



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
INFRAESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

FLAVIANY LUISE NOGUEIRA DE SOUSA

**ELETROQUÍMICA COLOIDAL E SUA RELAÇÃO COM A SENSIBILIDADE DE UM
SOLO ARGILOSO NA FOZ DO RIO AMAZONAS**

Tucuruí - PA

2023

FLAVIANY LUISE NOGUEIRA DE SOUSA

**ELETROQUÍMICA COLOIDAL E SUA RELAÇÃO COM A SENSIBILIDADE DE UM
SOLO ARGILOSO NA FOZ DO RIO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

Tucuruí - PA

2023

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

S725e Sousa, Flaviany Luise Nogueira de.
Eletroquímica coloidal e sua relação com a sensibilidade
de um solo argiloso na foz do Rio Amazonas / Flaviany Luise
Nogueira de Sousa. — 2023.
90 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2023.

1. Argila. 2. Sensibilidade. 3. Potencial Zeta. 4.
Capacidade de Troca Catiônica. 5. Sedimentos
fluviomarinhos. I. Título.

CDD 624

FLAVIANY LUISE NOGUEIRA DE SOUSA

**ELETROQUÍMICA COLOIDAL E SUA RELAÇÃO COM A SENSIBILIDADE DE UM
SOLO ARGILOSO NA FOZ DO RIO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

Aprovada em 29 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 MARCELO RASSY TEIXEIRA
Data: 03/07/2023 14:24:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira / UFPA – Orientador

Documento assinado digitalmente
 LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 03/07/2023 14:17:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro / UFPA – Membro interno

Documento assinado digitalmente
 ALAN CAVALCANTI DA CUNHA
Data: 03/07/2023 12:19:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha / UNIFAP – Membro externo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que me manteve de pé nos momentos mais difíceis e me permitiu ultrapassar todos os obstáculos que eu jamais achei que fosse superar.

Ao meu orientador, prof. Dr. Marcelo, por compartilhar conhecimento, ter tido paciência e ter me auxiliado nessa caminhada árdua da minha primeira pós-graduação.

À minha querida professora, Prof^a. Dr^a. Núria Gallardo, que me encorajou a não desistir, sendo amiga e conselheira em todas as áreas da minha vida.

Ao meu professor da graduação de engenharia, Prof. Dr. Antonio Nascimento, pelo auxílio no início desta pesquisa, que expandiu minha mente para que pudesse me aprofundar no tema.

Ao meu colega da Pós, engenheiro Vitor Vinicius Rodrigues de Matos, pelo apoio e momentos de descontração desenvolvidos durante os trabalhos avaliativos.

Ao programa PPGINDE e a todos os professores e técnicos que contribuem regularmente para a execução desse mestrado no sudeste paraense.

E a todos aqueles com quem convivi ao longo desses dois anos de curso, que me incentivaram e me permitiram fazer parte de suas vidas.

“Nosso maior medo não é de sermos inadequados. Nosso maior medo é de sermos poderosos além da conta. É a nossa própria luz, não a nossa escuridão, que nos amedronta.”

Nelson Mandela

RESUMO

As argilas, na história das civilizações, sempre tiveram um papel importante, principalmente por serem um recurso mineral com variadas aplicações tecnológicas. Dentre os vários tipos existentes, as argilas sensíveis (*quick clays*), por exemplo, são solos moles muito complexos, sendo considerados verdadeiros desafios para engenheiros em função das dificuldades para se obter seus parâmetros geotécnicos. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo analisar a sensibilidade de um solo argiloso, localizado numa região da cidade de Santana, no estado do Amapá. Para tal, foram realizados ensaios físicos e químicos, incluindo SPT (*Standard Penetration Test*), Difratomia de raios-X (DRX), potencial Zeta (ζ), pH, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e ensaios de resistência (*Vane Test* e *Fall Cone Test – FCT*). A área analisada se encontra na Planície Fluviomarina Macapá, a qual é composta por sedimentos que foram depositados tanto por rios, quanto pelo mar, visto a região estar próxima da foz do Rio Amazonas. O perfil geológico obtido com a investigação geotécnica indicou que o solo é constituído por sedimentos argilo-arenosos mosqueados, argilo-siltosos com restos vegetais e argilo-siltosos com pedregulhos. Quanto a mineralogia das amostras, estas são compostas, essencialmente, por quartzo e por três argilominerais: a caulinita, mica/ilita e clorita. No que se refere a sensibilidade, todas as amostras foram classificadas como argilas sensíveis, apresentando média ou alta quantidade de matéria orgânica (M.O.), do qual se constatou o aumento da sensibilidade a partir do aumento da matéria orgânica. Além disso, compreendeu-se que houve um aumento da intensidade da sensibilidade da argila a partir do aumento dos cátions monovalentes e diminuição dos cátions divalentes como o Ca^{2+} e Mg^{2+} , os quais devem ter sido removidos pela M.O. A leitura do pH do solo variou entre acidez alta a muito alta, classificação já esperada em função da elevação da concentração de H^+ devido a M.O. Basicamente, todas as amostras apresentaram valores de ζ próximos, sendo os menores valores 31,3mV e 33,2mV, ainda, assim, considerados altos, indicando que os coloides do solo estão se repelindo, formando uma estrutura dispersa. Destarte, os resultados encontrados foram consistentes com outros semelhantes na literatura, porém, reforça-se a necessidade de estudos regionalizados para melhor entendimento das peculiaridades locais capazes de influenciar no perfil deste solo.

Palavras-chave: Argila. Sensibilidade. Potencial Zeta. Capacidade de Troca Catiônica; Sedimentos fluviomarinhos.

COLLOIDAL ELECTROCHEMISTRY AND ITS RELATIONSHIP WITH THE SENSITIVITY OF A CLAY SOIL AT THE MOUTH OF THE AMAZON RIVER

ABSTRACT

Clays have always played an important role in the history of civilizations, mainly because they are a mineral resource with varied technological applications. Among the several existing types, sensitive clays (quick clays), for example, are very complex soft soils that are considered real challenges for engineers due to the difficulty in obtaining their geotechnical parameters. In this sense, the aim of the present study was to analyze the sensitivity of a clay soil found in a region of the city of Santana, in the state of Amapá, Brazil. To this end, physical and chemical tests were carried out, including the SPT (Standard Penetration Test), X-Ray Diffraction (XRD), Zeta Potential (ζ), pH, Cation Exchange Capacity (CEC), as well as resistance assays (Vane Test and Fall Cone Test – FCT). The analyzed area is located in the Macapá Fluvio-marine Plain, which is composed of sediments that were deposited both by rivers and by the sea as a result of the region's proximity to the mouth of the Amazon River. The geological profile obtained through geotechnical investigation indicated that the soil is constituted of mottled sandy-clay sediments, sandy-silty sediments with plant remains, and sandy-silty sediments with pebbles. As for the mineralogy of the samples, they were essentially composed of quartz and three clay minerals: kaolinite, mica/illite, and chlorite. Regarding sensitivity, all samples were classified as quick clays, with medium or high amounts of organic matter (O.M.); greater organic matter content was associated with increased sensitivity. In addition, it was understood that the intensity of clay sensitivity was higher with the increase in monovalent cations and the decrease in divalent cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} , which must have been removed by the O.M. The soil pH reading ranged from high to very high acidity, an expected classification due to the increase in H^+ concentration due to the O.M. All samples showed similar ζ values, with the lowest being 31.3 mV and 33.2 mV, which are still considered high, indicating that the soil colloids repel each other, forming a dispersed structure. Our results were consistent with similar reports in the literature; however, regionalized studies are necessary for a better understanding of the local peculiarities capable of influencing the profile of this soil.

Keywords: Clay. Sensitivity. Zeta Potential. Cation Exchange Capacity. fluvio-marine Sediments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da aplicação do método PICOC.....	18
Figura 2 – Estratégia de busca adotada.....	20
Figura 3 – Processo de triagem.	22
Figura 4 – Resultados da inserção das strings na base de dados da Scopus.	23
Figura 5 – Representação de tetraedro e octaedro: a) tetraedro [SiO ₄]; b) folha do tetraedro em arranjo hexagonal; c) octaedro [M(OH) ₆]; d) folha do octaedro em arranjo hexagonal.	26
Figura 6 – Representação gráfica de argilominerais: a) Estrutura da caulinita; b) Estrutura da illita; c) Estrutura da esmectita (montmorilonita).	28
Figura 7 – Representação da atração de moléculas da dupla camada difusa da água em meio as partículas de argila.....	31
Figura 8 – Composição de partícula da esmectita (à esquerda) e da caulinita (à direita).	32
Figura 9 – Arranjo estrutural das argilas.....	33
Figura 10 – Ligações entre partículas de argila: a) Ligação face à face; b) Ligação face-aresta.....	34
Figura 11 – Migração de íons idealizada no sistema de solo-solução	37
Figura 12 – Parâmetro de valores de ζ definidos pela Malvern (2013).	38
Figura 13 – Troca de cátions entre partícula de argila e uma planta.	42
Figura 14 – Comportamento de solos tixotrópicos ao longo do tempo: a) Solo tixotrópico; b) Solo parcialmente tixotrópico.	48
Figura 15 – Representação da retenção ou lixiviação de nutrientes a partir da CTC do solo.	51
Figura 16 – Processo de intemperismo físico.....	53
Figura 17 – Classificação do método quanto aos tipos de pesquisa.	55
Figura 18 – Região de Santana-AP: a) Comunidade ribeirinha; b) Estaleiro nas águas entorno do município.....	56
Figura 19 – Localização do município de Santana-AP e pontos de extração de amostras.	57
Figura 20 – Detalhamento geológico do município de Santana - AP.....	58
Figura 21 – Esquema de execução de ensaio de SPT.....	59
Figura 22 – Conjunto de amostras (55 intervalos de testemunhos).....	60

Figura 23 – Difratoômetro modelo Empyrean.....	61
Figura 24 – Esquema do eletrodo para averiguação do potencial Zeta.....	62
Figura 25 – Ilustração do ensaio de Palheta.	64
Figura 26 – Ensaio de cone de queda livre.	65
Figura 27 – Perfil geológico das ilhas de investigação do subsolo.	67
Figura 28 – Camada argilo-arenosa do perfil do solo: a) amostrador SPT; b) solo misto; c) solo amarelado.	68
Figura 29 – Texturas da camada argilo-siltosa com matéria orgânica: a) amostrador SPT; b) retalho de madeira; c) amostra com fragmento vegetal; d) retalho de madeira com orientação contrária aos sedimentos.	68
Figura 30 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 1, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados os picos: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato), Hem (hematita) e Sd (siderita).....	70
Figura 31 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 2, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados apenas os picos principais (mais intensos) de cada fase: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato) e Sd (Siderita).....	70
Figura 32 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 3A, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados apenas os picos principais (mais intensos) de cada fase: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato) e Sd (Siderita).....	70
Figura 33 – Relação entre a matéria orgânica e a sensibilidade.	73
Figura 34 – Relação entre a matéria orgânica e a resistência remoldada (Sur).	74
Figura 35 – Relação entre a sensibilidade e a soma dos cátions monovalentes (Na ⁺ e K ⁺),.....	75
Figura 36 – Relação entre a sensibilidade, soma de bases (SB) e a Matéria Orgânica.	76
Figura 37 – Relação entre a sensibilidade e o pH.	77
Figura 38 – Relação entre sensibilidade (ensaio Vane Test) e potencial Zeta.	78
Figura 39 – Relação entre sensibilidade (ensaio Fall Cone Test) e potencial Zeta...78	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Obras arbitrárias que não seguiram o espaço temporal definido.	24
Tabela 2 – Classificação da sensibilidade.....	46
Tabela 3 – Resultados de sensibilidade para amostras indeformadas ($S_{u_{un}}$) e amolgadas ($S_{u_{re}}$).....	49
Tabela 4 – Classes de acidez do solo.	54
Tabela 5 – Coordenadas e profundidade dos furos de sondagem.	60
Tabela 6 – Classificação da CTC para solos amazônicos.....	63
Tabela 7 – Valores de Matéria Orgânica.	64
Tabela 8 – Valores de sensibilidade.....	65
Tabela 9 – Composição química da camada argilo-siltosa com restos vegetais.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Justificativa	14
1.2.	Objetivos	16
1.2.1.	Objetivo geral	16
1.2.2.	Objetivos específicos.....	16
1.3.	Estrutura da dissertação	16
2	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	17
2.1.	Definição das questões de pesquisa	17
2.2.	Definição das bases e dos termos de busca	19
2.3.	Seleção das publicações identificadas (triagem)	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1.	Caracterização geral mineralógica das argilas	25
3.1.1.	Elementos formadores dos argilominerais	25
3.1.2.	Interferência das cargas elétricas no comportamento de argilas	29
3.1.3.	Arranjo das partículas de argila	33
3.2.	Aspectos das propriedades eletroquímicas e químicas dos solos	35
3.2.1.	Potencial Zeta (ζ).....	35
3.2.2.	Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	41
3.3.	Sensibilidade das argilas	45
3.3.1.	Tixotropia.....	48
3.3.2.	Lixiviação.....	50
3.3.3.	Intemperismo.....	52
3.3.4.	Interferência do potencial Hidrogeniônico (pH)	53
4	PERCURSO METODOLÓGICO	55
4.1.	Classificação da pesquisa	55
4.2.	Área de estudo	56
4.3.	Ensaio realizados	59
4.3.1.	Ensaio de Penetração Padrão (SPT).....	59
4.3.2.	Difratometria de Raios-X (DRX).....	61
4.3.3.	Potencial Zeta.....	62
4.3.4.	Análises químicas e de parâmetros físico-químicos	63
4.3.5.	Ensaio de resistência e sensibilidade	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1.	Análise do perfil geológico	66
5.2.	Análise mineralógica pela difratometria de raios-X	69
5.3.	Análises químicas e de parâmetros físico-químicos	73
6	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Na história das civilizações, as argilas sempre tiveram um papel importante e, nas sociedades atuais, continuam com seu destaque em função de serem um recurso mineral com variadas aplicações tecnológicas. Na indústria, o uso das argilas engloba processos como manufatura de materiais de construção, de catalisadores e adsorventes, de cerâmica artística, concepção de produtos farmacêuticos e cosméticos (PEREIRA *et al.*, 2020), entre tantos outros.

As argilas também têm uma participação notável no que se refere aos processos no meio ambiente, com ênfase para aqueles que ocorrem nos solos, possibilitando, por exemplo, a contenção de nutrientes para plantas. Além da abundância mineral encontrada em solos argilosos, outros fatores que contribuem para a aplicação diversificada comentada anteriormente, diz respeito as propriedades físico-químicas particulares de suas superfícies.

Essas características ímpares do solo argiloso envolvem o estudo dos coloides, que são considerados partículas de tamanho reduzido (entre 10^{-4} e 10^{-7} cm) que possuem uma superfície eletricamente carregada sendo representados, principalmente, pelas argilas minerais, substâncias húmicas e os óxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2010).

Por volta do século XIX, cientistas iniciaram suas buscas para tentar entender o comportamento coloidal da matéria que, na época, era basicamente descritivo, consolidando-se, mais tarde, como ciência, em virtude dos avanços da tecnologia, especialmente com o desenvolvimento de análises e ensaios instrumentais como microscopia eletrônica, analisador de potencial Zeta, e cristalografia de raios-X, que permitiram aos estudiosos conhecer a composição, aspectos e comportamento dos coloides (NEVES, 2018).

Deve-se ressaltar que em determinadas condições de temperatura, pressão e força iônica, todo processo químico no solo ocorrerá até que o estado de equilíbrio entre as partículas seja alcançado (BURITI *et al.*, 2019). Nesse meio, o equilíbrio é dinâmico e facilmente influenciado por fenômenos que estejam presentes entre a solução do solo e os materiais que compõem os coloides (DUARTE *et al.*, 2019).

No solo, em condições tropicais, os coloides têm ganhado destaque em estudos que envolvem o entendimento de sua sensibilidade, estabilidade e controle da acidez.

Para fins de prévio entendimento, na literatura, a sensibilidade do solo se refere à perda de resistência ao cisalhamento após ser submetido a carregamentos ou descarregamentos (GEERTSEMA *et al.*, 2018). E, como a argila possui uma estrutura eletricamente carregada, processos como a troca de cátions, medição de pH e outros tipos de aferições têm sido comumente realizadas.

Nesse seguimento, as argilas sensíveis surgem como um conteúdo de alto grau de importância, em função de fazer parte do grupo de solos moles, os quais são considerados verdadeiros desafios para engenheiros, uma vez que apresentam complexidade na sua formação e dificuldades para se obter seus parâmetros geotécnicos.

No Brasil, os estudos de depósitos de argilas moles são realizados em locais da costa brasileira, ocorrendo principalmente em cidades como a Baixada Santista (SP), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES), Sergipe (SE) e em Belém (PA), cuja presença de argilas sensíveis são bastantes correntes em áreas de várzea (FERREIRA *et al.*, 2022).

Em termos geológicos, a depender do local de formação, o solo pode possuir características de sensibilidade. O Grupo Formação Barreiras, presente no país, por exemplo, apresenta sedimentos fluviomarinhas, o que indica que o solo depositado através da intercalação da ação do mar e dos rios, que é rico em matéria orgânica, tem grande influência na formação do solo mole (MACHADO; PINHEIRO, 2021).

