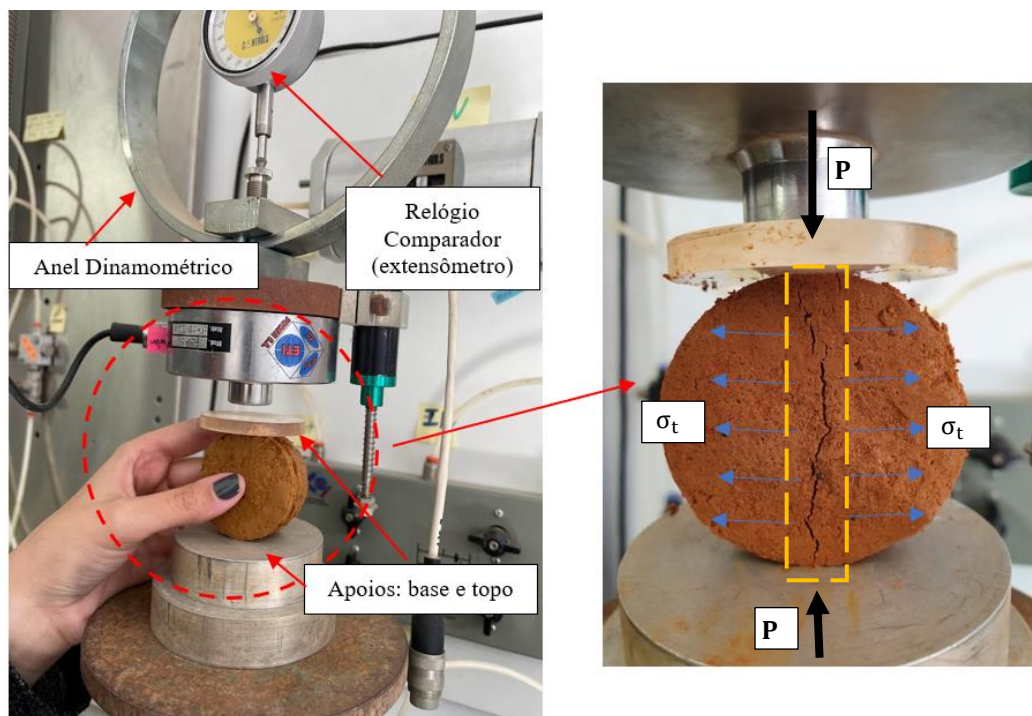
σ_t : Resistência à tração;

P: Carga axial calculada partir do valor registrado pelo anel dinamométrico (0,809 N/mm);

D: Diâmetro do corpo de prova; e

H: Altura do corpo de prova.

Figura 33 – Prensa e equipamentos utilizados para realização dos ensaios de compressão diametral.



Fonte: Autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos pela campanha de investigação proposta no início dessa monografia. Os itens que seguem discutem os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo estudado, a avaliação dos estudos de verificação da susceptibilidade do solo à erosão, a construção da curva característica solo-água, obtida pelo método do papel filtro, correlacionando-a com a resistência à tração e o estudo de erodibilidade. O item 4.4 traz um compilado geral, de forma resumida, dos principais métodos de avaliação direta e indireta da erodibilidade nos solos que foram abordados ao longo do trabalho.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os primeiros métodos para a avaliação da susceptibilidade à erosão nos solos levavam em consideração a classificação a partir das características geotécnicas dos solos. A erodibilidade é caracterizada pelo conjunto das propriedades solo, fazendo necessária à sua caracterização. Na Tabela 5 são apresentadas as principais propriedades e índices do solo.

Tabela 5 – Resumo da caracterização geotécnica.

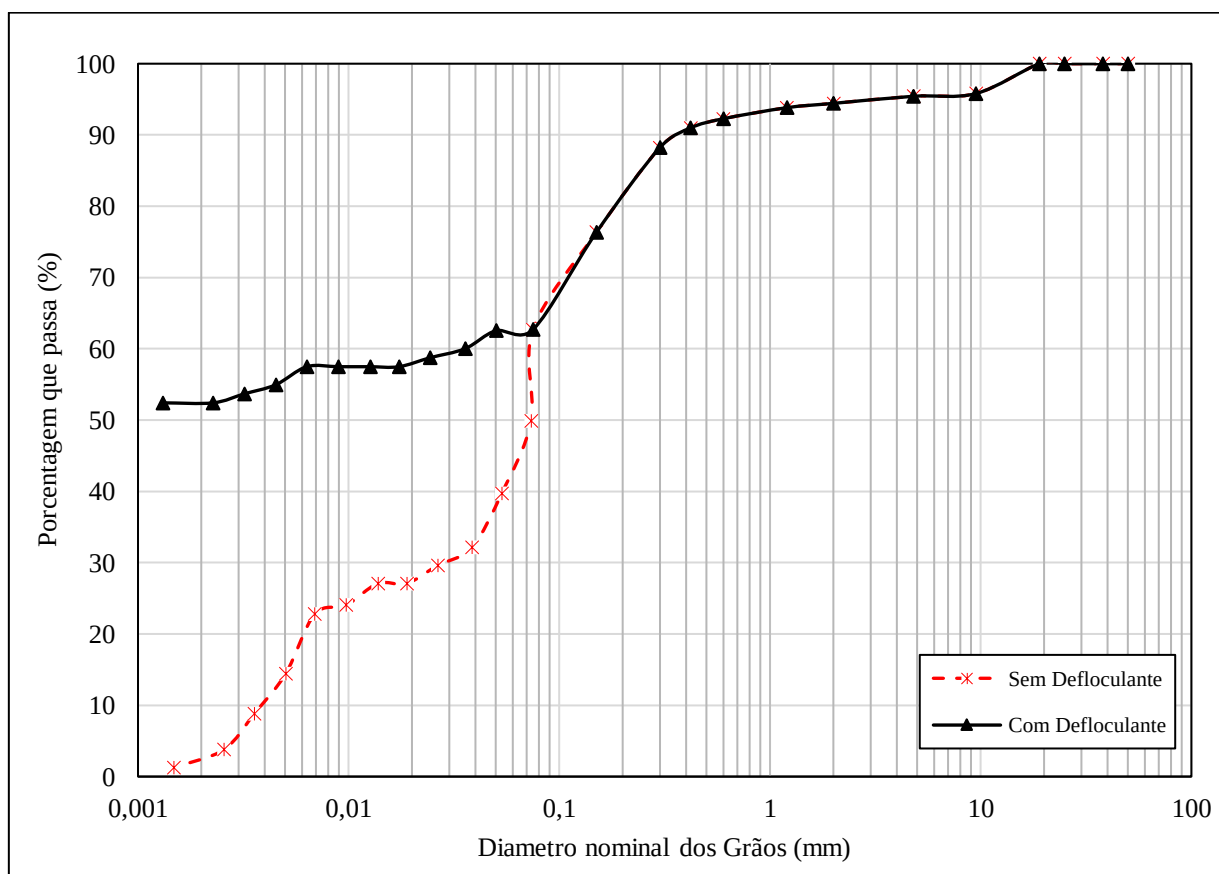
Propriedade	Unidade	Valor
Densidade Relativa dos Grãos	g/cm ³	2,744
Massa Específica Seca	g/cm ³	1,35
Índice de Vazios	-	1,03
Porosidade	%	50,81
Limite de Liquidez	%	50,08
Limite de Plasticidade	%	33,19
Índice de Plasticidade	%	16,89
Classificação USCS	-	ML
Classificação ABNT	-	Argila Arenosa
Índice de Atividade Coloidal	-	0,30 (Baixa atividade)
Teor de Matéria Orgânica	%	0,72
Classificação tátil visual	-	Argila arenosa, amarela alaranjada.