Uma região que tem apresentado problemas quanto ao solo e que inclusive faz parte do grupo supracitado, se localiza no município de Santana, no estado do Amapá. A coloração escura, que aponta para a presença de altos teores de matéria orgânica, e sua posição entre rio e mar, decerto um solo acidificado, despertou a curiosidade para elaboração desta pesquisa para maiores entendimentos quanto a constituição do solo da região.

À vista disso, este trabalho teve como finalidade analisar um solo argiloso, localizado na Foz do Rio Amazonas, no estado do Amapá, de modo a compreender as interações de suas partículas coloidais, suas propriedades químicas e a influência desses elementos na sensibilidade do solo em questão.

1.1. Justificativa

O estudo das cargas elétricas das partículas coloidais se faz importante para a compreensão de diversos fenômenos físico-químicos que sucedem nos solos, uma

vez que a maioria das reações eletroquímicas que influenciam no comportamento do solo, no que se refere estabilidade, ocorrem na superfície dos constituintes das frações orgânica e mineral (NEVES, 2018).

No Brasil, há a presença de solos altamente intemperizados, como é o caso de Latossolos e Argissolos. E, em virtude desse fator, sua mineralogia referente a fração de argila apresenta moderada quantidade de minerais silicatados como Ferro, Alumínio e Magnésio (FERREIRA *et al.*, 2022).

À primeira vista, entende-se que seja uma mineralogia simples, contudo, ao se fazer uma observação mais acentuada na literatura, como na obra do autor brasileiro da Universidade de São Paulo, Pérsio de Souza Santos, percebe-se que esses minerais apresentam uma imensa variabilidade em seu comportamento, o que pode, em alguns casos, influenciar em determinadas propriedades físico-químicas.

Além disso, considerando a sua formação e influência mineralógica, os solos com carga variável podem apresentar propriedades desejáveis na área agrônômica, uma estrutura estável, ótima porosidade e alta permeabilidade (EMBRAPA, 2010). No entanto, também podem apresentar propriedades indesejáveis, como elevada acidez, decréscimo de nutrientes e baixa capacidade de troca iônica.

As propriedades mencionadas anteriormente, em sua maioria, estão ligadas de forma direta ou indiretamente ao balanço de cargas elétricas na superfície das partículas do seu sistema coloidal (MORAIS, 2020), influenciando, principalmente, na sensibilidade dos solos, fazendo com que este perca resistência (MACHADO; PINHEIRO, 2021).

Destarte, a área de estudo, que se encontra no município de Santana, no estado do Amapá, possui parte da população ribeirinha, sendo que, segundo o IBGE¹ (2021), 20.239 pessoas vivem expostas em áreas de risco a inundações, enxurradas e deslizamentos. Portanto, é imprescindível desenvolver pesquisa de solo em áreas possivelmente sensíveis, visando entender seu funcionamento para auxiliar em um plano de ordenamento territorial que evite alocar a população em tais áreas.

Ademais, de modo geral, o solo é o elemento básico de toda construção, inferindo-se que proceder com uma investigação para conhecer suas características e seu comportamento é imprescindível, visto que os resultados fornecerão

¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

informações cruciais acerca do solo, prevenindo riscos de acidentes e preservação dos lençóis freáticos, gerando segurança e economia de recursos.

Neste contexto, realizar o presente estudo visa compreender os mecanismos de atuação e influência em solos argilosos, os quais são extremamente importantes na região amazônica por apresentarem significativa diversidade de depósitos materiais orgânicos, capazes de modificar suas propriedades físicas, especialmente a resistência ao cisalhamento do solo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo analisar por meio de ensaios eletroquímicos a sensibilidade de um solo mole argiloso, localizado na Foz do Rio Amazonas, de modo a compreender a interação de suas partículas coloidais e correlacionar com suas características geológicas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Compreender os mecanismos de interação de solos sensíveis, associando a sensibilidade com as trocas de cátions do meio;
- Relacionar a mineralogia do solo estudado com a formação de cargas elétricas na superfície dos coloides;
- Estabelecer a relação entre matéria orgânica e propriedades eletroquímicas, como o potencial Zeta, objetivando entender sua influência na sensibilidade do solo.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos. O primeiro discute o cerne temático da dissertação, salientando-se os objetivos, a justificação e relevância do tema estudado.

No segundo capítulo é apresentado uma Revisão Sistemática de Literatura, a qual indica de que forma foi realizada a pesquisa teórica do presente trabalho.

No terceiro capítulo se encontra disposta a fundamentação teórica, destacando-se os estudos relativos a processo de formação, estrutura mineralógica e propriedades eletroquímicas dos solos argilosos, nos quais a pesquisa se baseou.

No quarto capítulo é abordado o método utilizado nesta pesquisa, apresentando o local do estudo, coletas de amostras e os ensaios realizados.

Os resultados e discussões, que trazem destaque aos produtos obtidos com os ensaios de campo, estão dispostos no quinto capítulo.

E, por último, o capítulo seis contém as conclusões que puderam ser constatadas após a análise dos resultados no decorrer deste trabalho.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Para Gil (2022), autor brasileiro de várias obras destinadas a orientar a elaboração da pesquisa científica, a pesquisa bibliográfica consiste em uma etapa preliminar da pesquisa acadêmica, com uma dupla função de fornecer a fundamentação teórica do trabalho e averiguar o estágio atual referente ao tema pesquisado. No entanto, o mesmo autor ainda aponta que há desafios quanto a correta seleção de trabalhos, em virtude da quantidade volumosa de publicações disponíveis.

Surge, assim, uma problemática relacionada a escolha apropriada de publicações, sendo que esta precisa ser efetuada de forma confiável para ser adicionada, posteriormente, ao texto que o autor está produzindo. Mediante esse revés, pode-se fazer uso da Revisão Sistemática de Literatura (RSL), definida por Galvão e Ricarte (2019) como uma modalidade de pesquisa que se orienta por protocolos específicos, buscando dar logicidade a um grande corpo documental, indicando critérios e o processo de seleção de trabalhos científicos.

Sob a assertiva apresentada anteriormente, nesta pesquisa, a RSL foi construída considerando o trabalho das autoras Sampaio e Mancini (2007), em razão de concatenarem de modo inteligível o conteúdo sobre o tema, destacando um protocolo de pesquisa de RSL, o qual foi adaptado em 3 etapas que estão descritas a seguir.

2.1. Definição das questões de pesquisa

A princípio, conforme apontam Sampaio e Mancini (2007), uma boa revisão sistemática necessita de questões bem formuladas que irão contornar a investigação desejada. Porém, as autoras mencionadas anteriormente, não aprofundaram acerca desta questão de modo a apresentarem um método para elaboração de tais questionamentos. Portanto, o método de formulação de perguntas adotado neste

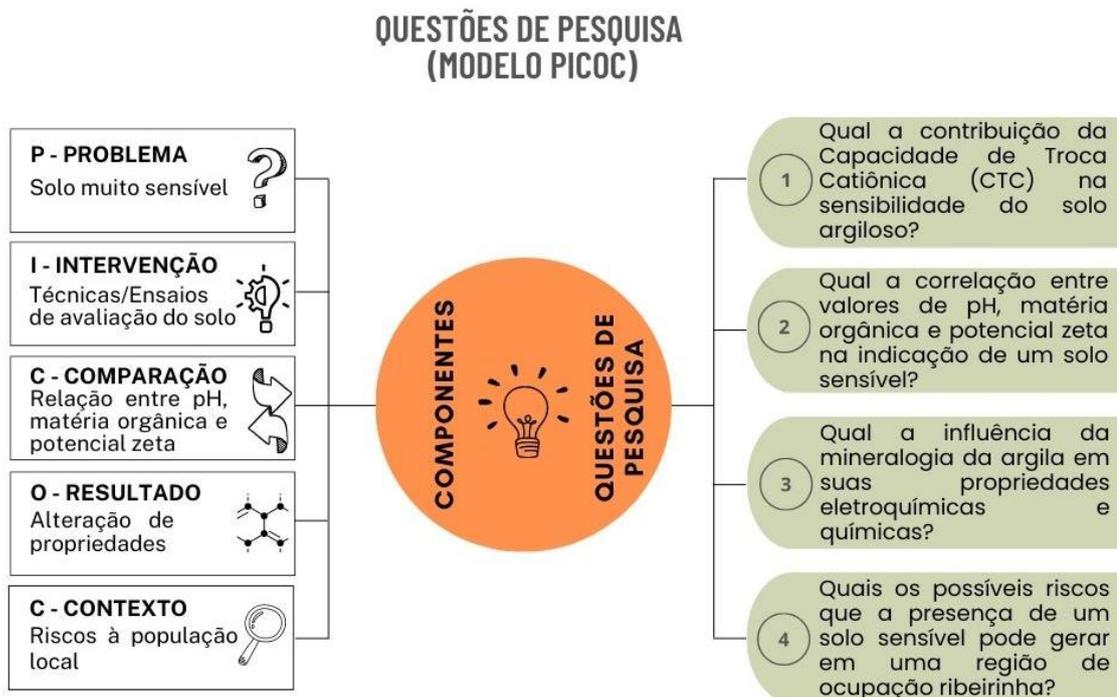
trabalho foi o abordado na pesquisa de Sousa *et al.* (2018), conhecido como modelo ou acrônimo “PICO”.

Existem inúmeras variações do modelo supracitado, permitindo ao investigador aperfeiçoar as estratégias que melhor se adequam para cada situação particular (SOUSA *et al.*, 2018). A variação escolhida é denominada de modelo “PICOC”, presente na pesquisa dos autores já mencionados, cujos componentes têm como significado: P (População/Problema), I (Intervenção), C (Controle/Comparação), O (Desfecho/Resultado) e C (Contexto).

Sousa *et al.* (2018) explicam que: a “população ou problema” se refere a “quem” é a pessoa que se investiga ou a “qual” o principal problema investigado; a “intervenção” pode se relacionar com a interferência de elementos ou tratar de técnicas, materiais e tecnologias disponíveis; o “controle ou comparação” versa sobre comparações de elementos do tema em estudo; o “desfecho ou resultado” consiste nas melhorias, efeitos ou resultado esperado; e, por último, o “contexto” compreende o ambiente da pesquisa, podendo ser um espaço físico ou meio social.

Mediante o apresentado, as questões de pesquisa foram formuladas e estão descritas na Figura 1, a seguir.

Figura 1 – Diagrama da aplicação do método PICOC.



Fonte: Autora.

À esquerda, na figura acima, estão dispostos os componentes gerados seguindo o modelo “PICOC”, e à direita, estão as cinco questões de pesquisa elaboradas considerando os componentes mencionados.

2.2. Definição das bases e dos termos de busca

De acordo com Sampaio e Mancini (2007), a busca da evidência é iniciada a partir da definição de termos ou palavras-chave, seguida da definição das bases de dados ou fontes de informação onde serão feitas as consultas dos trabalhos científicos.

Nessa perspectiva, para a presente pesquisa foram escolhidos doze termos de busca, ou seja, palavras relacionadas ao tema abordado. Esses termos foram unidos através dos operadores *booleanos* AND (o resultado deve conter um termo e o outro) e OR (o resultado deve conter um termo ou o outro), de modo a formar as *strings* de busca, que restringem a coleta de artigos científicos, tornando a pesquisa mais específica (COLEPICOLO, 2014). As aspas (“”), operadores de proximidade, também foram utilizadas, devido sua função de encontrar itens que mostrem exatamente o termo inserido na busca (COLEPICOLO, 2014).

Termos compostos como “matéria orgânica” precisam dos operadores de proximidade, pois caso não sejam utilizados, os resultados apresentarão publicações com apenas uma ou outra palavra, ou seja, apenas “matéria” ou “orgânica”, que não era a intenção desejada.

Posteriormente, as *strings* criadas foram aplicadas no campo de pesquisa de três bases de dados: Scielo, ScienceDirect e Scopus. A Scielo foi escolhida devido apresentar quantidade significativa de trabalhos sul-americanos, permitindo, assim, encontrar mais publicações brasileiras e de locais próximos.

A preferência pela Scopus se deu em virtude de esta ser uma base internacional, possuindo uma ampla produção científica, além de dispor de ferramentas de análise de pesquisa, como a produção por país, por autores, por área de assunto, entre outras.

A preferência pela base do ScienceDirect se deu pelo fato de conter uma seção principal focada em trabalhos internacionais de engenharia, disponibilizando um volume maior de trabalhos sobre o tema.

Contudo, como era fundamental trabalhos com informações específicas sobre os assuntos abordados, fornecendo uma literatura que não se encontra, muitas vezes,

em artigos de revistas, realizou-se uma pesquisa na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) para a escolha arbitrária de estudos nas áreas relacionadas a presente pesquisa.

Outrossim, durante a consulta nas bases de artigos, os trabalhos foram limitados a artigos publicados em revistas revisadas por pares, de acesso aberto, considerando como período os últimos cinco anos (2018 a 2022) e, quanto ao idioma, não foi realizada nenhuma restrição.

Ademais, também foram realizadas escolhas arbitrárias de livros, cuja justificativa é a mesma aplicada para a pesquisa na base da BDTD. Por fim, uma síntese das informações adotadas na estratégia de busca apresentada está descrita na Figura 2, a seguir.

Figura 2 – Estratégia de busca adotada.

Estratégia de busca				
TERMOS DE BUSCA (EM INGLÊS)	TERMOS DE BUSCA (EM PORTUGUÊS)	BASES DE DADOS	STRINGS DE BUSCA	
cation exchange capacity clay colloids electric charges mineralogy organic matter pH quick soil sensitive surface charge behavior zeta potential	capacidade de troca catiônica argila coloides cargas elétricas mineralogia matéria orgânica pH rápida solo sensível comportamento de carga superficial potencial zeta	Scielo ScienceDirect Scopus BDTD	"cation exchange capacity" AND pH AND clay "zeta potential" AND clay AND mineralogy "electric charges" AND soil OR colloid "surface charge behavior" AND soil "sensitive clay" OR "quick clay" "cation exchange capacity" AND "organic matter" AND clay	
FILTROS APLICADOS	TIPO DE PUBLICAÇÃO	PERÍODO	TIPO DE ACESSO	IDIOMA
	artigos de revistas* teses e dissertações** livros**	5 anos (2018 a 2022)	aberto	todos
			*revisadas por pares ** escolha arbitrária da autora	

Fonte: Autora.

Ainda quanto a consulta nas bases, houve, a princípio, uma certa dificuldade acerca dos termos corretos a serem aplicados no campo de busca. Nos trabalhos de língua portuguesa, é comum o uso do termo “carga superficial”, por exemplo. Porém, trabalhos estrangeiros de língua inglesa utilizam a expressão completa “comportamento de carga superficial”, o que tornou necessária a troca do termo inicial por este último.

Além disso, foram realizados testes através de *strings* por meio da alternância de termos de busca. Destarte, constatou-se que para algumas strings, o uso do termo “solo” gerava um resultado que possuía uma maior quantidade de trabalhos do assunto interessado e, para outras, o termo “argila” era mais razoável. Após estas verificações, a presente etapa foi finalizada e prosseguiu-se para a etapa de triagem das publicações encontradas.

2.3. Seleção das publicações identificadas (triagem)

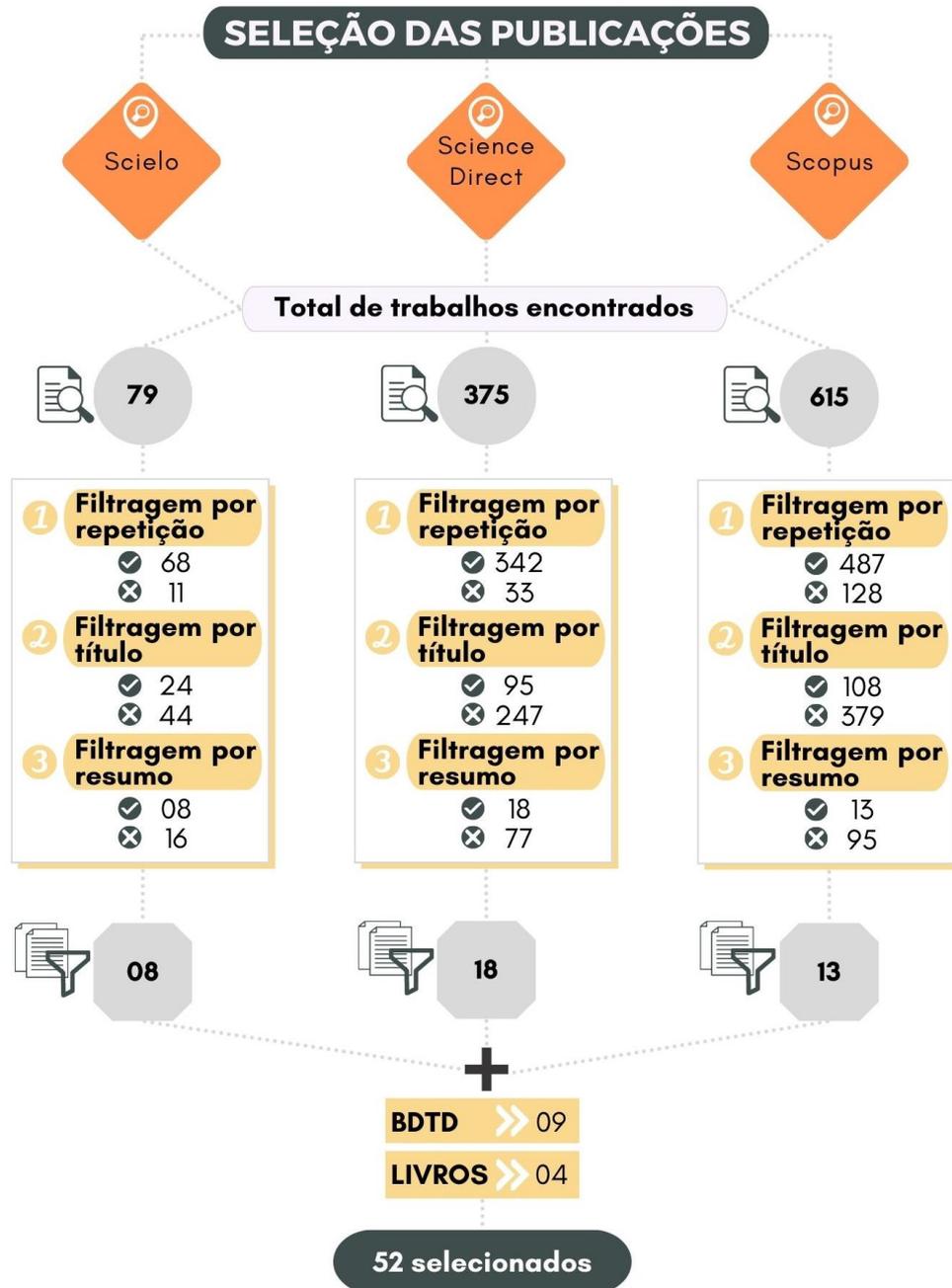
Para a seleção de publicações, é preciso determinar os critérios de inclusão e exclusão que levarão aos estudos a serem utilizados na pesquisa. Nesse sentido, Sampaio e Mancini (2007) estabelecem que tais critérios de triagem podem ser definidos pelos próprios pesquisadores, contudo, sugerem a realização de uma sequência de seleção, efetuando uma filtragem por repetição, por título e por resumo.