Fonte: Autor (2022).

O resultado da caracterização classifica a amostra como uma argila arenosa (classificação ABNT) de baixa plasticidade e granulometria contínua. Os aspectos pedológicos na região classificam o solo como latossolo amarelo, observado pela classificação tátil visual, o qual apresenta uma coloração amarela alaranjada. A classificação unificada (SUCS) determinada a partir dos limites de consistência do solo classificam-no como ML – Silte de baixa plasticidade. Essa diferença verificada pelos métodos de classificação pode ser justificada pelo limite de liquidez estar tangenciando os limites entre ML e CL, na carta de plasticidade de Casagrande.

O resultado do ensaio de sedimentometria comparativa, relaciona a influência da dispersão nos solos, de forma tal a avaliar a relação dos efeitos da dispersão coloidal no solo e agregação do solo. O Gráfico 4 demonstra o efeito citado ao longo desse trabalho, descrevendo que, quando maior a distância entre as curvas granulométricas (com e sem defloculante), mais sentido é o efeito de desagregação apresentado por Camapum de Carvalho *et al.* (2015). Analogamente, quanto menor a distância entre as curvas, maior é a razão de dispersão desse solo. A amostra ensaiada apresentou um percentual de dispersão classificado como médio a médio-alto ($P_d = 25,2\%$), pelo uso da equação de Volk (1938).

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica – sedimentometria comparativa.



Fonte: Autor (2022).

Os efeitos dessa dispersão são detalhados pela Tabela 6. Nota-se o efeito do comparativo entre o ensaio sem o emprego de defloculante: a agregação do solo apresenta um comportamento arenoso, totalmente diferente do que é observado pela granulometria com o uso de defloculante. Nos processos erosivos, um solo com comportamento de areia siltosa tem maior facilidade ao destacamento do que uma argila arenosa, de maneira especial aos eventos de erosão superficial.

Tabela 6 – Distribuição granulométrica sedimentométrico comparativo.

Classificação Granulométrica ABNT	Granulometria com defloculante	Granulometria sem defloculante
Pedregulhos > 2,0mm (%)	5,7	5,7
Areia Média 0,20 a 0,60 mm (%)	3,4	3,4
Areia Fina 0,2 a 0,06 mm (%)	28,1	53,0
Silte 0,06 a 0,002 mm (%)	6,9	23,7
Argila < 0,002 mm (%)	55,9	14,3
D10 (mm)	-	0,004
D30 (mm)	-	0,026
D50 (mm)	-	0,073
D60 (mm)	0,036	0,068

Fonte: Autor (2022).

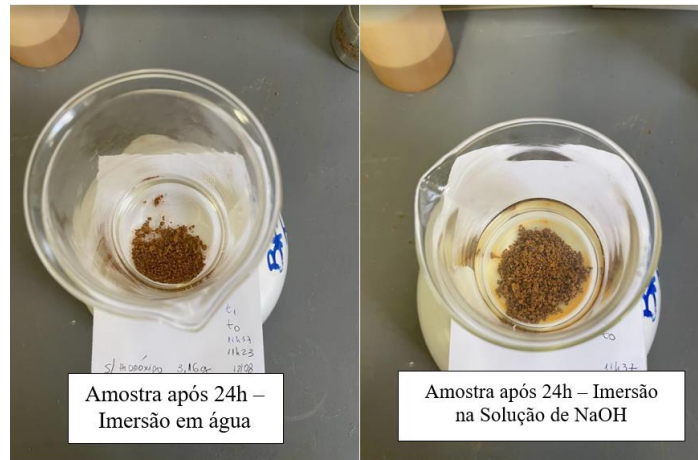
4.2 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

4.2.1 Ensaio de dispersão rápida (*Crumb test*)

O ensaio qualitativo de dispersão, *crumb test*, cujos resultados são apresentados pela Figura 34, demonstram uma reação muito baixa aos efeitos tanto na amostra com água, quanto na solução de NaOH, nos torrões ensaiados. A amostra que foi imersa no corpo d'água apresentou um grau de dispersão 1, enquanto a amostra imersa na solução de NaOH apresentou uma leve macha no fundo do recipiente, o classificando com o grau de dispersão 2. A avaliação dos ensaios de dispersão rápida atribui pesos às reações coloidais entre o solo e a solução. Como apresentado na caracterização geotécnica, a amostra ensaiada apresenta baixo índice de atividade coloidal, fazendo com que não seja observado tantos indícios de erodibilidade. Outro

fator que deve ser associado é a realização do ensaio com amostras sem secagem prévia, que são mais resistentes aos efeitos dispersivos do que amostras com umidade residual.

Figura 34 – Resultado dos ensaios de dispersão rápida (*Crumb test*).



Fonte: Autor (2022).