Assim, a filtragem por repetição foi iniciada com a exclusão de publicações repetidas, em vista do mesmo trabalho aparecer em até três resultados de *strings* diferentes. Em seguida, foi realizada a filtragem por título, procedimento no qual foram lidos os títulos dos artigos disponíveis, e caso estes não apresentassem relação com o tema, também eram descartados.

E, por fim, através da leitura do resumo dos artigos, verificou-se a relevância de cada trabalho para o presente estudo, obtendo-se, finalmente, as produções a serem lidas por completo.

Para serem escolhidos, os trabalhos tinham de apresentar um método semelhante ao empregado nesta pesquisa, elaborando uma análise das mesmas propriedades estudadas, sendo preferível aqueles cuja aplicação havia ocorrido em solos argilosos. Nesse seguimento, os trabalhos foram selecionados e o resultado do processo de triagem está disposto na Figura 3.

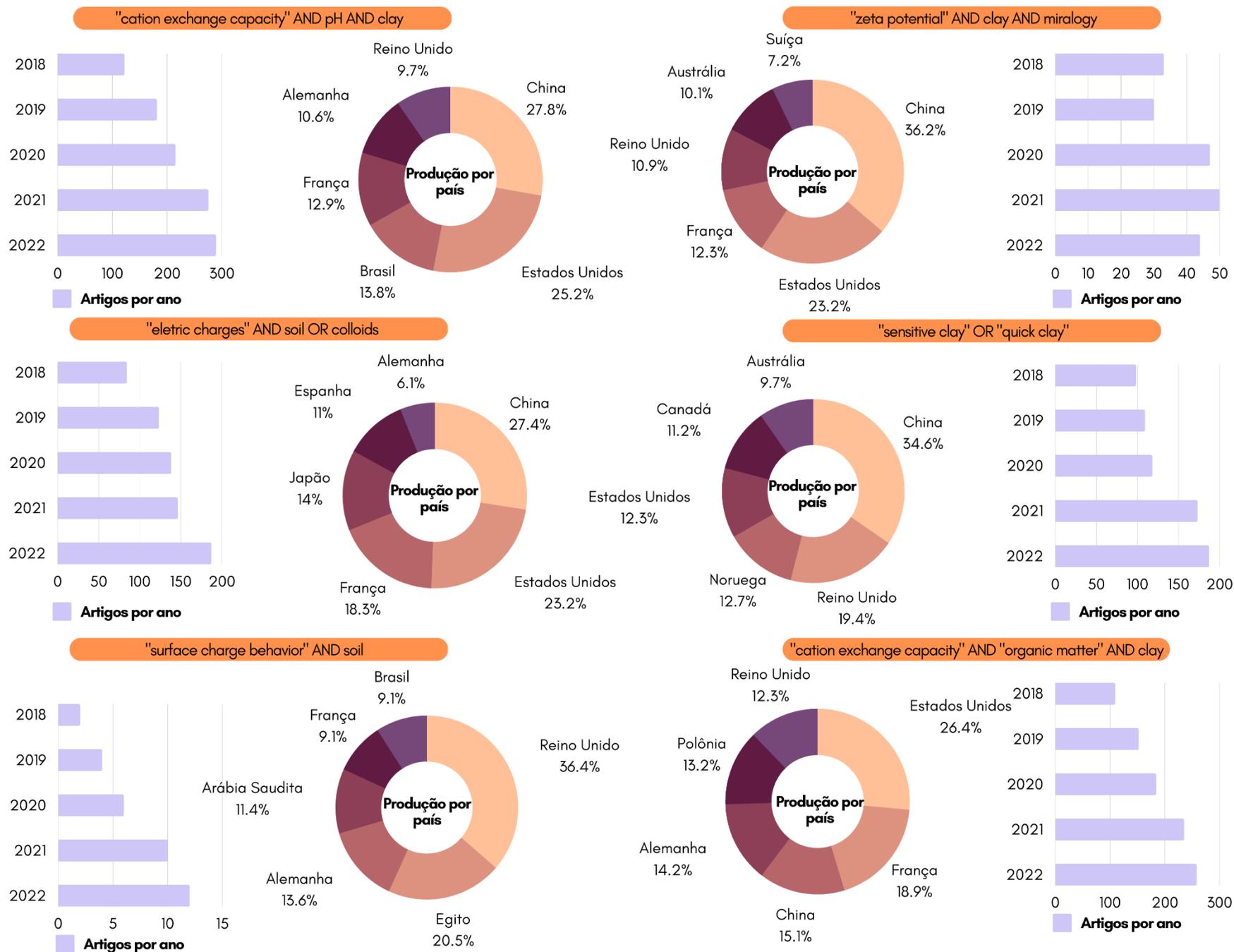
Figura 3 – Processo de triagem.



Fonte: Autora.

A propósito, de modo a enriquecer este processo de pesquisa com informações primorosas, foi possível coletar dados referentes aos países que mais produzem artigos científicos juntamente com a quantidade de artigos produzidos nos últimos cinco anos, segundo as *strings* utilizadas na busca, por meio do uso da ferramenta “Análise de resultados” disponível na base da Scopus. Desse modo, a seguir, na Figura 4, são apresentados estes dados em forma de gráficos.

Figura 4 – Resultados da inserção das strings na base de dados da Scopus.



Fonte: Autora. Dados coletados da Scopus, data: 04/01/2023.

Foi possível observar quanto as pesquisas que envolvem a *string* “sensibilidade da argila”, alta produção de artigos na China, cuja dedicação dos trabalhos é voltada principalmente para o estudo de argilas marinhas e possíveis aplicações. Já os artigos envolvendo a strings de “capacidade de troca catiônica” com pH e argila, evoluíram sua quantidade de produção nos últimos cinco, tendo quase triplicado, com um foco direcionado na agricultura para tratamento de solo ácidos. O Brasil entrou nessa porcentagem, sendo o terceiro que mais publicou trabalhos nesse intervalo de tempo, com a maioria dos trabalhos voltados para fertilização dos solos locais.

Como adendo, relativo as publicações arbitrárias, existem algumas que não seguiram o espaço temporal em função de serem trabalhos clássicos que englobam variáveis padrões que precisam ser empregadas. Desse modo, a seguir, na Tabela 1, são destacadas as obras que seguiram tal estilo.

Tabela 1 – Obras arbitrárias que não seguiram o espaço temporal definido.

Título da obra	Ano de publicação	Autores	Motivo
Guia prático para interpretação de resultados de Análises de Solo	2015	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Define as margens de valores comuns para análise de solos.
Catálogo Zetasizer Nano Series User Manual	2013	Empresa <i>Malvern Panalytical</i>	Estabelece parâmetros para análise do potencial Zeta.
Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais	2010	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Define os valores de pH para solos.
Fertilizantes e Fertilização	(1982) 2005	Chauvel <i>in</i> Carvalho, Sousa e Sousa	Valores comuns de CTC da região amazônica.
Ciência e Tecnologia de Argilas	1989	Pérsio de Souza Santos	Obra de destaque no Brasil de detalhamento da estrutura da argila.

Fonte: Autora.

Muitos dos artigos estrangeiros utilizados na pesquisa abordavam os valores padrões estabelecidos pela Empresa *Malvern Panalytical*, sendo um trabalho,

portanto, de extrema importância. E, dentre trabalhos nacionais, a obra de Pêrsio de Souza Santos e os guias da Embrapa também se mostraram relevantes para discussão de resultados de outros autores.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Gil (2022), a fundamentação teórica é usualmente caracterizada pela revisão de textos, artigos, livros, dentre outros, que servirão para compor a redação do trabalho. Segundo os autores, essa fundamentação utiliza embasamento na ideia de demais autores para discutir aspectos teóricos sobre o tema em estudo.

Dessa forma, reconhecendo a importância deste instrumento para evidenciar os conteúdos técnico-científicos na esfera da pesquisa desejada, a Fundamentação Teórica executada a seguir buscou contribuir e relacionar o corpo de conhecimento e pensamentos encontrados na literatura, aos assuntos que permeiam o tema deste trabalho.

Ainda, é importante salientar que nos tópicos iniciais foram utilizados mais livros e dissertações; e nos tópicos finais, há uma maior concentração de artigos. Isto foi assim disposto, pois informações quanto a conceitos e características da argila não foram encontradas facilmente em artigos científicos; diferente de assuntos como o potencial Zeta (conteúdo contemporâneo), que havia maior quantidade.

3.1. Caracterização geral mineralógica das argilas

O presente capítulo tem como intuito apresentar algumas características presentes em argilas, adentrando em assuntos quanto a sua formação, carga elétrica dos grãos e arranjo estrutural.

3.1.1. Elementos formadores dos argilominerais

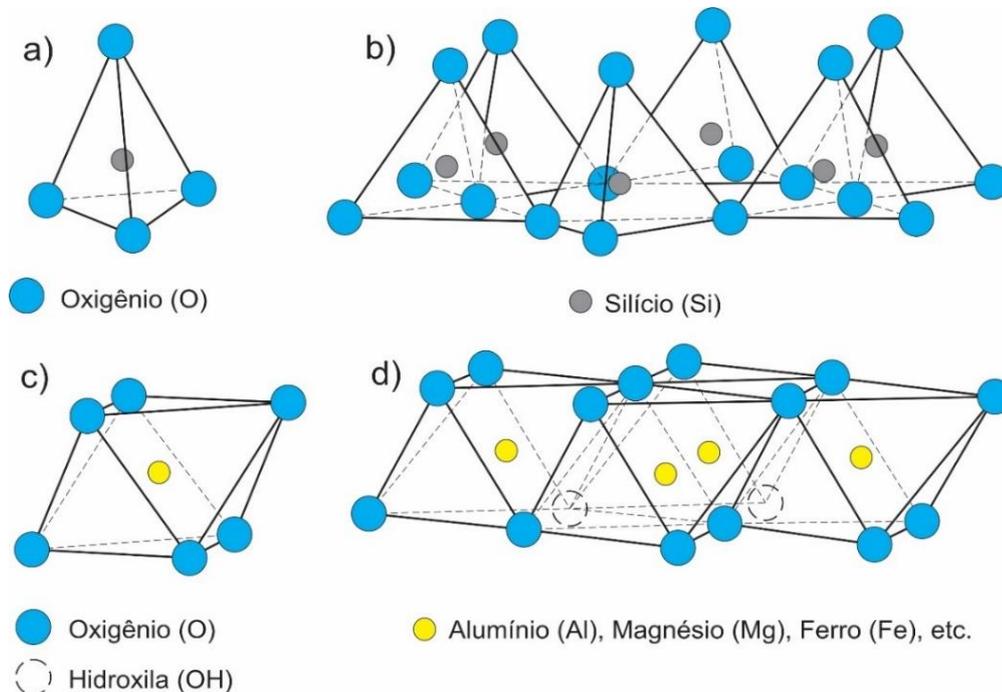
Segundo estudos acerca de solos moles no Brasil desenvolvidos pelos especialistas em solos Ventura Junior *et al.* (2021), um dos fatores que mais influenciam no comportamento desses tipos de solo é a sua constituição mineralógica. No caso das argilas, compreende-se que estas são formadas principalmente por partículas cristalinas minúsculas, possuindo um número restrito de minerais denominados argilominerais, além de conter matéria orgânica e outros tipos de compostos químicos inorgânicos, como a mica e a alumina (PEREIRA *et al.*, 2020).

No estado da arte produzido por Gonçalves (2019), o autor acentua que, basicamente, todos os argilominerais têm unidades fundamentais cujas estruturas cristalinas são tetraédricas (de silício e oxigênio) e octaédricas (de alumínio, ou outros elementos, e hidroxilas), que se concatenam formando folhas (regulares ou irregulares) e se agrupam configurando uma estrutura lamelar chamada de classe dos flossilicatos (do grego *phyllos*, que significa folhas).

Ainda, conforme Nunes Filho *et al.* (2021), os argilominerais são silicatos de alumínio (Al) hidratados e podem conter pequenas quantidades de elementos alcalinos (K, Na, Li) e alcalino terrosos (Ca, Mg), sendo que este Al presente em sua estrutura pode ser substituído por Fe^{3+} , Fe^{2+} , ou Mg^{2+} . Importante destacar que os elementos citados inicialmente são os responsáveis por proporcionar às argilas inúmeras propriedades e um comportamento físico-químico (GONÇALVES, 2019).

A unidade tetraédrica ou octaédrica, em regra, é formada por átomos de oxigênio e/ou hidroxilas que ficam dispostos nos vértices envolta dos átomos de silício (Figura 5), em ligação covalente (interação de alta eletronegatividade), ou em outros termos, elevada tendência de receber elétrons (DIAS, 2019).

Figura 5 – Representação de tetraedro e octaedro: a) tetraedro $[\text{SiO}_4]$; b) folha do tetraedro em arranjo hexagonal; c) octaedro $[\text{M}(\text{OH})_6]$; d) folha do octaedro em arranjo hexagonal.



Fonte: Autora. Adaptado de Dias, 2019.

Como observado, as estruturas octaédricas podem ter diferentes cátions compondo a sua estrutura, sendo os mais comuns o alumínio e o magnésio. Contudo, em regiões onde exista a presença de outros cátions, estes também podem ajudar a compor a estrutura octaédrica (NEVES, 2018).

Pérsio de Souza Santos (1989), pesquisador da USP e autor do livro “Ciência e Tecnologia de Argilas”, salienta que íons hidroxila² estão presentes nos vértices dos octaedros, que têm a função de estabelecer ligação entre os octaedros através de pontes de hidrogênio³.

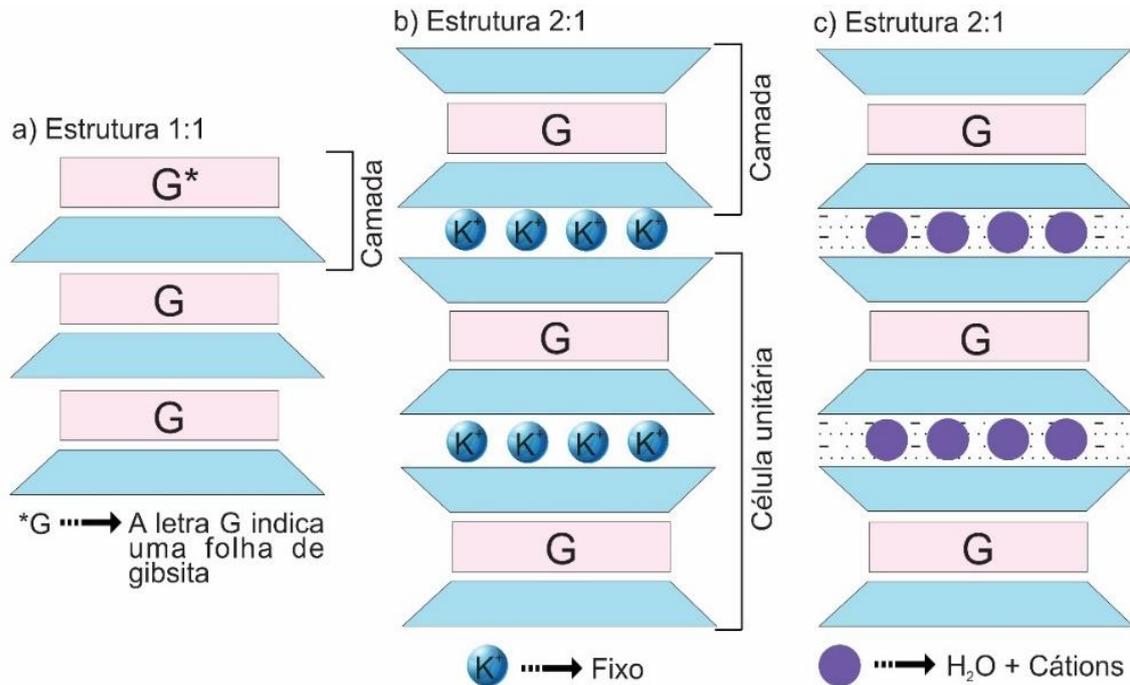
Assim, se o cátion localizado no centro da estrutura for um alumínio, por exemplo, o conjunto de octaedros constitui a folha denominada gibbsite; enquanto se o cátion centrado for um magnésio, a folha é nominada como brucita (DIAS, 2019).

Para o estudo dos argilominerais, criou-se uma convenção de modo a simplificar a representação das estruturas tetraédricas e octaédricas. Desse modo, conforme esquemas de Novo *et al.* (2021), utilizam-se trapézios para representar as estruturas tetraédricas, e retângulos para representar as estruturas octaédricas, com as camadas sendo divididas em minerais de estrutura 1:1 (caulinita) e 2:1 (montmorilonita, esmectita, vermiculita).

Para melhor entendimento, uma camada constituída por uma folha tetraédrica e uma folha octaédrica, é do tipo 1:1, como é o caso da caulinita (Figura 6). O primeiro número refere-se à quantidade de folhas tetraédricas, seguido de dois pontos e o número de folhas octaédricas.

² Ainda que o átomo de hidrogênio só possua um elétron no seu único orbital 1s, podendo formar unicamente uma ligação covalente, certas condições podem levar um átomo de hidrogênio a ser atraído por dois átomos, funcionando como uma espécie de ponte entre eles. Este vínculo formado é titulado de ligação hidrogênio (O-H-O), presente nos cristais de hidróxidos, silicatos e argilominerais, cuja ligação dominante é iônica (SANTOS, 1989). Ainda segundo o autor, os hidróxidos de alumínio e ferro (gibbsite, boemita, diásporo e lepidocrocita) retém ligações hidroxilas; já o hidróxido de magnésio (brucita) não contém ligações de hidroxila, uma vez que na estrutura o oxigênio estará ligado de forma direta ao íon magnésio (SANTOS, 1989).

Figura 6 – Representação gráfica de argilominerais: a) Estrutura da caulinita; b) Estrutura da ilita; c) Estrutura da esmectita (montmorilonita).



Fonte: Autora. Adaptado de Das e Sobhan, 2019.

É relevante destacar que todo argilomineral possui sua célula unitária bem definida (SANTOS, 1989). É o caso, por exemplo, da ilita, observada na Figura 6-b. As ilitas possuem uma camada 2:1, ou seja, possuem duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica, conectadas por íons de potássio que se repetem incessantemente (SANTOS, 1989).

Além disso, segundo a obra de Das e Sobhan (2019) intitulada “Fundamentos de engenharia geotécnica”, quanto as estruturas supracitadas, ainda cabe salientar que as camadas tanto do tipo 1:1 quanto do tipo 2:1 (Figura 6, a e b) são consideradas “sem cargas”, e por isso são chamadas de neutras. Diferente da estrutura 2:1 (minerais de camadas mistas ou interestratificadas) da Figura 6-c, que representa uma típica estrutura do grupo das esmectitas, que possuem carga elétrica (DAS; SOBHAN, 2019).

Essa classe de minerais muito presente em solos e sedimentos merece significativa atenção, principalmente devido suas propriedades estarem relacionadas a uma alta área superficial, um alto grau de tumescência em água (argilomineral expansível) e a capacidade de realizar trocas catiônicas (DAS; SOBHAN, 2019). Entretanto, este assunto será abordado com mais ênfase em tópico posterior.

3.1.2. Interferência das cargas elétricas no comportamento de argilas

Na mensuração da influência das cargas elétricas no comportamento de uma partícula, é utilizada a razão entre a sua área de superfície e seu peso, nominada como superfície específica (SANTOS, 1989). Contudo, conforme o autor, quando esta é demasiadamente pequena, como no caso dos grãos de areia, indica de imediato que a força peso rege o comportamento do material.

Em contrapartida, na revisão levantada por Elert e Rodrigues-Navarro (2022), os autores destacaram que as partículas de argila apresentam superfícies específicas consideradas grandes, influenciando em seu comportamento, tornando-as bastante dependentes das cargas elétricas intrínsecas à sua composição mineralógica. Ainda segundo os autores, deve-se ressaltar que cada argilomineral detém um intervalo de valores de superfície específica, cuja variedade ocorre segundo a força de suas ligações químicas.

As camadas das esmectitas, por exemplo, se conectam entre si através das ligações de *Van der Waals*, consideradas ligações fracas (SANTOS, 1989). Consoante a Peng *et al.* (2022) em seu trabalho sobre adsorção de íons das esmectitas, camadas com ligações fracas impedem que os argilominerais das esmectitas produzam grãos maiores e, conseqüentemente, devido a esse fator, apresentam um valor superior quando se trata da superfície específica.

Esta situação, segundo os autores supracitados, é o oposto dos grãos de argila do grupo da caulinita, uma vez que as suas camadas são conectadas por meio de fortes ligações covalentes, formando, assim, grãos relativamente grandes (PENG *et al.*, 2022).

Retornando a análise dos grupos com ligações tênues entre as camadas, Liu *et al.* (2018) destacam que uma das conseqüências que ocorre em função da forte atividade elétrica das partículas de argila é a baixa permeabilidade, ainda que o solo argiloso possua um elevado índice de vazios.

Este fenômeno é explicado pela presença da dupla camada de água no entorno das partículas de argila, composta por água e íons intercambiáveis (ou seja, aqueles que podem ser trocados por outros íons), os quais estão sujeitos à estrutura da argila pela força de atração desempenhada pelas cargas negativas dos argilominerais (SANTOS, 1989). Por conseguinte, compreende-se que os vazios de determinado solo argiloso dispõem de água da dupla camada, porém esta não é livre para percolar.

Segundo o guia técnico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2010), quando a argila está seca, a carga negativa é equilibrada pelos cátions intercambiáveis Ca^+ , Mg^+ , Na^+ e K^+ envolta das partículas, por meio de atração eletrostática (atração entre dois grupos ionizados com cargas opostas).

Porém, Shang *et al.* (2018) citam que quando a água é inserida à argila, os cátions e os íons passam a flutuar em torno das partículas de argila, sendo esta configuração denominada de dupla camada difusa (*diffuse double layer*).

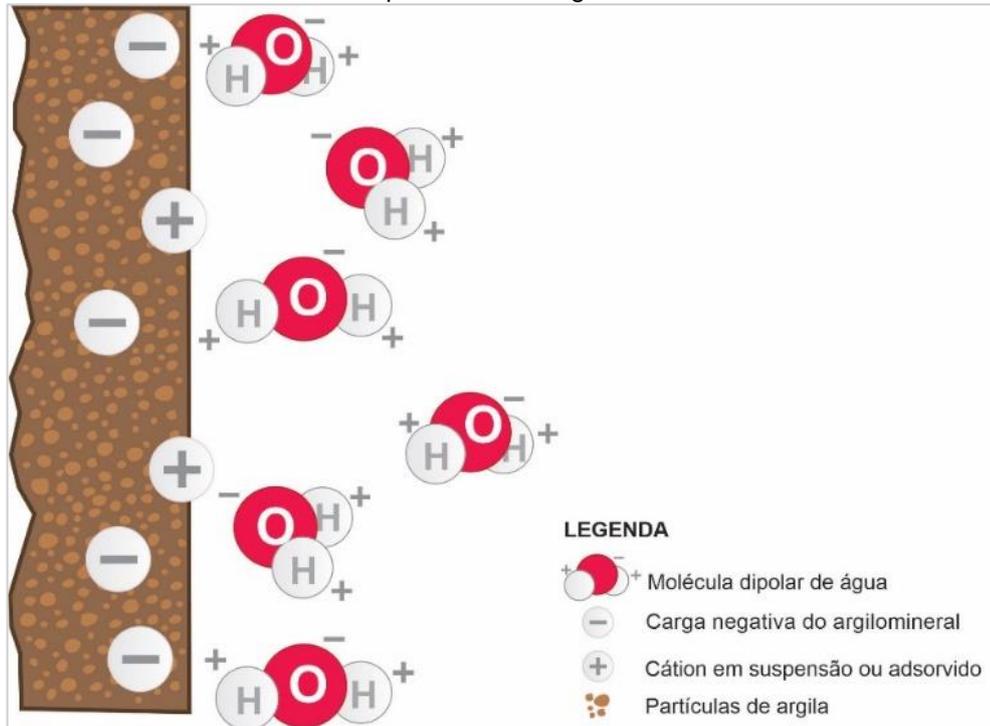
Além disso, a molécula de água, segundo Santos (1989), é polar em razão dos hidrogênios se ligarem aos átomos de oxigênio de maneira não simétrica (ocorrendo em um ângulo de ligação de 105°), levando a formação de um polo positivo e outro polo negativo, sendo conhecida como dipolo.

Ainda segundo o autor supracitado, considerando que o argilomineral detém uma carga negativa, o polo positivo da molécula de água é imediatamente atraído para este e, de forma conexa, o polo negativo da molécula de água é atraído para algum cátion intercambiável que se encontre em suspensão ou que foi adsorvido na superfície do argilomineral.

Ao estudar o efeito das propriedades eletroquímicas da superfície do solo em três diferentes tipos de argila, Liu *et al.* (2022) demonstraram que em ambas as situações supracitadas a partícula de água fica atada em torno dos grãos, seja de forma direta ou indireta, por meio da eletronegatividade existente nas partículas de argila. Os autores concluíram que é próximo à superfície dos grãos que as forças de atração entre a água e as partículas do solo são mais fortes.

A dupla camada difusa e os dois mecanismos de atração percorridos anteriormente são apresentados na Figura 7, a seguir.

Figura 7 – Representação da atração de moléculas da dupla camada difusa da água em meio as partículas de argila.

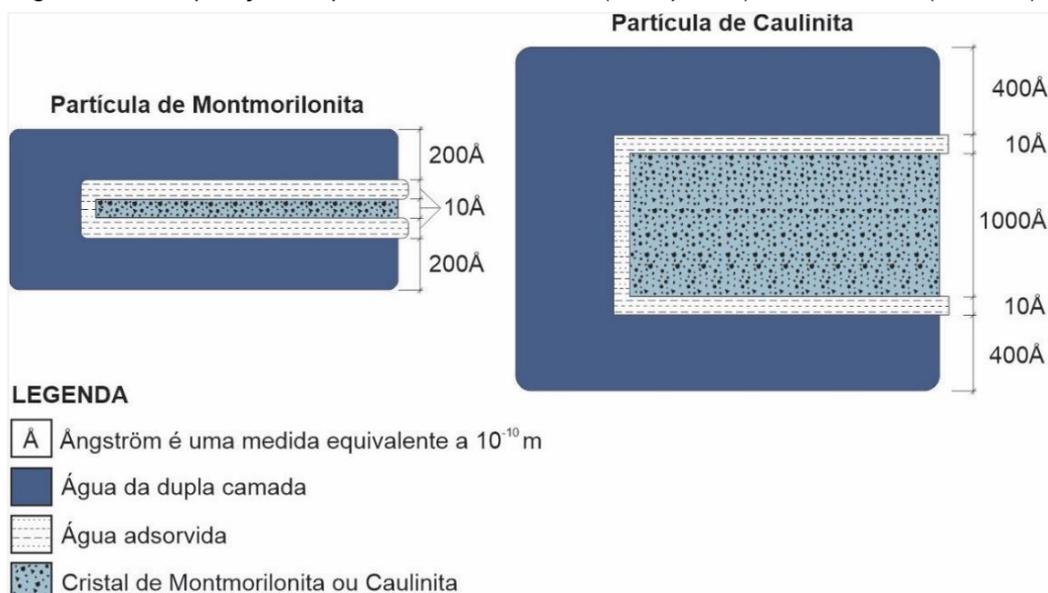


Fonte: Autora. Adaptado de Das e Sobhan, 2019.

A camada mais interna da água das partículas de argila mantida pela força de atração é designada como água adsorvida, cuja viscosidade é superior à da água livre nos poros (MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018). A água adsorvida da dupla camada difusa, segundo os autores, não é eliminada com facilidade e não pode se mover livremente pelo solo.

A quantidade de água que fica retida na estrutura da partícula de argila dependerá do argilomineral presente na composição (DAS; SOBHAN, 2019). A Figura 8 apresenta a constituição de uma partícula do grupo da esmectita (da qual faz parte as montmorilonitas) à esquerda, e uma partícula do grupo da caulinita à direita.

Figura 8 – Composição de partícula da esmectita (à esquerda) e da caulinita (à direita).



Fonte: Autora. Adaptado de Das e Sobhan, 2019.

Elert e Rodrigues-Navarro (2022) citam que a proporção entre a quantidade de água da dupla camada e a espessura da partícula influenciam diretamente na plasticidade dos solos argilosos. Dessa forma, as autoras destacam que quanto maior for a capacidade da partícula para acondicionar a água dos poros na dupla camada difusa, maior será a sua plasticidade.

Como exemplo pode-se citar uma partícula de argila de esmectita, a qual pode receber muita água e, ainda assim, manter uma boa consistência, visto que a maior parte dessa água será destinada a formação da dupla camada difusa, não permanecendo livre nos poros (ELERT; RODRIGUES-NAVARRO, 2022).

Todas as argilas têm muita afinidade com a água; contudo, alguns solos argilosos são mais propensos a inchar do que outros, como é o caso do grupo das montmorilonitas (NOVO *et al.*, 2021). Ainda de acordo com os autores, tal condição pode trazer sérios problemas, incluindo grandes recalques; resultado da mudança no estado físico-químico das partículas, findando na alteração da espessura da dupla camada difusa.

A forte concentração de cátions, alta valência de cátions e ambiente ácido diminuem radicalmente a espessura da dupla camada. É o caso evidenciado no estudo de Liu *et al.* (2018) quanto ao efeito da água salina em diferentes argilas. Os autores concluíram que as argilas cauliniticas, cloríticas e mistas não são, de modo significativo, tão afetadas pela água do mar quando comparadas às argilas

montmorilonitas, que com a redução da sua dupla camada promovem a floculação, aumentando a permeabilidade no solo.

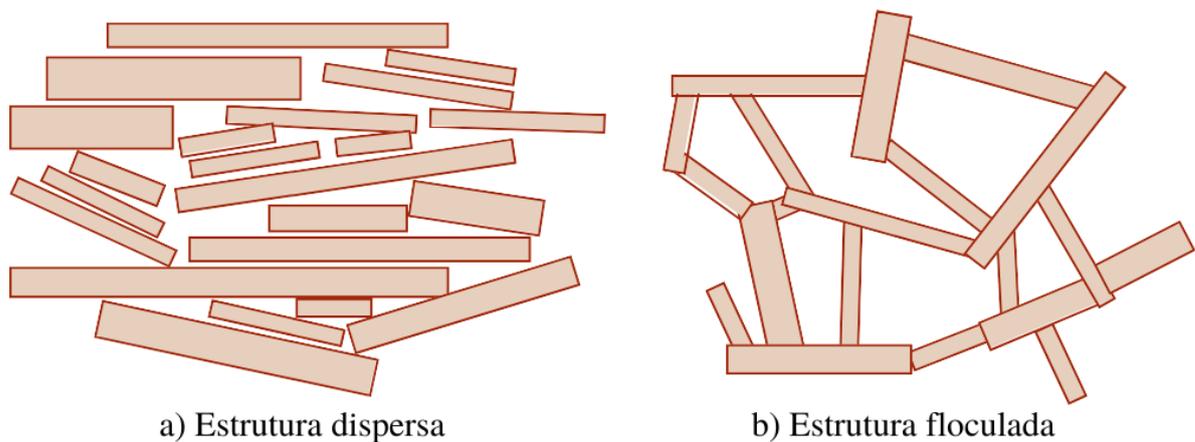
Neste sentido, é preciso reconhecer que a presença dos argilominerais têm forte influência nas propriedades físicas de resistência do solo, principalmente quando a umidade está presente.

3.1.3. Arranjo das partículas de argila

Mediante o entendimento de Barbosa *et al.* (2021) acerca de solos moles, a composição do argilomineral e as condições físico-químicas do local onde a argila foi gerada são os fatores de influência do arranjo estrutural dos grãos de argila, podendo ser do tipo disperso ou floculado.

No arranjo disperso, as partículas se encontram em orientação perpendicular com relação ao sentido de maior tensão principal; já no arranjo floculado, cujas argilas são denominadas de argilas estruturadas, como o próprio nome indica, as partículas tendem a se aglomerar em flocos e sua orientação não depende do sistema de tensões (DAS; SOBHAN, 2019). Ambas as estruturas podem ser observadas na Figura 9, a seguir.

Figura 9 – Arranjo estrutural das argilas.



Fonte: Autora. Adaptado de Lepsch, 2021.