4.2.2 Ensaio de Desagregação

A verificação qualitativa dos efeitos da imersão parcial das amostras é cedida pela Figura 35 na imagem à esquerda, tem-se a figura da imersão parcial após o período de 20 minutos, onde é possível notar a saturação da amostra pelo efeito da capilaridade. Nessa primeira etapa o enchimento é feito apenas a 1/3 da altura da amostra, onde é possível notar a desagregação da base da amostra, descrita por Almeida (2014). Após o período de 24 horas a amostra apresenta desagregação parcial, mantendo a estrutura interna levemente fratura e sem a observação dos efeitos coloidais.

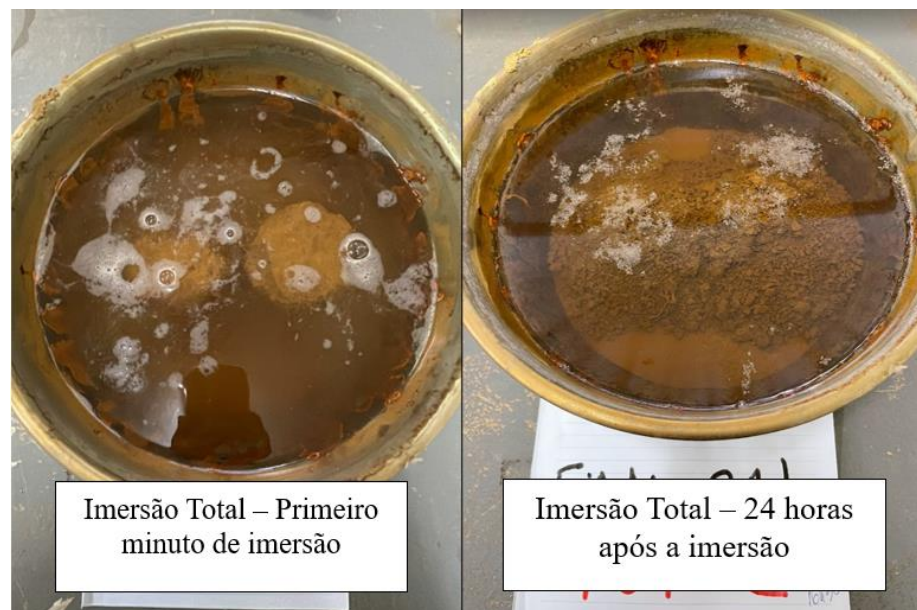
Figura 35 – Resultado dos ensaios de desagregação – Imersão Parcial.



Fonte: Autor (2022).

O ensaio de imersão total relaciona-se com os efeitos de saturação abrupta, levada ao estado de tensões em que a água, por meio da capacidade de sorção, expulsa as bolhas de ar abruptamente. O efeito citado pode ser observado na Figura 36, em que a expulsão das bolhas de ar é vista na superfície da água nos primeiros minutos de imersão. Em amostras que sofreram o processo de secagem, o processo de desestruturação e desagregação é rápido para esse ensaio, tão rápido quanto a inclinação do trecho de inflexão da curva de retenção (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Ao fim do período de 24 horas a amostras, pode-se observar que as amostras foram totalmente desagregadas.

Figura 36 – Resultado dos ensaios de desagregação – Imersão Total.



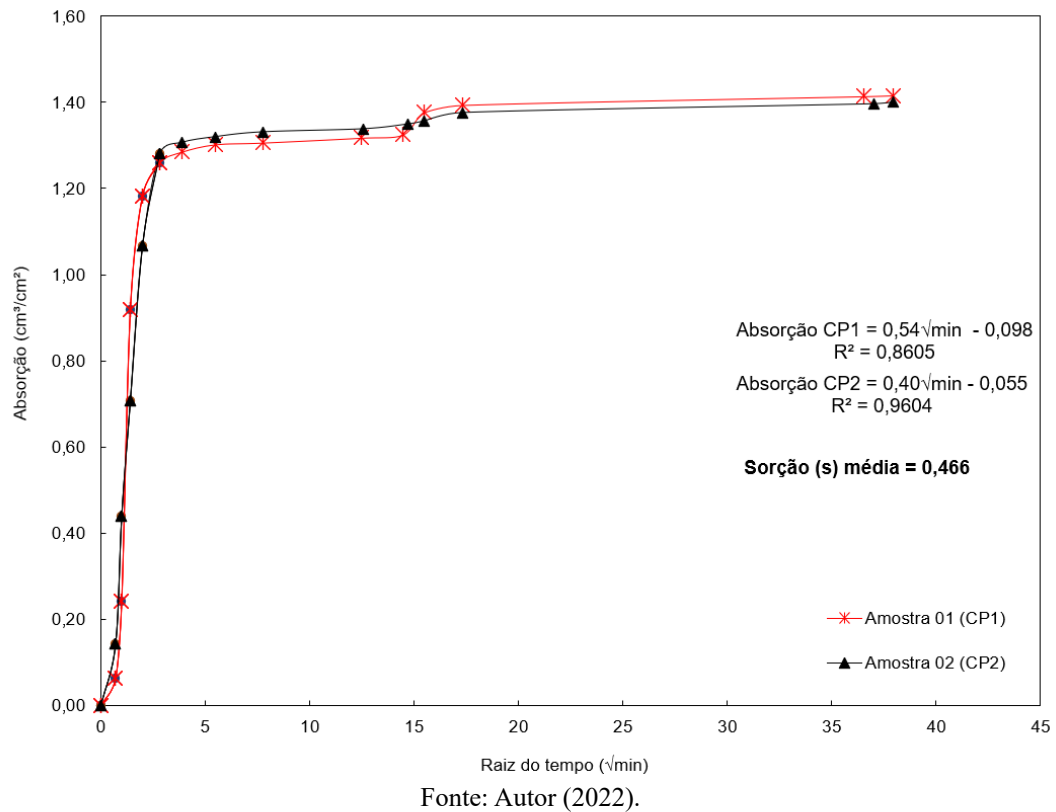
Fonte: Autor (2022).