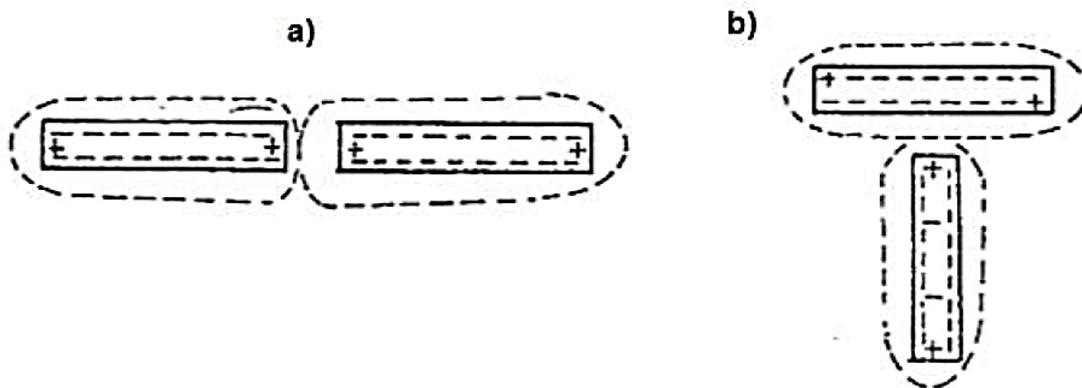
No caso, considerando um argilomineral do grupo da caulinita, a superfície de maior dimensão do argilomineral é revestida por cargas negativas provenientes das extremidades das folhas de sílica e de gibsita, diferente das arestas laterais que concentram as cargas positivas (SANTOS, 1989).

Sob esse viés, através de observações em ensaios microestruturais, Ren *et al.* (2021) ao realizar uma revisão acerca do comportamento tixotrópico da argila (assunto discutido no tópico 3.3.1) através do MEV (microscopia eletrônica de varredura), destacaram que o solo intacto apresenta uma estrutura floclada com partículas interconectadas.

Porém, quando o solo é remexido, gera-se um dano nas ligações entre as partículas que força as feições estruturais a evoluir de floclado para disperso (REN *et al.*, 2021). Nesse sentido, os autores salientam que somente após um tempo prolongado, de modo gradual, o solo exibirá novamente uma estrutura floclada.

Ainda, quanto a interação entre as partículas da estrutura dispersa, esta se dá face à face (Figura 10-a), através das duplas camadas difusas, sendo considerado um contato fraco, sem efetividade (SANTOS, 1989). Assim é chamado, pois, segundo o autor, mesmo após o processo de sedimentação a força de repulsão permanece, conservando o afastamento das partículas entre si.

Figura 10 – Ligações entre partículas de argila: a) Ligação face à face; b) Ligação face-aresta.



Fonte: Santos, 1989.

Contudo, no caso da estrutura floclada, as partículas tendem a se conectar por ligações face-aresta, como indicado na Figura 10-b. Com a força de atração entre os polos, o contato das ligações ocorre por meio da camada mais interna de água adsorvida, cujo contato pode ser considerado efetivo (SANTOS, 1989).

De acordo com Melo, Machado e Tavares Filho (2020), pesquisadores da Universidade de Londrina, no Paraná, ao medir o efeito isolado de cátions trocáveis na dispersão de argila em solos para produção de culturas, destacaram que é por causa desse contato existente entre os grãos no arranjo floclado que as argilas

estruturadas possuem maior resistência ao cisalhamento do que as que se encontram em arranjo disperso.

Todavia, quanto a sentença anterior, deve-se ressaltar que se trata de solos não alterados, sem a presença de outros agentes como a água, pois solos flocculados são porosos e têm alta permeabilidade, e a pressão da água armazenada pode vir a afetar a resistência (DAS; SOBHAN, 2019).

Como destacado no trabalho de Barbosa *et al.* (2021), a dispersão é favorecida pela dominação de cargas negativas, enquanto que o balanceamento entre cargas positivas e negativas favorece a aproximação entre os colóides de argila, resultando no processo de floculação.

3.2. Aspectos das propriedades eletroquímicas e químicas dos solos

Neste tópico, são apresentadas características da propriedade eletroquímica potencial Zeta e da propriedade química conhecida como Capacidade de Troca Catiônica (CTC) ou também denominada de Capacidade de Troca de Cátions. Ambos são conhecimentos necessários para o entendimento dos resultados dos ensaios realizados que serão expostos em momento posterior.

3.2.1. Potencial Zeta (ζ)

Durante a ocorrência de fenômenos eletrocinéticos, os fluidos que contenham partículas com cargas se movimentam rumo à superfície do sólido, sendo estipulados a partir da velocidade do fluido e do campo elétrico na região de contato (NEVES, 2018). Para este caso, segundo a autora, o sólido é tido como uma esfera e a atuação do líquido como newtoniano.

Logo depois, a face próxima à superfície do sólido conterá fluido interno estacionário, conhecida como superfície de cisalhamento, local onde ocorre a transferência de partículas que acaba gerando uma camada que as envolve, a qual permite que estas se desloquem conservando sua carga (MALVERN, 2013).

Desse modo, com a preservação da sua carga na superfície de cisalhamento, as partículas são atraídas rumo ao polo que possui carga oposta as de sua superfície, podendo ser polo positivo ou negativo, formando um potencial elétrico denominado de potencial Zeta (MALVERN, 2013).

Este potencial é representado pela letra grega ζ (zeta) e está associado a composição mineral, força iônica, cátions adsorvidos e o pH da solução (MÉNDEZ *et*

al., 2018), embora outras propriedades também possam influenciar em seu valor (AWAN *et al.*, 2022). Sua importância é devido ser um indicador útil da carga superficial, podendo ser usado para prever e controlar a estabilidade de suspensões coloidais (NEVES, 2018).

Outrossim, cabe salientar que grande parte dos materiais macroscópicos ou particulados, quando entram em contato com um líquido, obtém uma carga elétrica em sua superfície que pode surgir tanto por meio da dissociação de grupos ionizáveis e adsorção diferencial de íons da solução que estejam presentes na superfície da partícula, quanto através da própria síntese do processo (HIDAYAT *et al.*, 2022). Daí o motivo de se adicionar uma substância líquida nas amostras para, assim, ser possível avaliar o potencial Zeta em meio as interações das partículas.

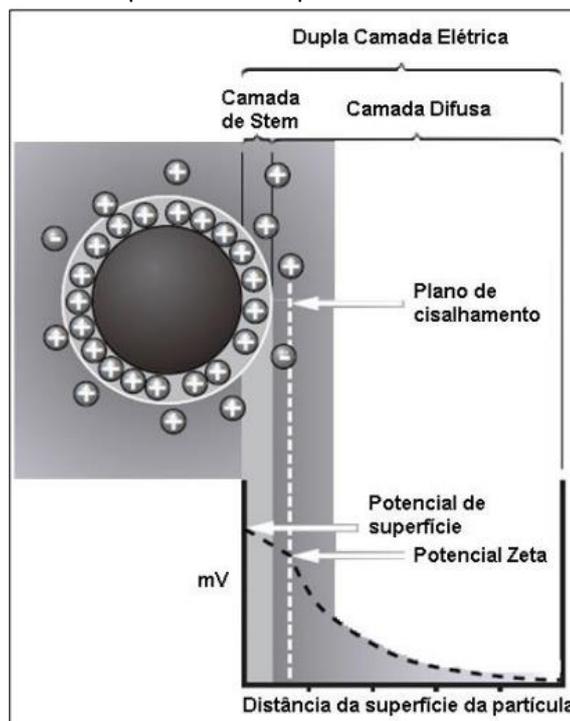
A carga líquida afeta a distribuição de íons na vizinhança superficial, promovendo o aumento da concentração de contra-íons⁴ nas proximidades da superfície (HIDAYAT *et al.*, 2022). Ainda segundo os autores, é desta maneira que a Dupla Camada Elétrica (DCE) na interface da partícula com o líquido é formada. Na literatura são conhecidas a divisão da DCE em camada de Stern e Dupla Camada Difusa.

Adjacente à superfície mineral, é onde se encontra a camada de íons intensamente adsorvidos conhecida como camada de Stern (MALVERN, 2013). Já o restante da carga gerado nesta camada, é equilibrado por um conjunto difuso de íons hidratados o qual se estende em direção a solução do solo, denominada de Dupla Camada Difusa (MALVERN, 2013).

Para contribuir com a visualização de todas as camadas, a Figura 11 representa um modelo conceitual que descreve a distribuição de carga entre a solução adjacente e a superfície mineral.

⁴ Contra-íon é um íon que possui carga oposta à de um outro íon presente na mesma solução (HIDAYAT *et al.*, 2022).

Figura 11 – Migração de íons idealizada no sistema de solo-solução para formar o potencial Zeta.



Fonte: Malvern, 2013.

À medida que as partículas se aproximam (ou seja, quando a espessura da dupla camada elétrica reduz, sobrepondo-se uma sobre a outra), surgem interações físicas, incluindo a repulsão da dupla camada (SHANG *et al.*, 2018). Neste sentido, o potencial Zeta está associado com a distribuição de íons na camada difusa, passando a depender da concentração de eletrólitos, da carga dos íons, do solvente e da quantidade de surfactantes⁵ (AWAN *et al.*, 2022).

Outra relação de dependência é apontada por Darrow, Guo e Trainor (2020), pesquisadores da Universidade do Alaska, referente a presença de cátions divalentes e monovalentes na camada de Stern. Em seu teste com partículas de argila, considerando uma temperatura de 20 °C, através da adição de Ca^{+2} e Mg^{+2} em amostras distintas de argilominerais, os valores de potencial Zeta foram alterados de -39,14mV para -11,93mV e -15,41mV, respectivamente, em uma amostra de montmorilonita. E, na adição de Na^{+} e K^{+} , o valor se tornou mais negativo, alcançando -40,57mV e -39,66mV (DARROW; GUO; TRAINOR, 2020). O mesmo ocorreu em amostras de caulinita e illita.

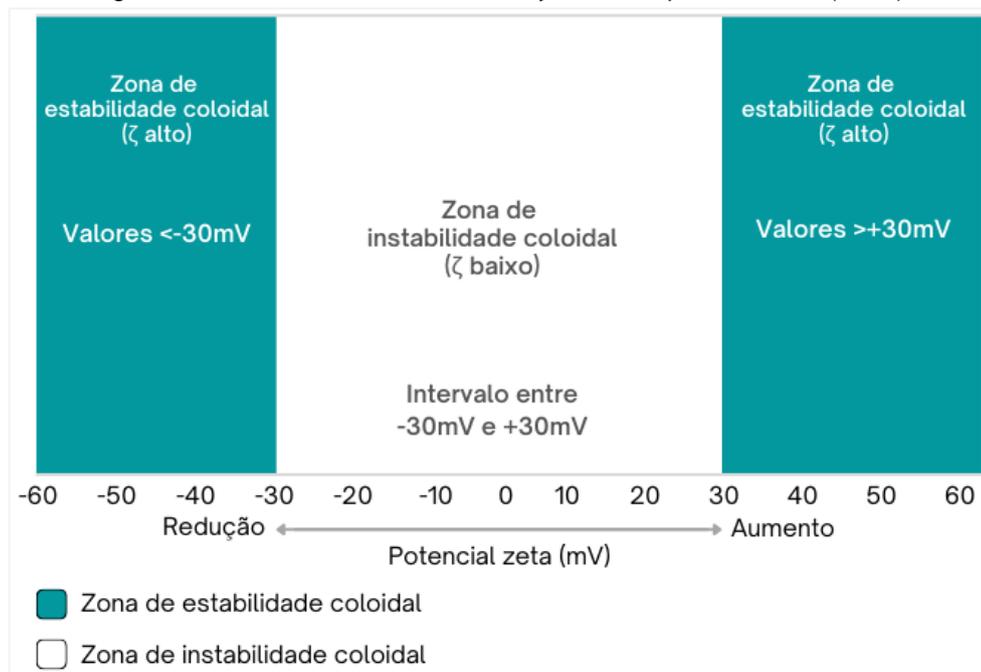
⁵ Os surfactantes são substâncias que carregam uma carga positiva (catiônicos) ou negativa (aniônicos), que conforme são absorvidos, quebram interações de tensão superficial para estabilizar a interface ar-água ou óleo-água (AWAN *et al.*, 2022).

Dessa forma, os autores supracitados evidenciaram que os cátions divalentes têm a capacidade de neutralizar melhor a carga da superfície mineral do que os monovalentes, resultando em um ζ menor. Situação diferente se a presença de cátions monovalentes for maior, fato que promoverá um ζ de maior magnitude, ocorrendo forte interação repulsiva entre as partículas de argila, impedindo a agregação e formando estruturas de argila do tipo dispersa (DARROW; GUO; TRAINOR, 2020).

Os valores de estabilidade e instabilidade de potencial Zeta são definidos segundo os padrões estabelecidos pela empresa *Malvern*. Esta empresa é referência na criação de tecnologia nas mais variadas áreas e faz parte do *Spectris Plc*, grupo líder mundial de medição de precisão (MALVERN PANALYTICAL, 2022). Em seu catálogo de medidas, Malvern (2013) estabelece o parâmetro para a análise do potencial Zeta, considerando que a estabilidade das partículas coloidais ocorre na faixa de valores maiores ($>$) que +30mV e menores ($<$) que -30mV.

Para um melhor entendimento, a Figura 12 indica os valores para as zonas de estabilidade e instabilidade coloidal.

Figura 12 – Parâmetro de valores de ζ definidos pela Malvern (2013).



Fonte: Autora.

Nesse seguimento, um ζ baixo, em zona de instabilidade, permite a agregação dos coloides pelas forças de *Van der Waals* (NEVES, 2018). Por outro lado, ainda

segundo a autora, quando ζ for mais elevado, a suspensão será considerada estável, indicando que as partículas carregadas estão se repelindo, superando tais forças e formando uma estrutura dispersa.

Existem problemáticas relacionadas a floculação e a dispersão dos coloides que dependem, especificamente, do uso para o qual o solo será destinado. Melo, Machado e Tavares Filho (2020), destacaram em seu estudo que a floculação/coagulação de coloides aumenta a porosidade do solo, elevando a permeabilidade e a capacidade de retenção de água, o que favorece o crescimento radicular.

Por outro lado, a dispersão dos coloides impede o crescimento de raízes de plantas e o movimento de água no perfil, auxiliando na compactação subsuperficial do solo (MELO; MACHADO; TAVARES FILHO, 2020), aumentando sua resistência (LEAL *et al.*, 2019).

Aliás, como ressaltado em momentos anteriores, vários elementos influenciam na estabilização dos coloides, algo observado em diversos trabalhos atuais, cujos pontos principais das investigações de alguns autores são imprescindíveis destacar.

É caso do estudo de Méndez *et al.* (2018), pesquisadores da Universidade Autônoma do Estado de Hidalgo, no México, por exemplo, que abordou a recuperação de solos salinos com aditivos orgânicos. Foi observado que, com a presença destes aditivos, os coloides do solo se tornaram mais estáveis levando a valores de potencial Zeta mais negativos (variando de -11,64 para -28,40mV).

Como constatado pelos autores, ainda que o acúmulo de matéria orgânica tenha fornecido mais cargas negativas à fração argilosa aumentando a repulsão entre as partículas e, conseqüentemente, o seu potencial Zeta, a matéria orgânica também provocou a mudança de pH ácido para alcalino. Isto gerou um aumento de cargas positivas e diminuição de cargas negativas deixando o sistema mais equilibrado, fator que impediu um aumento expressivo de ζ que permaneceu dentro da faixa de instabilidade (MÉNDEZ *et al.*, 2018).

Já em uma outra pesquisa acerca da influência da mineralogia no potencial Zeta em um ambiente de salinidade, Awan *et al.* (2022), da Universidade Edith Cowan, na Austrália, realizaram duas medições de cargas em uma rocha de arenito, executando o primeiro experimento com duas amostras (uma pobre e outra rica em

argila) sem adição de surfactantes, e o outro experimento com adição de SDBS e CTAB⁶.

Inicialmente, a amostra pobre em argila foi tratada termicamente para se obter um alto teor de quartzo, enquanto na outra amostra foi mantido um alto teor de caulinita (AWAN *et al.*, 2022). Antes da adição dos surfactantes, segundo os autores, a amostra que continha argila com caulinita obteve um ζ com valores em -31mV; enquanto a amostra com quartzo obteve apenas -13mV. Além disso, no segundo experimento, com o acréscimo dos surfactantes, os ânions de SDBS se ligaram a superfície da sílica da amostra, reduzindo sua carga de superfície e, conseqüentemente, seu potencial Zeta, alterando seus valores de -22,26 mV para -41,86mV (AWAN *et al.*, 2022).

Já na pesquisa de Hidayat *et al.* (2022), pesquisadores da Universidade de Aberdeen, no Reino Unido, ao medir o potencial Zeta em um arenito argiloso utilizando como solução o NaCl, apontaram em seus resultados que a caulinita, albita e illita presentes nas partículas, se dissolveram na solução aquosa liberando cátions multivalentes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} no eletrólito.

Através do acontecimento supracitado, foi possível obter um potencial Zeta mais positivo e estável, e para tal, os autores consideraram duas hipóteses: a primeira, a qual acredita-se que pode ter ocorrido a adsorção desses cátions; e a segunda, cujo valor de potencial Zeta foi alterado após a troca de cátions na superfície da amostra. Por fim, Hidayat *et al.* (2022) concluíram que o principal impacto no valor do ζ derivou da caulinita e da albita, devido possuírem uma maior área de superfície disponível para interações entre espécies iônicas minerais.

Outras influências nos valores de potencial Zeta têm sido estudadas, como é o caso discutido no trabalho de Darrow, Guo e Trainor (2020), citado em momento anterior. Ao analisarem o potencial Zeta em solos congelados tratados com cátions, constataram uma correlação linear entre o valor de ζ e a temperatura do solo argiloso.