4.2.3 Ensaio de infiltrabilidade

A avaliação das características de absorção do solo foi realizada pela execução do ensaio de infiltrabilidade. A relação entre a frente de saturação pela capilaridade é apresentada no Gráfico 5. As duas amostras (CP1 e CP2) apresentaram curvas similares de sorção. A determinação do coeficiente de sorção do solo foi realizada a partir da média ponderada entre os R^2 dos ângulos de inclinação do primeiro trecho da curva. O valor médio encontrado para a amostra foi de 0,466.

De modo geral, o valor encontrado, assim como a interpretação gráfica (dada a inclinação da curva), demonstra que o solo apresenta uma boa capacidade de sorção pela ação capilar.

Gráfico 5 – Resultado dos ensaios de infiltrabilidade – metodologia MCT.



4.2.4 Ensaio de erodibilidade específica (perda de massa por imersão)

As amostras submetidas à perda de massa por imersão – MCT pelo período de 24 horas são representadas pela Figura 37. Os corpos de provas para a realização do ensaio foram submetidos a um período de uma semana de secagem, colocando-os em um estado de umidade residual.

Deve-se observar as características de desprendimento do material durante o processo de imersão, onde o desprendimento do solo aconteceu de forma rápida, tão logo quanto o contado do solo com a água. Outra variável importante é classificar o formato do desprendimento, que, de modo geral, as amostras se desprenderam em frações médias de solos, com dimensões entre 2-5 mm, caracterizada possivelmente por uma distribuição de poros bimodal.

Figura 37 – Amostras dos ensaios de erodibilidade específica após a imersão de 24 horas.



Fonte: Autor (2022).

Os resultados quantitativos, em percentual de perda de massa das amostras são expressos na Tabela 7 , onde é claramente observada a influência da erosão hídrica do solo. Em especial, a Amostra 02 teve uma perda por imersão superior a 100%, representada pela formação de um sulco no corpo de prova. O valor médio entre as amostras foi de 96,89% (Pi).

Tabela 7– Resultado do ensaio de perda de massa por imersão.

Descrição	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Perda de Massa por imersão (Pi) (%)	97,48	103,04	90,14
Perda de Massa por imersão (Pi) – Média (%)	96,89		

Fonte: Autor (2022).

Correlacionando os resultados obtidos pelos ensaios de erodibilidade propostos pela metodologia MCT (ensaio de infiltrabilidade e perda de massa por imersão), obteve-se uma relação Pi/s de 207,92, muito superior ao limite especificado por Nogami e Villibor (1979), classificando-o como muito erodível.

4.3 CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO (SWCC) E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A construção da curva característica do solo foi determinada pelo método do papel filtro pela trajetória de secagem. Os resultados de teor de umidade do solo e dos valores de sucção matricial são apresentados na Tabela 8. O método do papel filtro foi utilizado principalmente pela ampla faixa de sucção que o modelo contempla.

Tabela 8 – Dados da curva característica do solo (SWCC).

Nº Anel	Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)
5	40,20	53,96	100,00	4,73
26	36,00	48,66	96,06	6,44
4	33,45	49,59	100,00	6,59
10	29,70	40,71	81,46	12,16
15	29,47	39,57	78,12	16,15
11	28,11	39,26	80,06	64,06
1	25,31	33,98	67,09	687,14
24	20,39	27,37	54,03	8310,15
14	17,48	23,47	46,34	11472,82
8	12,08	15,51	29,17	11798,07

Fonte: Autor (2022).

Os parâmetros de ajuste são apresentados na Tabela 9, cujo valores foram interpolados pelo software SWRC Fit com modelagem de Seki (2007) e Seki *et al.* (2022).

A curva de característica solo-água apresenta um comportamento bimodal, ajustado pela proposta de Durner (1994) com a combinação bimodal do modelo de Van Genuchten (1980), onde no trecho inicial verifica-se uma inflexão abrupta, referente a entrada de ar nos macroporos, relativa à fração de areia fina no solo, seguida de um trecho com inclinação mais suave, relativa à entrada de ar nos microporos do solo – indicada pela fração argilosa do solo.

Esse comportamento bimodal também foi observado por Benessiuti (2011), em amostras de solos residuais na região do Gomerai (região próxima da área de estudo).

Tabela 9 – Parâmetros de ajuste da curva característica solo-água pelo modelo de Van Genutchen (1980).

Parâmetro de ajuste	Valor
θ_s	0,56698
α_1	0,15477
n_1	4,5406
α_2	0,0011702
n_2	1,2267
w_1	0,31255
R^2	0,9561

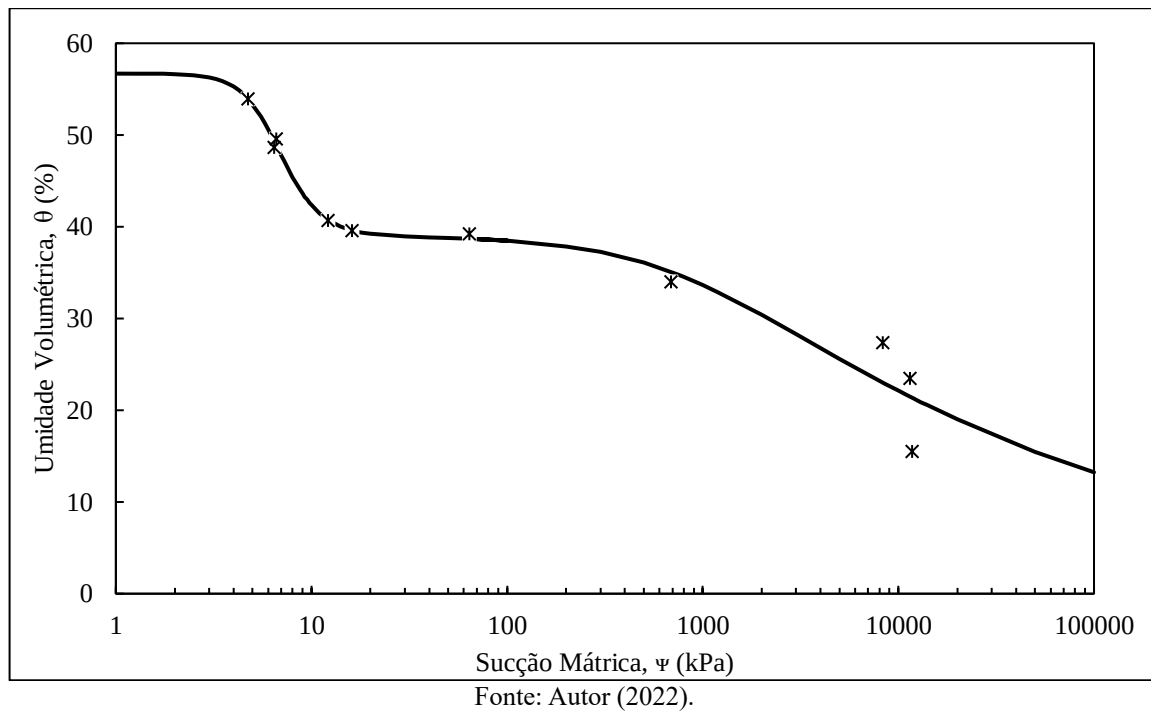
Fonte: Autor (2022).

Observa-se pelo comportamento da curva apresentada (Gráfico 6) que os macroporos regem o comportamento do trecho inicial da curva, quando se tem o registro da passagem de ar com o valor de pressão necessária para esvaziar os maiores poros da estrutura. Verifica-se também as baixas pressões de entrada de ar (sucção < 5 kPa), possibilitado pela alta porosidade do solo ($n > 40\%$), demonstrando maior facilidade de drenagem dos macroporos dos solos mesmo para baixos valores de sucção, conforme apresentado por Menezes (2010) e Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

O Gráfico 6 pode ser correlacionado com as observações de Camapum de Carvalho *et al.* (2014) para curvas bimodais em solos tropicais. A influência na distribuição dos poros em solos intemperizados associada a baixos valores de sucção na entrada de ar dos macroporos devem ser tomadas com atenção frente aos processos erosivos.

De modo geral, refere-se à influência da sucção no processo erosivo, a grosso modo, que na zona ativa suas variações exercerão grande influência na erosão superficial por gerar no processo de infiltração da água da chuva pressão positiva. Portanto, a curva de retenção para o solo estudado é caracterizada por baixo valor de entrada de ar nos macroporos, configurando, para a estabilidade e os processos erosivos superficiais, baixas resistências.

Gráfico 6 – Curva característica solo-água (SWCC) – Umidade volumétrica *versus* Sucção Matricial.



Os ensaios de compressão diametral foram executados nas mesmas amostras as quais foram realizadas a medição da sucção com o papel-filtro. Dessa forma, foi possível correlacionar os efeitos da sucção na resistência a tração do solo. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado dos ensaios de resistência à tração com variação de sucção

Nº Anel	Sucção Matricial (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Resistencia à tração σ_t (kPa)
4	6,59	49,59	2,58
5	4,73	53,96	2,83
15	16,15	39,57	4,12
26	6,44	48,66	4,12
10	12,16	40,71	6,18
11	64,06	39,26	10,82
1	687,14	33,98	12,88
14	11472,82	23,47	26,27
8	11798,07	15,51	33,48

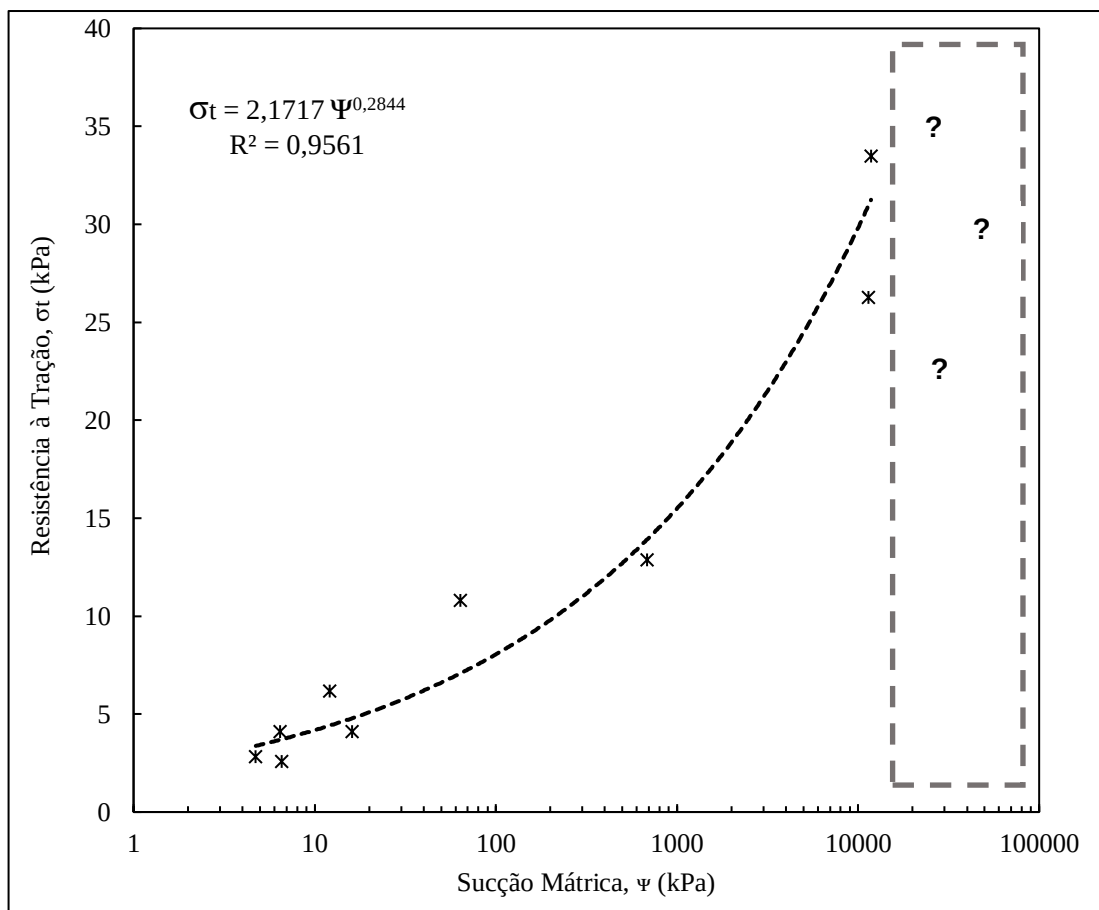
Fonte: Autor (2022).