Na argila não tratada, nos 20 °C, o potencial Zeta para a montmorilonita, caulinita e illita, variavam entre -32mV e -39mV, e à medida que a temperatura diminuía (6 °C), os valores de ζ passaram a variar entre -22mV e -34mV. Interessante que os autores destacaram que as medições de potencial Zeta indicaram uma maior correlação com

⁶ SDBS: surfactante aniônico, denominado dodecilbenzenosulfonato de sódio; CTAB: brometo de cetiltrimetilamônio (AWAN *et al.*, 2022).

a temperatura, do que com o pH nas condições testadas (DARROW; GUO; TRAINOR, 2020).

Em síntese, dentre o que foi identificado durante a leitura de trabalhos científicos, constatou-se que a mineralogia do solo em conjunto com outras substâncias, tem um impacto perceptível quando se trata das interações eletroquímicas na interface mineral, levando a alterações de íons do sistema que refletem na variação do potencial Zeta do solo estudado.

3.2.2. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Como apontado em discussões anteriores, em determinadas condições de temperatura, pressão e força iônica de um meio, todo processo químico ocorrerá até que o sistema em questão alcance o estado de equilíbrio. Nesta conjuntura, plantas, micro-organismos, minerais, agentes externos e a troca iônica são capazes de influenciar no equilíbrio dinâmico junto a solução do solo e dos constituintes coloidais (EMBRAPA, 2010).

Será no processo de troca iônica, inclusive, que substâncias catiônicas e aniônicas que estiverem presentes na solução do solo tendem a alcançar ao equilíbrio em companhia de outros elementos iônicos presentes nas superfícies dos coloides (BURITI *et al.*, 2019).

Isto posto, se torna imprescindível, considerando a temática deste trabalho, abordar sobre as características de um dos processos supramencionados, denominado de Capacidade de Troca Catiônica.

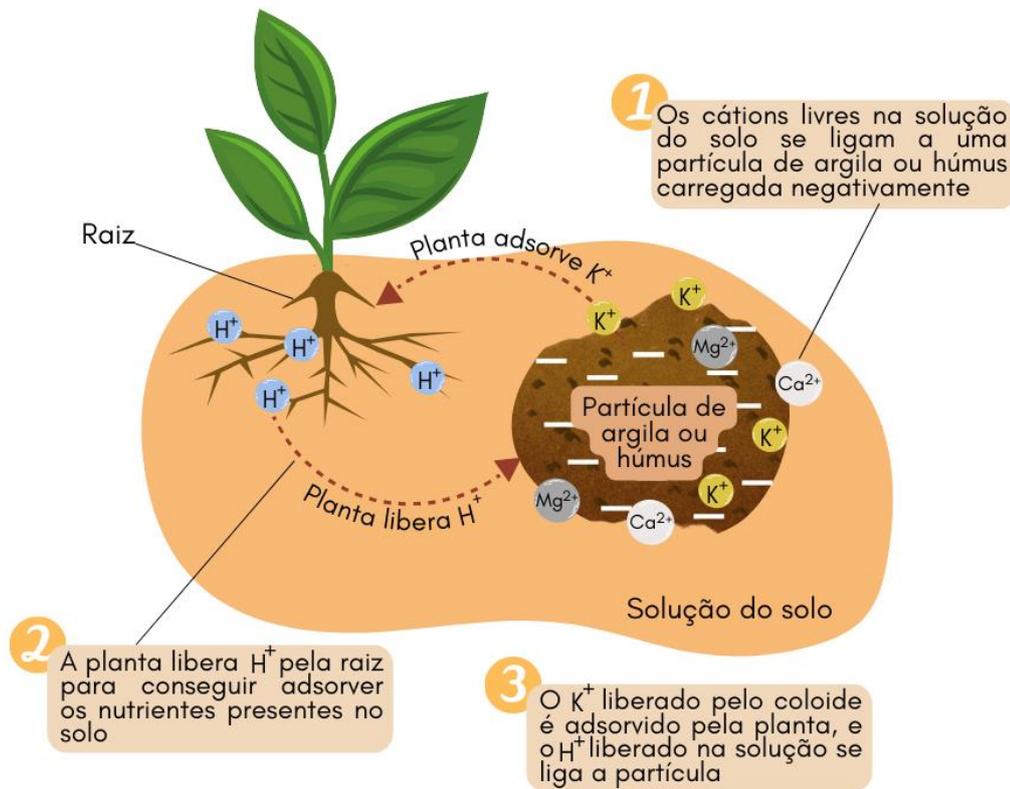
A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é uma propriedade eletroquímica que está ligada às concentrações de cátions passíveis de troca, que se encontram presentes na solução do solo e nos espaços sujeitos a realizar a troca nas interfaces coloidais de um sistema (TEODORO; PARABOCZ; ROCHA, 2020). Desse modo, resumidamente, a CTC diz respeito a quantidade de cargas negativas existentes em partículas capazes de armazenar íons positivos (cátions).

Como apresentado em tópicos anteriores, as partículas de solo, principalmente da argila, são constituídas de cargas negativas. Porém, no sistema em que se encontram, há também a presença de cátions (que possuem carga positiva), que se ligam à essas cargas negativas, perpetrando, assim, a Lei de Coulomb, a qual determina que dois corpos eletricamente carregados com cargas opostas tendem a ser atraídos um para o outro.

Quaisquer elementos adsorvidos pelos coloides do solo podem ficar disponíveis para espécies vegetais ou outras partículas presentes no meio, sendo que, esses cátions retidos podem ser comutados por outros cátions e, por isso, são intitulados como “trocáveis” (DUARTE *et al.*, 2019).

Na solução do solo, há íons livres e existem aqueles que foram adsorvidos, mantendo um equilíbrio entre os disponíveis e os retidos. Um exemplo que auxilia no entendimento deste equilíbrio, é quando há a presença de plantas no solo. As plantas absorvem nutrientes (como K^+ e Mg^{2+}) da solução do solo, e aqueles íons que estavam adsorvidos nela são liberados na solução, podendo ser atraídos para um colóide de uma argila (EMBRAPA, 2010). Para um melhor entendimento, o sistema de troca está ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Troca de cátions entre partícula de argila e uma planta.



Fonte: Autora.

Tal processo se relaciona diretamente com a estrutura da partícula. As argilas do tipo 2:1 possuem cargas do tipo permanentes, ou seja, suas cargas são derivadas do material de origem, não variam conforme o pH (potencial Hidrogeniônico; ver tópico 3.3.4) e são capazes de reter cátions (EMBRAPA, 2010).

Por outro lado, ainda conforme os especialistas da Embrapa (2010), os solos intemperizados transformam a argila em uma estrutura simples (1:1 ou óxidos de ferro e alumínio), que não possui cargas permanentes e são dependentes do pH, deixando cátions mais livres na solução, que podem ser levados pela água no processo de lixiviação (ver tópico 3.3.2).

No processo de troca, surge então uma relação entre a acidez e a CTC. Em tal caso, as chamadas “substâncias ácidas” são aquelas que liberam íons hidrogênio H^+ em solução aquosa, logo, em um solo ácido, se pode afirmar que existe grande quantidade de H^+ dissolvido em suas partículas (MORAIS *et al.*, 2020). Ainda segundo os autores, como consequência da ação supracitada, se há muitos íons H^+ ocupando cargas negativas nos coloides, não há margem para outros íons.

Inclusive, esse cenário ocorreu e foi relatado no trabalho de Teodoro, Parabocz e Rocha (2020), que ao estudarem o argilomineral vermiculita para fins de adsorção de contaminantes, concluíram que a vermiculita apresentava alta capacidade de troca catiônica quando presente em um solo com solução básica. É em função disso que um solo ácido é intitulado como solo pobre em nutrientes, devido suas cargas serem ocupadas por íons H^+ , ocasionando uma CTC mais baixa.

A situação supracitada foi observada no experimento de Zanin *et al.* (2021). Utilizando amostras encharcadas com soluções alcalinas e ácidas, os autores verificaram que o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ passaram por trocas menos expressivas no meio, o que levou a diminuição substancial da CTC, cuja explicação foi atribuída pela adição de íons a solução do solo.

Da mesma forma, no trabalho de Rebêlo *et al.* (2020), os autores avaliaram um solo da região Amazônica, a 60 km ao norte de Manaus (AM), que apresentou baixos valores de pH, constatando que o solo em questão era ácido. Essa condição foi atribuída devido a região ser tropical com alta precipitação pluviométrica, fazendo com que elementos como Ca^{2+} e Mg^{2+} fossem lixiviados das camadas superiores e substituídos posteriormente pelos íons H^+ .

Os autores supracitados também salientaram os baixos teores disponíveis⁷ (em $mmol_c kg^{-1}$) de alguns elementos encontrados nesse solo, como cálcio (1,10), magnésio (1,00), potássio (0,90), sódio (0,60) e alumínio (18,20). No caso, quanto a

⁷ O termo “ $mmol_c kg^{-1}$ ” indica milimol de carga por kg, sendo o mol o valor da massa atômica do elemento químico em g ou kg dividido pela valência. Após o resultado, divide-se por cem para obter o valor final em centimol, ou divide-se por mil para obter o valor final ser em milimol (EMBRAPA, 2010).

atividade de troca de cátions, a seguinte ordem foi visualizada nas amostras: $Al > Ca > Mg > K > Na$. Rebêlo *et al.* (2020) já esperavam esse alto valor de Al trocável, devido a ação do intemperismo dos minerais primários e secundários de rochas, que contribui para a formação de alumino silicatos.

Ademais, alguns argilominerais possuem valores comuns mesmo em solos de regiões diferentes. Buriti *et al.* (2019), ao analisar argilas em variadas localidades no Brasil, encontraram valores padrões de CTC quando comparados com valores da literatura, destacando em seus resultados, por exemplo, que uma amostra de solo que aponte uma CTC maior que $700 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$, indica maior presença de montmorilonita. Além disso, os ensaios físico-químicos mostraram uma variação para a caulinita entre 30 e $150 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$, e para a esmectitas, de 800 a $1500 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$.

Os autores supramencionados justificam que as argilas caulínicas apresentaram uma CTC menor que as argilas esmectíticas em razão da sua estrutura, uma vez que o empilhamento das camadas de montmorilonita é imperado pelas forças de van der Waals, de onde se estacionam placas com cargas negativas geradas pelas substituições isomórficas, conferindo às esmectitas maior troca catiônica. Já as caulinitas, por sua vez, quase não têm substituições isomórficas devido suas camadas serem ligadas por pontes de hidrogênios, sendo bem mais resistentes, levando-as a ter uma menor CTC (BURITI *et al.*, 2019).

Além dos argilominerais, a troca de cátions também ocorre devido a presença de matéria orgânica do solo (MOS), a qual é constituída por compostos originados da decomposição de resíduos vegetais e animais. Após passar por um processo de decomposição, a MOS passa a ser denominada de substância húmica (húmus), adquirindo carga variável em função do pH (MACEDO NETO *et al.*, 2020).

Ainda segundo os autores, há tempos que a relação direta entre o aumento da matéria orgânica e a CTC do solo tem sido estudada em virtude da matéria orgânica, assim como os argilominerais, possuem em sua superfície cargas negativas, auxiliando no processo de CTC em solos ácidos.

Essa relação entre os conteúdos de cátions e a matéria orgânica foi observada no trabalho de Novak *et al.* (2021), o qual em todos os solos analisados (entre ácidos e básicos) houve um aumento no valor da capacidade de troca de cátions nos locais em que a presença de MOS era superior, principalmente em solos que continham baixos teores de argila.

Desse modo, depreende-se que a presença de heterogeneidades no solo podem afetar também a sua troca de cátions, sugerindo que não basta apenas realizar a análise individual considerando apenas os argilominerais presentes, mas também outros atributos como a matéria orgânica e o pH da solução do solo.

3.3. Sensibilidade das argilas

Argilas sensíveis são tipos de solos moles comumente restritos a sedimentos glaciomarinheiros presentes em algumas áreas do globo, com bastante ocorrência no Canadá, Alasca e Noruega (ELSAWY; ALSHAREKH; SHABAN, 2022). Ainda segundo os autores, estes solos são verdadeiros desafios para engenheiros, uma vez que apresentam complexidade na sua formação e dificuldades para se obter seus parâmetros geotécnicos.

No Brasil, os estudos de depósitos de argilas moles são realizados em locais da costa brasileira, ocorrendo principalmente em cidades como a Baixada Santista (SP), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES), Sergipe (SE) e em Belém (PA), cuja presença de argilas sensíveis são bastantes correntes em áreas de várzea (FERREIRA *et al.*, 2022).

Nesse caso, Ferreira *et al.* (2022), pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco, salientam que a estratigrafia do subsolo do local é de fundamental importância para se avaliar a sensibilidade (St).

No caso da pesquisa dos autores supracitados realizada em uma área de Recife (PE), foi constatado que a cidade, em termos geológicos, fazia parte da Formação Barreiras, que apresenta sedimentos fluviomarinheiros, o que indica que o solo depositado através da intercalação da ação do mar e dos rios é rico em matéria orgânica, além de ser um tipo de solo com alto teor de saturação, sendo fatores de influência na formação do solo mole desta região (MACHADO; PINHEIRO, 2021).

Sob tal lógica, a princípio, deve-se trazer a definição do termo “sensibilidade” quando aplicado no campo em discussão. Assim, para fins de entendimento, na literatura, a sensibilidade do solo se refere à perda de resistência ao cisalhamento após ser submetido a carregamentos ou descarregamentos (GEERTSEMA *et al.*, 2018).

Como citado em tópico anterior, a resistência do solo está intimamente ligada ao arranjo de seus grãos, que pode ser disperso ou floclado. No caso das argilas

sensíveis, estas apresentam uma estrutura floculada que tende a dispersão, à qual é intitulada como estrutura metaestável (GEERTSEMA *et al.*, 2018).

Tal metaestabilidade pode ser mantida por meio das forças de atração (ligações iônicas), quando o arranjo está seco, fazendo com que as moléculas continuem “presas” (OLIVEIRA, 2018). No entanto, segundo a autora, se a umidade aumenta, as ligações ficam fracas e as forças repulsivas começam a perturbar o arranjo metaestável, diminuindo a resistência e levando ao fenômeno de colapso da estrutura.

É algo peculiar da estrutura floculada um índice de vazios elevado, que normalmente é preenchido com água em caso de solo saturado (DAS; SOBHAN, 2019). Inclusive, os autores destacam que devido a formarem flocos com vazios maiores, as argilas marinhas podem desenvolver altos valores de sensibilidade.

Em termos de números, a sensibilidade (St) pode ser indicada por meio da razão entre a resistência do solo indeformado e a resistência do solo amolgado⁸ (DAS; SOBHAN, 2019). Existem várias classificações de uma argila quanto à sua sensibilidade na literatura. Porém, o primeiro critério clássico foi estabelecido por Skempton e Northey (1952). A proposta destes autores está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação da sensibilidade.

Sensibilidade (St)	Classificação
1	argilas insensíveis
1 a 2	argilas de baixa sensibilidade
2 a 4	argila de média sensibilidade
4 a 8	argila sensível
Maior que 8	argila extrassensível
Maior que 16	<i>quick clays</i>

Fonte: Skempton e Northey, 1952.

Para a maioria das argilas, conforme observado na literatura, os valores de sensibilidade variam entre 1 e 8. Contudo, depósitos marinhos altamente floculentos,

⁸ De acordo com Gonçalves (2022), o processo de amolgamento se refere ao amassamento da argila em todas as direções, sem ocorrência de alterações em seu teor de umidade. Segundo o autor, o amolgamento pode desfazer a estrutura original do solo, ou em outras palavras, pode vir a eliminar as ligações presentes que foram concebidas desde a sua formação.

como asseverado no trabalho de Ruge, Molina-Gómez e Rojas (2019), podem atingir valores entre 10 e 80. Nesse caso, argilas muito sensíveis, cujos valores de St ultrapassam 16, são comumente chamadas de “*quick clays*”, numa tradução literal são chamadas de argilas rápidas, devido a rápida perda de sua força de cisalhamento (RUGE; MOLINA-GÓMEZ; ROJAS, 2019).

Ademais, deve-se ressaltar que, amostras de argilas coletadas em uma mesma área podem vir a apresentar valores de resistência divergentes para um valor de sensibilidade análogo, ou apresentar valores divergentes tanto de resistência quanto de sensibilidade.

Na pesquisa de Elsway, Alsharekh e Shaban (2022), das Universidades de Aswan e Qassim, no Egito, por exemplo, os autores coletaram 111 amostras de solo mole ao norte do rio Nilo para avaliar algumas características do substrato da região. Ao final da pesquisa, foi constatado uma variação de valores em termos de sensibilidade, entre 2,5 e 28,6; e, em termos de resistência ao cisalhamento não drenado da argila sensível, os valores variaram em uma classificação de muito macio a macio (5 kPa – 45 kPa), demonstrando uma diversidade de resistência e sensibilidade de amostras de um mesmo solo.

Além disso, com relação às conclusões alcançadas, os autores supracitados enfatizaram que aumentar o teor de água natural causa uma diminuição na força coesiva entre as partículas do solo, levando à atenuação da consistência do solo e redução da resistência ao cisalhamento. Desta forma, se aumentar a densidade seca para que ocorra a diminuição de poros entre as partículas sólidas e a taxa de vazios, conseqüentemente possibilitará um incremento na resistência ao cisalhamento não drenado⁹ (ELSAWY; ALSHAREKH; SHABAN, 2022).

Nesse viés, afirma-se que a sensibilidade fornece uma informação acerca do comportamento do solo, não podendo ser empregada como parâmetro para determinar de forma exata o valor da resistência. Contudo, ainda que a sensibilidade seja retratada apenas por um valor numérico, é muito relevante denotar como ocorre a perda desta resistência.

Dessa forma, ressalta-se que variados fenômenos podem levar ao surgimento da estrutura metaestável em algumas argilas, sendo que, na literatura, sobressaem-

⁹ Em solos finos, uma das propriedades de grande interesse no âmbito geotécnico é a resistência não drenada, sendo entendida como a resistência ao cisalhamento oferecida pelo solo, sem condição de drenagem da água presente nos interstícios (VIEGAS *et al.*, 2014).

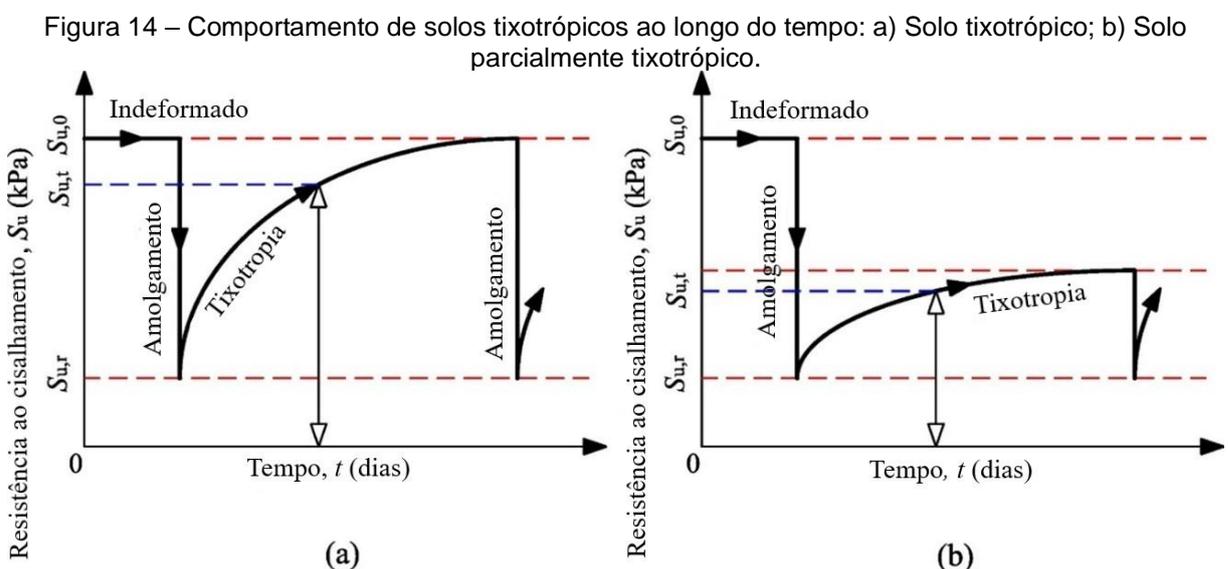
se a tixotropia, lixiviação, intemperismo e o pH. Decerto, argilas classificadas com um grau de “alta sensibilidade” provavelmente foram expostas a mais de um dos processos supramencionados, pois, conforme Gonçalves (2022), cada um destes mecanismos possui certa limitação quanto a sua capacidade de atuação.

3.3.1. Tixotropia

O termo “tixotropia”, conforme Sampo (2019), foi usado primeiramente para definir a capacidade que o solo tem de vir a apresentar um comportamento plástico mesmo em um estado indeformado, ao passo que se comporta como um líquido depois de ser amolgado, sem alterar seu teor de umidade.

Com relação as argilas, Skempton e Northey (1952), pioneiros nessa área de estudo, definiram a tixotropia como sendo o processo no qual as estruturas dispersas se transformam, após determinado tempo, em estruturas floculadas a partir da distribuição homogênea do tamanho dos poros em função do movimento das partículas.

Segundo Ren *et al.* (2021), pesquisadores da Universidade de Dalian, na China, um solo que seja indicado como tixotrópico é aquele capaz de readquirir toda a sua resistência original, mesmo após passar pelo processo de amolgamento (remodelagem). No caso, sua resistência ao cisalhamento possui valor máximo quando está num estado indeformado, decai até atingir o valor mínimo após ser amolgado e, aos poucos, recupera seu valor inicial de resistência ao longo do tempo (REN *et al.*, 2021). O processo de tixotropia pode ser observado na Figura 14, a seguir.



Fonte: Ren *et al.*, 2021.

No amolgamento da argila, os autores Shahriar, Abedin e Jadid (2018), ao avaliarem, com testes de cisalhamento, a remodelação no sistema argila-água para investigar o efeito tixotrópico, constataram que, as forças interpartículas tem alta tendência ao desequilíbrio. Entretanto, ainda segundo os autores, estando em repouso, os potenciais de atração e repulsão no interior da argila voltam-se, novamente, em busca do estado de equilíbrio tentando recuperar a resistência inicial.

O entendimento adquirido quanto ao tema é que, antigamente, confiava-se que a tixotropia era um mecanismo capaz de explicar inteiramente a sensibilidade presente nos solos argilosos. Mas, à luz da percepção de Sampo (2019), os cientistas tinham em mente que os depósitos de argilas, pelo fato de terem estado em repouso por tanto tempo, permaneceriam num estado natural livres de amolgamento, levando estes solos a estarem com sua resistência no nível máximo.

Não obstante, observou-se na literatura solos parcialmente tixotrópicos, isto é, amostras de argilas coletadas que não estavam recuperando sua resistência ao cisalhamento de sua estrutura indeformada de forma integral.

O caso supramencionado foi constatado no estudo de Ruge, Molina-Gómez e Rojas, (2019), realizado na cidade de Madri, na Colômbia. O solo da região, conforme os autores, apresenta várzeas, o qual constitui argilas pouco estruturadas.

Na coleta de amostras, as que eram do mesmo furo foram nomeadas utilizando os números 1 e 2, e a sensibilidade de amostras indeformadas e amolgadas foi avaliada a partir do ensaio de compressão não confinada e testes de palhetas de laboratório (RUGE; MOLINA-GÓMEZ; ROJAS, 2019). Os resultados da sensibilidade da amostra antes e depois da remodelação (que incluiu a técnica de compactação e raspagem) podem ser observados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Resultados de sensibilidade para amostras indeformadas (S_{un}) e amolgadas (S_{re}).

Sample	Aging	S_{un}(kPa)	S_{re}(kPa)
B3_1	0	79.2	28.1
B3_2	0	65.5	23.9
B1_1	15	64.4	20.3
B1_2	15	57.4	18.3
B2_1	30	58.5	19.8
B2_2	30	57.2	19.4
B4_1	60	55.5	22.0
B4_2	60	54.6	21.3

Notas: S_{un} (resistência indeformada); S_{re} (resistência amolgada).

Fonte: Adaptado de Ruge, Molina-Gómez e Rojas, 2019.

Como pode ser observado nos resultados, houve uma queda nos valores de sensibilidade, mesmo nas amostras indeformadas, com o solo sendo incapaz de recuperar totalmente a sua resistência ao cisalhamento, tendo sido classificado como parcialmente tixotrópico (RUGE; MOLINA-GÓMEZ; ROJAS, 2019).

Além disso, com o tempo se notou que o potencial e magnitude da tixotropia também dependia da composição mineral do solo. Ao testar e comparar diferentes minerais de argila, Skempton e Northey (1952) perceberam que o comportamento tixotrópico da bentonita era mais perceptível logo após um curto período de tempo; enquanto a caulinita quase não apresentava tixotropia e a illita demonstrava apenas um mero efeito (SKEMPTON; NORTHEY, 1952).

Foi a partir desse tipo de resultado, que muitos pesquisadores cogitaram a hipótese de que havia outros fatores capazes de provocar a sensibilidade; fatores esses que serão discutidos a posteriori.

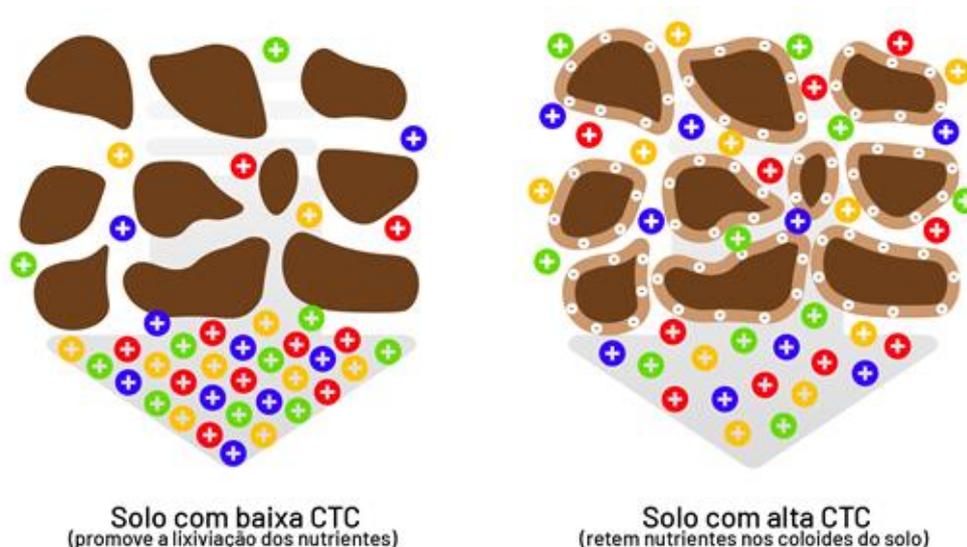
3.3.2. Lixiviação

A lixiviação é entendida como um processo pelo qual há a extração e solubilização de elementos químicos que se fazem presentes na constituição do solo (FAN *et al.*, 2021). No meio natural, o fluxo constante da água pura, por exemplo, auxilia na remoção de íons contidos na estrutura da dupla camada difusa da partícula do solo argiloso, favorecendo o desbalanceamento elétrico no ambiente (DIAS, 2019).

É importante destacar que a CTC do solo é um parâmetro que influencia diretamente na taxa de lixiviação dos seus componentes químicos. Com o aumento da CTC, há uma maior retenção de nutrientes do solo, que são disponibilizados para absorção pelas plantas, por exemplo, tornando este solo mais sensível e inapropriado para algumas construções (SOBHAN, 2019).

Um solo como a argila, que possui baixa CTC, indica que este solo tem pequena capacidade de reter cátions trocáveis, desequilibrando as partículas e acarretando numa lixiviação mais severa (FAN *et al.*, 2021). Uma ilustração de ambas as situações citadas pode ser observada na Figura 15, a seguir.

Figura 15 – Representação da retenção ou lixiviação de nutrientes a partir da CTC do solo.



Fonte: Veloso, 2022.

Sampa (2019) explica de forma simplificada como funciona o mecanismo de gênese da estrutura metaestável por intermédio da lixiviação. Segundo o autor, ao se ter uma estrutura floculada e, através da penetração interior de água adsorvida nas camadas das partículas, estas tendem a criar um contato efetivo entre si. Porém, após ocorrer a lixiviação, a dupla camada difusa, antes muito condensada em função da quantidade abundante de íons, passa por uma redução em sua espessura, o que favorece o aumento da parcela de água livre ou intersticial na sua atual configuração (SAMPA, 2019).

Se o solo não receber perturbações intensas, é provável que a estrutura da argila permaneça do mesmo modo, conservando a forma de contato entre os grãos (JIN *et al.*, 2021). Entretanto, como assevera Das e Sobhan (2019), como a água livre advinda da lixiviação não se harmoniza no arranjo floculado do solo, qualquer deformação fará esta estrutura entrar em colapso. Desta maneira, ocorre a mudança do arranjo floculado para o disperso, que altera significativamente a forma de contato entre os grãos e, por consequência, a resistência da argila (DAS; SOBHAN, 2019).

A exemplo, Wu *et al.* (2020), pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Hefei, na China, em seu estudo do recalque do solo em duas rodovias na província de Jiangsu, constataram que a lixiviação diminuiu a resistência ao cisalhamento remoldado da argila marinha mole, levando a uma alta sensibilidade. Os autores obtiveram valores maiores de sensibilidade para a rodovia que se encontrava na região distante do litoral, a qual havia passado pela lixiviação de salinidade.

Ainda, no estudo de Deng *et al.* (2018), foi indicado que a salinidade da água intersticial tem um efeito relevante no limite de liquidez (LL) de argilas moles marinhas, principalmente naquelas que possuem minerais sensíveis à salinidade, como a montmorilonita. Os autores concluíram que o processo de lixiviação de salinidade da água leva a alterações graduais no limite de liquidez, permitindo com que o solo não chegue ao estado plástico, permanecendo com uma resistência ao cisalhamento praticamente nula.

Já Zhang *et al.* (2019) em seu estudo de argilas em regiões costeiras, destacam que quando se trata da caulinita, quaisquer limites de consistência permanecem constantes independentemente da lixiviação ou da salinidade da água; diferente da bentonita, cuja alteração com relação ao limite de liquidez é diminuída mediante o aumento da salinidade.

Ademais, cabe ressaltar que os resultados com relação ao efeito da lixiviação em solos argilosos varia de um estudo para o outro em função de suas propriedades minerais e, portanto, não se pode ater aos resultados de forma insólita.

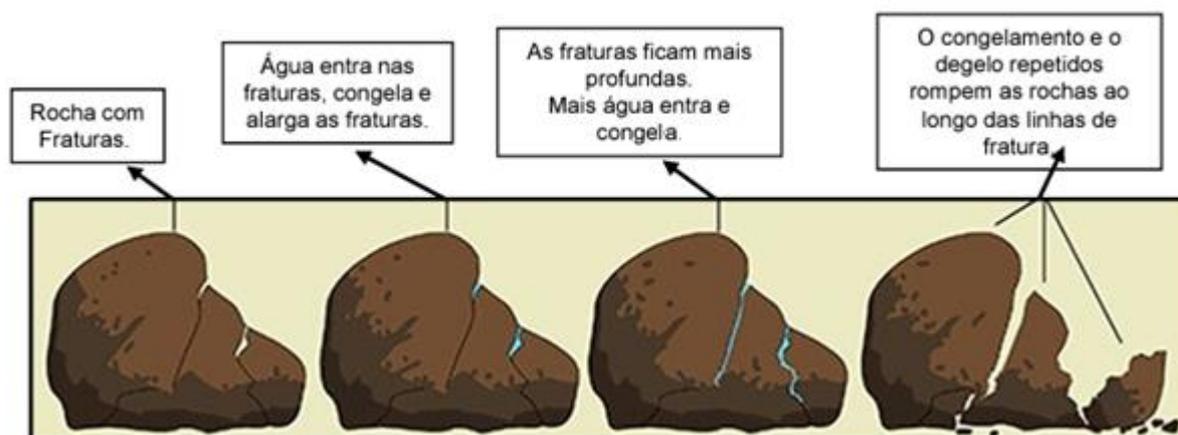
3.3.3. Intemperismo

Como apontado por Elert e Rodrigues-Navarro (2022), o intemperismo atua de forma semelhante ao processo de lixiviação, visto ser capaz de modificar a concentração de íons no solo, o que pode afetar o equilíbrio elétrico da estrutura floculada.

Em seu livro sobre o estudo dos solos, Lepsch (2021) define intemperismo como sendo o processo ou conjunto de processos químicos, físicos ou mesmo biológicos, que leva a alteração e desgaste das rochas expostas na superfície terrestre. Além disso, o autor enfatiza que os principais agentes do intemperismo são a temperatura, clima, ação dos ventos, da água, e ação humana. A influência desses agentes pode ser observada na Figura 16, a seguir.

A insolação produzida durante o dia e o resfriamento produzido durante a noite, conduz a uma variação de temperatura que influencia na desintegração das rochas, por meio da expansão e contração do material, levando a sua fragmentação em partículas granulares (GRECCO, 2019).

Figura 16 – Processo de intemperismo físico.



Fonte: Bacci, 2021.

No que tange ao solo, o processo de intemperismo retira íons da estrutura dos argilominerais e contribui para atenuar a repulsão entre as partículas de argila (ELERT; RODRIGUES-NAVARRO, 2022), fundamental para existir a metaestabilidade, auxiliando na produção de um solo sensível. Lepsch (2021) complementa que o produto do intemperismo, após a remoção de cátions básicos e sílica, leva a um resíduo rico em alumínio e ferro, principalmente, gerando um solo mais ácido.

3.3.4. Interferência do potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial Hidrogeniônico, também conhecido apenas por pH, é considerado como um dos fatores que mais influencia a composição da solução do solo, em virtude da possibilidade de ser alterado por atividades humanas via deposição de substâncias ou pela utilização de métodos de fertilização (NEVES, 2018).

Basicamente, essa propriedade química mede o grau de acidez de uma solução, sendo definido segundo o teor de íons hidrogênio livres por unidade de volume (DIAS, 2019).

Nesse viés, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2010) divulgou os valores de pH e seu respectivo grau de acidez a serem considerados nos solos brasileiros. Os valores podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de acidez do solo.

Acidez	pH em solução de CaCl ₂	Acidez	pH em solução de H ₂ O
Acidez Muito alta	≤ 4,3	Acidez elevada	≤ 5,0
Acidez Alta	4,4 – 5,0	Acidez Média	5,0 – 5,9
Acidez Média	5,1 – 5,5	Acidez fraca	6,0 – 6,9
Acidez Baixa	5,6 – 6,0	Neutro	7,0
Acidez Muito baixa	6,1 – 7,0	Alcalinidade fraca	7,1 – 7,8
Neutro	7,0	Alcalinidade elevada	> 7,8
Alcalino	> 7,0	-	-

Fonte: Embrapa, 2010.