De modo geral, o efeito do aumento da sucção representou no aumento da resistência à tração nos solos, conforme dados plotados no Gráfico 7.

A resistência a tração apresentou um comportamento exponencial com a variação da sucção. De modo geral, as amostras podem apresentar duas conformações: (i.) têm-se o incremento da resistência a tração em uma relação diretamente proporcional ao aumento da sucção; ou (ii.) a amostra apresenta um aumento da resistência a tração com o aumento da sucção, porém a partir de determinados valores de sucção a resistência decresce abruptamente. Essas duas conformações podem ser vistas nos trabalhos de Benessiti (2011), Araujo e De Campos (2013), Nacinovic (2013), Motta (2016), e Gomes e Motta (2022).

Apesar do comportamento exponencial crescente, não é possível classificar o solo com o comportamento descrito pela conformação (i.) do item anterior, já que as amostras não foram submetidas a teores de saturação menor ou igual a residual. Souza *et al.* (2018) avaliou o comportamento de amostra da região do Gomerl, próxima a área de estudo, e constatou o ganho de resistência a tração para umidades residuais do solo.

Gráfico 7 – Resistência à tração *versus* Sucção Matricial.



Fonte: Autor (2022).

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE AVALIAÇÃO

A Tabela 11 apresenta um compilado geral de todos os modelos de avaliação da susceptibilidade à erosão abordados ao longo desse trabalho, classificando-os quanto ao tipo de avaliação (direta ou indireta), ao emprego do método de avaliação. Apresenta-se um resumo com principais parâmetros de erodibilidade estudados e os correlaciona com os critérios de avaliação.

Tabela 11– Resultado dos modelos de avaliação de erodibilidade – diretos e indiretos.

Tipo	Método	Modelo de Avaliação	Parâmetro	Avaliação à erodibilidade
Indireta	Caracterização Geotécnica	Bouyoucos (1935) e Manning <i>et al.</i> (2002)	Fator de Erodibilidade $K = 0,006$	Baixa erodibilidade
		Santos (1953)	% Passante pela peneira #40 = 91,0	Comportamento regular ou bom
		Gray e Leiser (1989)	Solo ML - Silte de baixa plasticidade	Muito erodível
		Santos e Castro (1967)	LP = 33,2% e IP = 17,0%	Comportamento regular ou bom
		Santos (2001)	IP = 17,0%	Boa resistência à erodibilidade
		Wishcmeier e Mannering (1969)	$K = 0,025$	Erodibilidade média
		Molinero Junior <i>et al.</i> (2011)	LP = 33,2% e IP = 17,0%	Erodibilidade Média a Alta
Direta	Qualitativo	Crumb Test	Grau 1 a Grau 2 de dispersibilidade	Baixa erodibilidade
		Ensaio de desagregação	Desagregação total, destacamento total do material, sem aumento de turbidez da água	Erodibilidade média a alta
	Quantitativo	Sedimentometria Comparativa (SCS)	Percentual de Dispersão (Pd) = 25,7%.	Erodibilidade média a alta
	Quantitativo - MCT	Ensaio de Infiltrabilidade	Erodibilidade Específica (MCT) – $Pi/s = 207,92$.	Muito erodível
		Ensaio de Perda de Massa Específica		

Fonte: Autor (2022).

Constatou-se que de modo geral o solo apresenta tendência ao comportamento erosivo, em especial à erosão hídrica, objeto de estudo da classificação direta pela metodologia MCT. Dentre os ensaios indiretos, que classificam a erodibilidade a partir dos índices físicos, apenas três tiveram os mesmos resultados dos métodos diretos. Bastos (1999) e Couto (2020) avaliaram e compararam essas metodologias e constataram resultados similares, de modo geral os métodos indiretos não correlacionam o comportamento do solo com as características não saturadas e o fenômeno da histerese. Apresentando em seus modelos limitações, requerendo cuidado quanto às suas utilizações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÃO

A erodibilidade apresenta correlações com diversas propriedades dos solos – os atributos físicos, granulométricos, textura e mineralógicos – sendo representada como a propriedade mais complexa que regula o processo erosivos. Outro fator determinante na classificação da erodibilidade é a contribuição da natureza, como o clima, pluviometria e a cobertura vegetal. Sobretudo em regiões tropicais, os processos erosivos iniciam-se em solos não saturados, e somente quando em estados avançados, atingem a região saturada, dessa forma é necessária a compreensão desse fenômeno no estudo de erodibilidade.

A contextualização geológica-geotécnica da região associada a revisão bibliográfica caracteriza a região pelo alto índice de eventos de movimentação de massa advindo dos processos erosivos, além da intensa ação antrópica na região, os efeitos de secagem e umedecimento, decorrentes das sucessivas inundações da bacia, que favorecem a degradação e desagregação dos solos, aumentando a sua susceptibilidade aos eventos erosivos.

Os modelos de avaliação indireta dos fatores de erodibilidade apresentam formas simplificadas na avaliação inicial do tema. De modo, geral as correlações entre a caracterização geotécnica com os modelos apresentados na bibliografia para o solo estudado não obtiveram boa aderência. Com exceção aos modelos de Gray e Leiser (1989) e Molinero Junior *et al.* (2011), as demais avaliações classificaram o solo estudado como pouco erodível. Em geral, essas classificações não consideram alguns efeitos associados aos solos não saturados, objeto desse trabalho. Oliveira e Araujo (2018) declaram que os diferentes modelos de classificação indireta a partir das caracterizações geotécnicas apresentam limitações e requerem muito cuidado quanto a sua utilização, devendo sempre associar essas avaliações com as observações de campo e ensaios específicos para avaliação direta da erodibilidade.

Os ensaios de avaliação qualitativa da erodibilidade para a amostra da área de estudo, apresentaram classificações diretas que associam o solo com um grau de média a média-alta susceptibilidade a erosão hídrica. De modo geral, os resultados convergiram em relacionar a um grau de resistência baixo à erosão da amostra com os eventos de erosão hídrica da região.

A proposta apresentada pelo ensaio de sedimentometria comparativa é de que o grau de dispersão do solo está diretamente relacionado com a dispersibilidade das argilas. A amostra em questão apresentou um grau de dispersão de 25,7%, considerado um grau alto pela proposta de Volk (1932). O resultado converge em relacionar tal efeito com a agregação da amostra, em

que, apesar da fração argilosa presente no solo (caracterizada no ensaio de granulometria por sedimentação) a água por si só não é capaz de quebrar a ligação entre a fração fina do solo que revestem as areias, gerando, portanto, uma maior dispersibilidade na amostra.

A metodologia de avaliação de erodibilidade proposta por Nogami e Villibor (1994) pelo método MCT, propõe a determinação quantitativa da susceptibilidade à erosão em solos tropicais frente aos eventos hidráulicos. As amostras frente a essa metodologia demonstraram um comportamento de alta erodibilidade quando submetidos à imersão. Deve-se avaliar também os conceitos de solo não saturados, no qual a mudança abrupta do estado de pressões nos poros ocasiona o desprendimento rápido das partículas, principalmente em solos com curvas de retenção bimodal.

A curva característica solo-água da área de estudo apresenta um comportamento bimodal, no qual verifica-se um primeiro trecho, relativo aos macroporos do solo (contado das partículas grossas do solo), com inclinação acentuada, característica de solos arenosos, e um segundo trecho com inclinação mais suave, característica de solos argilosos. Durante os ensaios na qual solos eram imersos em água, nas amostras submetidas a secagem, foi observado o desprendimento rápido do solo em frações relativas às macro partículas, cuja correlação pode ser feita com o primeiro trecho da curva característica solo-água do solo.

A avaliação do comportamento sob os efeitos do teor de saturação do solo à resistência a tração levou a uma relação exponencial crescente da sucção e da tração. Giritana *et al.* (2015) apresenta a resistência a tração em solos não saturados como a principal resistência quanto as erosões superficiais. Porém o estudo não contemplou o comportamento de resistência para teores de saturação superior a residual.

O solo estudado, nas condições indeformadas de campo apresentou comportamento de média a alta susceptibilidade a erodibilidade, ou seja, baixa resistência aos processos erosivos hídricos. Os resultados das avaliações diretas e indiretas convergiram em categorizar o solo como pouco resistente as erosões hídricas superficiais. Nacinovic (2013) apresentou a relação direta entre a perda de massa e o grau de saturação nos solos, demonstrando um comportamento inversamente proporcional (quanto maior a perda de massa, menor o grau de saturação), o mesmo efeito foi observado (de modo qualitativo) na série de ensaios realizados.

5.2 SUGESTÕES

Ao longo do estudo foram verificadas necessidades e frentes de pesquisas para o aprofundamento do tema perante a revisão bibliográfica. Algumas dessas frentes são apresentadas a seguir:

- Determinação da curva de histerese do solo: Benessiuti (2011) verificou a contribuição da histerese em solos da região de Guaratinguetá afetando diretamente a susceptibilidade do solo à erosão.
- Avaliação da tensão hidráulica crítica: desenvolvimento do equipamento Inderbitzen para avaliação do comportamento de perda de massa frente ao fluxo hidráulico com variação de inclinação.
- Entendimento da resistência ao cisalhamento com sucção controlada: de acordo com Bastos (1999) a resistência ao cisalhamento é classificada como um dos fatores determinantes para o estudo da erodibilidade, nos processos que envolvem o destacamento dos solos. De Campos e Motta (2015) apresentam a importância da sucção no estado de tensões efetiva dos solos não saturados, alterando a envoltória de resistência ao cisalhamento dos solos.
- Monitoramento das áreas frente aos ciclos de chuva: criação de células de controle do monitoramento para entendimento do comportamento *in situ* do solo após os períodos de chuva na região.
- Caracterização da condutibilidade hidráulica do solo: o coeficiente de permeabilidade é um importante fator na susceptibilidade dos solos aos eventos erosivo (Bicalho *et al.* (2015) e Mascarenha *et al.* (2015)). Dessa forma, o seu parâmetro deve ser mensurado. Os ensaios de medição em campo refletem as características mais fiéis da estrutura do solo, de modo especial o ensaio de permeabilidade Guelph tem grande aceitação no meio para essas determinações.
- Avaliação da erodibilidade da amostra nas condições compactadas: Mascarenha *et al.* (2015) apresenta que, o comportamento de solos compactados frente a erosão conferem situações contraditórias, já que o efeito da compactação por uma lado aumenta a resistência do solo ao cisalhamento, porém por outro lado diminui o índice de vazios do solo, aumentando o escoamento superficial, devendo ser analisado a contribuição da compactação na avaliação de erodibilidade.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984b.
- AHMED, C. R. M. **Fatores que influenciam a erodibilidade nos solos do município de Campos Dos Goytacazes- RJ**: sob uma análise multicritério. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual no Norte Fluminense (UENF), Campo dos Goytacazes, 2009.
- ALMEIDA, J. G. R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia 2014.
- ARAÚJO, R. C.; DE CAMPOS, T. M. P. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **Geotecnia**, Lisboa, n. 128, p. 67-85, jul. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5298 – 16**: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia, ASTM, 2016.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1999.
- BENESSIUTI, M. F. **Estudo dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaiss da bacia do Ribeirão Guaratinguetá**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2011.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, N. F. **Conservação do Solo**. 9. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2014. 355p.
- BOUYOUCOS, G. W. The clay ratio as a criterion as susceptibility of soils to erosion. **Journal of the american society of agronomy**, Madison, v. 27, p. 738-741, 1935.
- BICALHO, K. V. *et al.* Condutibilidade hídrica e fluxo em solos não saturados. *In*: CAMAPUAM DE CARVALHO *et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 297-320.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* A sucção no contexto dos processos erosivos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 43., 2014, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2014.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. 763 p.

CAMPOS, A. C. S. L. **Características de compressibilidade de uma argila mole da zona industrial de Santa Cruz, Rio Janeiro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Centro Técnico Científico – Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), Rio de Janeiro. 2006.

CAVALCANTE, A. L. B *et al.* Tomografia computadorizada e análises numéricas aplicadas à caracterização da estrutura porosa de solos não saturados. *In: CAMAPUM DE CARVALHO et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 531-551.

CHALES, W. W.; MENZIES, B. **Advanced unsaturated soil mechanics and engineering**. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007. 690 p.

COUTO, B. O. C. **Estudo de erodibilidade em horizontes de taludes de corte rodoviário por meio de procedimentos de laboratório e de campo, Rio Janeiro**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto. 2020.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J.S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Solos e rochas**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 77-91, 1993.

DAVIES, S *et al.* Identifying dispersive soils. **Farmnote – Departament of agriculture and food**, n. 386, nov. 2009.

DE CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. *In: CAMAPUM DE CARVALHO et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 465-493.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soil with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211-223, 1994.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos solos: introdução à engenharia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. v. 2. 576p.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos solos: introdução à engenharia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. v. 1. 439p.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **American society of civil engineers**: Journal of the geotechnical engineering division, v. 103, n. GT5, p. 447-466, 1977

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, INC, 1993. 544p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian geotechnical journal**, Ottawa, v. 31, n. 4, p. 699-706, 1994.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from watertable. **Soil Science**, Philadelphia, n.85(4), p. 228-232, 1958.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3rd, 2002, Recife. **Anais [...]**. Recife: UNSAT, 2002, v. 1, p. 295-300.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N *et al.* A curva de retenção de água de materiais porosos. *In*: CAMAPUAM DE CARVALHO *et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 205-227.

GOMES, F. S.; MOTTA, M. F. B. Influência de adição de fibras de coco na resistência à tração de um solo compactado não saturado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2022.

GRAY, D.H.; LEISER, A.T. **Biotechnical slope protection and erosion control**. Malabar: Krieger publishing company. 1989. 288p.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. 3rd ed. London: John Wiley & Sons, 2011. Vol. 2. 499p.

MANNINGEL, A.R. *et al.* Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1994. p. 515-522.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1997. p. 373-397.

MARINHO, F.A.M. Nature of the soil-water characteristic curves for plastic soils. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, Reston, n. 131, p. 654-66, 2005.

MARINHO, F. A. M *et al.* Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. *In*: CAMAPUAM DE CARVALHO *et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 231-254.

MASCARENHA, M. M. A *et al.* Erosão. *In*: CAMAPUAM DE CARVALHO *et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 581-609.

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 288p.

MENEZES, M.B.M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2010.

MOLINERO JUNIOR, J. A. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2011.

MOTTA, M. F. B. **Caracterização físico-hídrico-estrutural e efeito do aumento da pressão do ar na resistência de solos tropicais não saturados**. 2016. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Centro Técnico Científico – Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), Rio de Janeiro. 2016.

NACINOVIC, M. G. G. **Avaliação de erosão hídrica superficial em parcelas experimentais**. 2013. Tese (Doutorado em Geotecnia) – COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.

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**, Krefeld, n. 19, p. 196-199, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1., 1981, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica. 1981.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLO E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 1994. p. 1293-1300.

OLIVEIRA, F. F.; ARAUJO, R. C. Uso de parâmetros geotécnicos como indicadores da erodibilidade de solos. **Geotecnia**, Lisboa, n. 142, p. 63-75, 2018.

PASCOTO, T. V. **Análises fatorial e de componentes principais aplicadas ao estudo dos fatores influenciadores de processos erosivos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2020.

PINHEIRO, R. J. B. *et al.* Erodibilidade obtida por métodos indiretos e diretos de uma voçoroca localizada na região oeste do estado do Rio Grande do Sul - Brasil. **Geotecnia**, Lisboa, n. 154, p. 22-46, 2022.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000, 247p.

PORTO *et al.* Erodibilidade do Solo: Correlações entre a metodologia MCT e suas propriedades físico/químicas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2018.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçoramento próximo a UHE de Itumbiara - GO**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Centro Técnico Científico – Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), Rio de Janeiro. 2003.

ROSSETTI, R. B. **Identificação de áreas de risco na região urbana do município de Guaratinguetá, SP, quanto à ocorrência de inundações e processos erosivos**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2011.

SAAB, A. L. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2016.

SANTOS, M. P. P. A new soil constant and its applications. *In: International conference on soil mechanics and foundation engineering*, 3rd., 1953, Zurique. **Proceedings [...]**. Zurique: Nature v. 1, n. 157, 1953.

SANTOS, M. P. P. ; CASTRO, E. Estudo sobre erosão em taludes de estradas. **2º Jornal luso brasileiro de engenharia civil**, São Paulo, 1967.

SANTOS, C. A. **Comportamento hidrológico superficial, subsuperficial e a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto – Minas Gerais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2001.

SANTOS, C. M. Z. **Metodologia para a caracterização de áreas com potenciais de erosão na fazenda Santa Edwirges, Lorena, SP**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2006.

SATYANAGA, A. *et al.* Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution. **Computers and geotechnics**, Banking, n. 48, p. 51-61, 2013.

SEKI, K. SWRC fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and earth system sciences discussions**, Gottingen, n. 4, p. 407-437, 2007.

SEKI, K. *et al.* Closed-form hydraulic conductivity equations for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. **Vadose zone journal**, Madison, v. 21, n. 20168, 2022.

SHERARD, J. L. *et al.* Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the geotechnical engineering division ASCE**, New York, v. 102, n. GT4, p. 287-301, 1976.

SILVEIRA, M. A. A. *et al.* Estudos da dispersão de solos argilosos através dos ensaios químicos e de dispersão rápida. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 1974, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 1974.

SOARES, P. V. **As Interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção Paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2005. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Campinas (UNICAMP), Campinas, 2005.

SOUZA, J. D. *et al.* Estudo da erodibilidade de um solo do bairro do Gomerál, Guaratinguetá. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2018.

STEINMETZ, S. *et al.* **Plano municipal de conservação e recuperação da mata Atlântica de Guaratinguetá, SP**. Guaratinguetá: Prefeitura Municipal de Guaratinguetá, 2020. 91p.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of american journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VETTORELO, D.L.; MARINHO, Evaluation of time response of GMS for soil suction measurement. *In*: PANAMERICA UNSAT, 2021, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2021.

VILLAR, L. F. S *et al.* Compactação dos solos: laboratório e campo. *In*: CAMAPUAM DE CARVALHO *et al.* (coord.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 257-296.

VOLK, G. M. Method of determination of the degree of dispersion of the clay fraction of soils. **Soil science society of american journal**, Madison, 1938.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. A. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil s**