Geralmente, os solos ácidos pertencem às regiões úmidas (solos argilosos), como margens de rios e pântanos, onde o pH comumente é inferior a 6,5 (GONÇALVES, 2019). Esses solos possuem pouca quantidade de cálcio e magnésio, além da presença de substâncias tóxicas como alumínio (GONÇALVES, 2019).

A variação do pH do solo também ocorre em decorrência da decomposição da matéria orgânica, análise realizada por Chig *et al.* (2018), do qual concluíram que tal fenômeno eleva a concentração de H⁺ devido a atividade microbiana, deixando os solos em uma faixa de pH ácido menor que 5,5.

Buscando encontrar uma relação entre o índice de colapso, pH e condutividade elétrica, Zanin *et al.* (2021) usaram diferentes fluidos de imersão (água, solução alcalina, água) em uma argila siltosa. Os resultados mostraram que os maiores valores de índice de colapso foram encontrados em testes com soluções ácidas e alcalinas, favorecendo a formação de uma estrutura floculada, típica de solos potencialmente colapsáveis.

Do contrário, Rebêlo *et al.* (2020) destacam que expor o solo argiloso a um pH baixo (menor que 7,0), favorece a decomposição de partículas de feldspato, mica e clorita em íons multivalentes que, posteriormente, ficam atados à superfície do argilomineral não alterado. Desse modo, a concentração de íons reduz a negatividade dos argilominerais, contribuindo para a formação da estrutura floculada, ou, em outras palavras, um valor baixo de pH não ajuda a formar a estrutura metaestável.

Em contrapartida, quando o meio está básico, Neves (2018) ressalta que há uma maior predisposição dos íons de hidrogênio da estrutura cristalina dos argilominerais serem dissolvidos, aumentando a eletronegatividade das partículas de

argila, ocorrendo, assim, um acréscimo da força de repulsão na estrutura, o que dificulta a refloculação após o processo de amolgamento, retirando a base da sensibilidade.

4 PERCURSO METODOLÓGICO

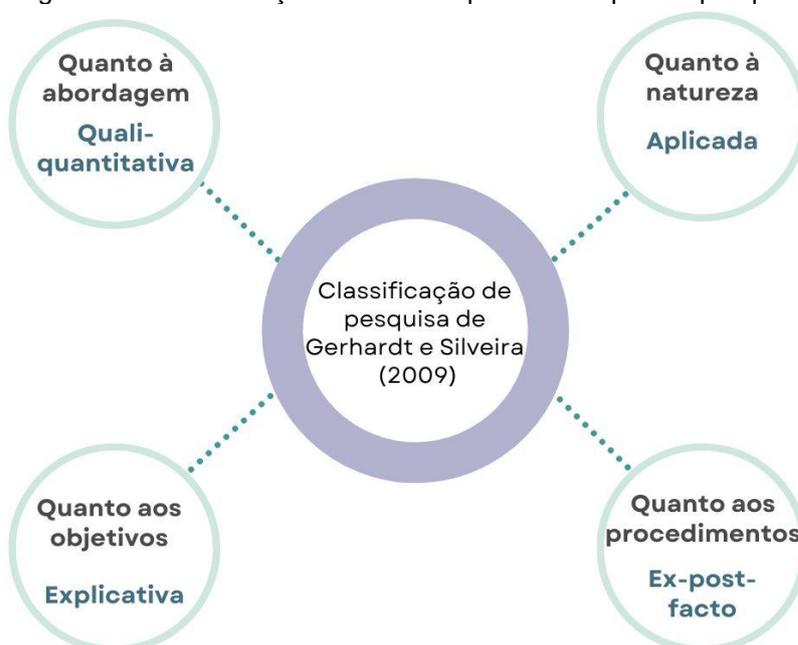
Nos tópicos que se seguem, são apresentadas as etapas que levaram a realização da presente pesquisa, sendo realizado, primeiramente, a classificação da pesquisa e, posteriormente, a indicação do local e os ensaios realizados.

4.1. Classificação da pesquisa

De acordo com Paschoarelli, Medola e Bonfim (2015), a ampliação do conhecimento científico é promovida por meio da pesquisa científica, a qual sujeita-se a presença de um problema a ser estudado. Para os autores, em virtude da existência de inúmeros métodos de pesquisa, é imprescindível ao investigador classificar o seu estudo para se ter um melhor entendimento dos seus objetivos propostos e, desta maneira, alcançar os resultados esperados.

O método do presente trabalho foi classificado conforme os “tipos de pesquisa” elencados no trabalho de Gerhardt e Silveira (2009). Em síntese, as autoras categorizam métodos quanto à abordagem, natureza, objetivos e procedimentos. Assim, a classificação deste trabalho pode ser conferida na Figura 17.

Figura 17 – Classificação do método quanto aos tipos de pesquisa.



Fonte: Autora.

Nesse sentido, por correlacionar dados na linguagem matemática, centrando-se na objetividade por meio de ensaios para obter variáveis e discutir a relação entre estas, a pesquisa caracteriza-se como quali-quantitativa. Ademais, em virtude deste trabalho se basear em objetivos pré-definidos, visando gerar conhecimentos para aplicação prática, envolvendo interesses de uma determinada região, compreende-se que esta é uma pesquisa de natureza aplicada.

Outrossim, por se tratar de um estudo que busca identificar fatores que contribuíram para a ocorrência de um determinado fenômeno, podendo assumir a forma de um estudo de caso ou pesquisa bibliográfica, a pesquisa também é qualificada como uma pesquisa explicativa. E, por fim, por ser uma pesquisa realizada em um local próximo onde ocorrera um acidente geológico, de modo a se entender a dinâmica do solo no evento, esta pesquisa pode ser classificada como Ex-post-facto.

4.2. Área de estudo

A área a ser estudada se encontra localizada no município de Santana, no estado do Amapá, o qual possui uma população estimada pelo IBGE (2021), de cerca de 124.808 pessoas. Parte da população é ribeirinha, vivendo em comunidades com casas erguidas sob pilotis de madeira, que vivem da pesca e carpintaria naval (SALGADO, 2019), mantendo estreitas relações com o Rio Amazonas, que contorna o município. Um exemplo da estrutura das habitações dos santanenses ribeirinhos, pode ser observado na Figura 18-a.

Figura 18 – Região de Santana-AP: a) Comunidade ribeirinha; b) Estaleiro nas águas entorno do município.

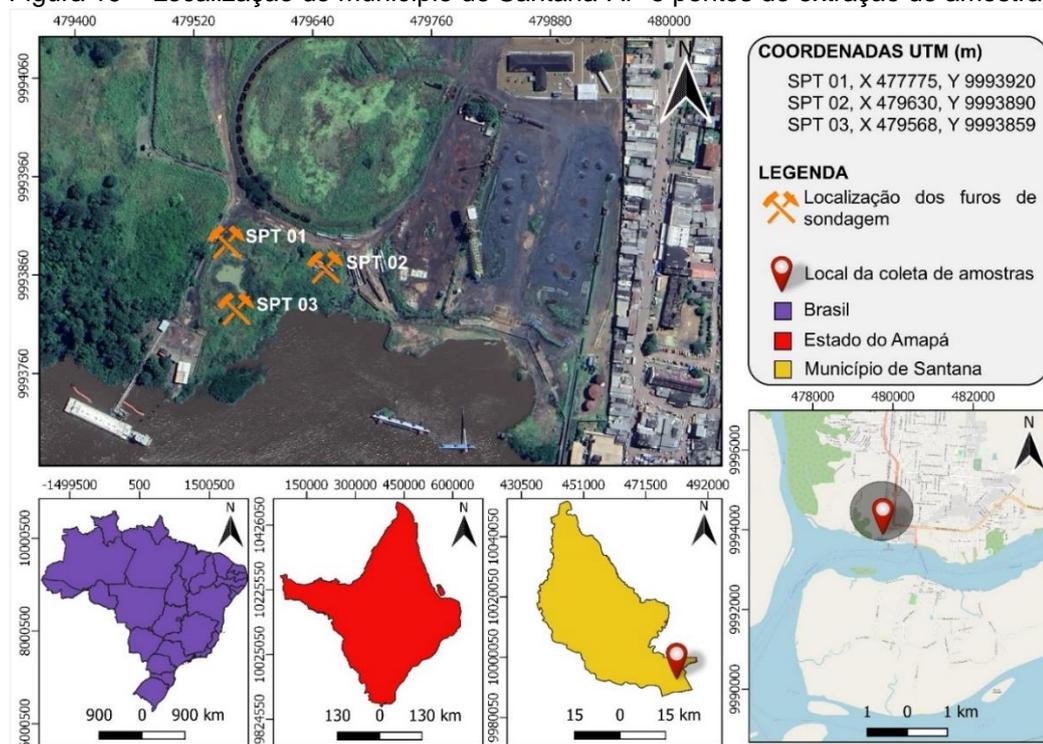


Fonte: Salgado, 2019.

Como o município possui um contexto portuário, é comum a presença de estaleiros pela região, como o da Figura 18-b, sendo avistados continuamente pela população de Santana.

O trabalho de campo para coleta de amostras foi realizado em campanhas geotécnicas pelo orientador deste trabalho e sua equipe, com as sondagens sendo concentradas nas proximidades de um local onde ocorreu a ruptura de parte de um talude, no ano de 2013. Em campo, foram realizadas sondagens SPT (*Standard Penetration Test*), SPT-01 a SPT-03 (TEIXEIRA *et al.*, 2019), cujo procedimento está detalhado em tópico posterior. Um mapa da localização da área de estudo pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Localização do município de Santana-AP e pontos de extração de amostras.



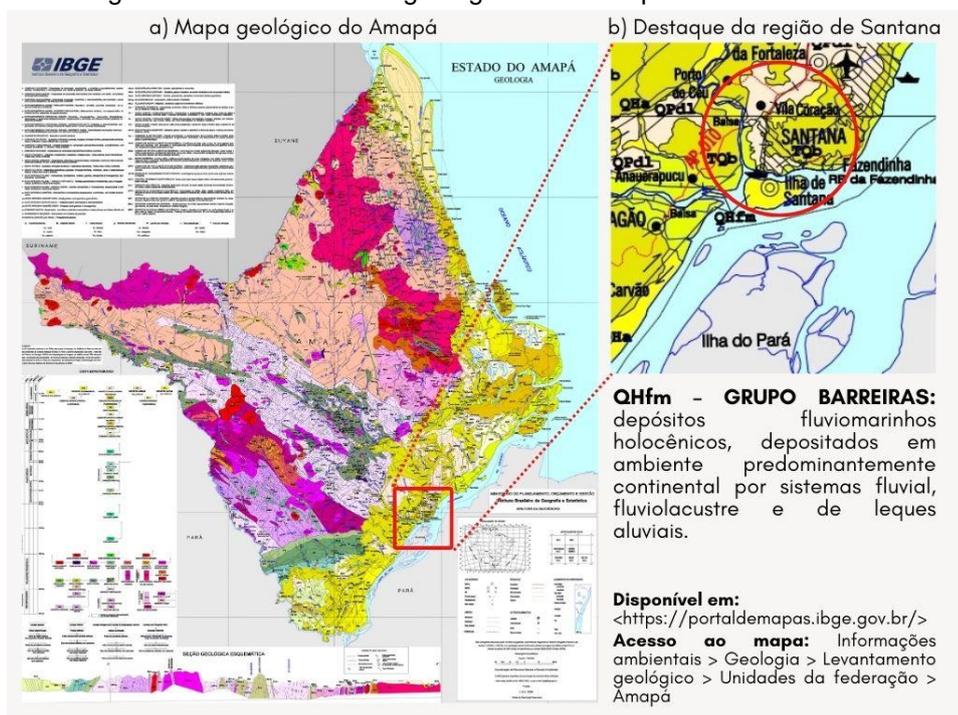
Fonte: Autora. Dados geográficos do IBGE (10/01/2023).

A região supracitada é interessante em função da ocorrência de argilas moles sensíveis ser algo recente na linha imaginária do equador, devido ser uma zona que se encontra longe das águas onde sucederam as glaciações. Porém, a foz do Rio Amazonas apresenta depósitos aluviais de sedimentos, principalmente de argilas moles com alta concentração do argilomineral caulinita, que têm direta relação com a dinâmica das marés, tanto do Rio Amazonas quanto do Oceano Atlântico (ABREU *et al.*, 2020).

Numa frequência contínua anual, ainda segundo os autores supracitados, o Rio Amazonas descarrega volumosa quantidade de sedimentos no Oceano Atlântico, os quais são erodidos da bacia hidrográfica e, posteriormente, são conduzidos em suspensão pelas águas (ABREU *et al.*, 2020).

Quanto a alguns aspectos geomorfológicos e geológicos, a área estudada está localizada na Planície Fluviomarinha Macapá, no domínio geomorfológico Sul, o qual é marcado pela influência de processos fluviais do rio Amazonas (colmatagem, paleocanais, lagos residuais, meandros abandonados, terraços e ilhas) e processos costeiros (maré de enchente), resultando em erosão e sedimentação, o que contribui para o desenvolvimento de planícies alagadas. No que concerne a geologia da região, esta pode ser observada na Figura 20, cujos dados foram obtidos no portal do IBGE (2004).

Figura 20 – Detalhamento geológico do município de Santana - AP.



Fonte: Autora. Dados: IBGE, 2004.

Como observado na figura anterior, a planície costeira do município de Santana é composta por terraços de terrenos do Grupo Barreiras, o qual é caracterizado por sedimentos argilo-arenosos (IBGE, 2004).

Em contato com os depósitos continentais do Grupo Barreiras, nas zonas mais baixas e alagadiças, se fazem presentes sedimentos fluviomarinhos holocênicos, predominantemente argilosos e com muita matéria orgânica (MACHADO; PINHEIRO, 2021).

4.3. Ensaios realizados

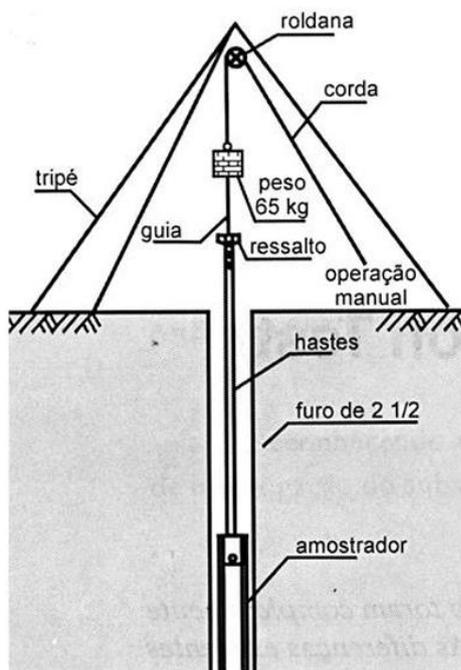
A princípio, para obtenção das amostras de solo e investigação do subsolo de Santana-AP, foi realizado um ensaio de SPT (*Standard Penetration Test*). A partir das amostras coletadas, foram realizados outros três ensaios sendo estes o difratometria de raios-X (DRX), potencial Zeta e análises químicas e de parâmetros físicos.

4.3.1. Ensaio de Penetração Padrão (SPT)

Os ensaios de SPT foram executados em conformidade com a norma brasileira NBR 6484 (ABNT, 2020) e complementares. O método utilizado consiste na abertura do furo de sondagem por meio de trados (trado concha – TC, trado helicoidal – TH) e/ou por lavagem (circulação de água – CA), e execução de ensaio de penetração de amostrador padrão (50,8 mm de diâmetro externo e 45 cm de comprimento), a cada metro (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

Uma vez que o amostrador esteja posicionado, a cravação é feita utilizando um martelo pesando 65 kg, que é içado e deixado cair de uma altura de 75 cm. Conta-se o número de golpes necessário para a cravação de cada 15 cm do amostrador. O resultado do ensaio, índice NSPT, é o número de golpes necessários à cravação de 30 cm do amostrador, após a cravação dos 15 cm iniciais. O esquema de execução pode ser observado na Figura 21, a seguir.

Figura 21 – Esquema de execução de ensaio de SPT.



Fonte: Schnaid e Odebrecht, 2012.

Foram executados em torno de 11 (onze) furos de sondagem de Ensaio de Penetração Padrão (*Standard Penetration Test* – SPT). As coordenadas, profundidades identificadas com a numeração ILHA-01 a ILHA-03A, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas e profundidade dos furos de sondagem.

Ilhas	Furo	Profundidade atingida (m)
ILHA-01	01	43
ILHA-02	02	51
ILHA-03A	3A	31

Fonte: Autora. Adaptado de Teixeira *et al.*, 2019.

Devido a quantidade de ensaios que iriam requerer muitas amostras, foram realizados alguns furos próximos um dos outros apenas para coleta de amostras. Devido a isso, os SPT's foram nomeados como “Ilhas de coletas”. Porém, para esta pesquisa, se utilizaram as amostras dos furos 01, 02 e 3A.

Todas as 55 amostras coletadas podem ser observadas na Figura 22, a seguir. As amostras do furo 07 não foram utilizadas para os ensaios de resistência, assim, não podem ser visualizadas na imagem apresentada.

Figura 22 – Conjunto de amostras (55 intervalos de testemunhos).



Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

As amostras de solo recuperadas do amostrador foram caracterizadas em campo por análise tátil-visual e enviadas ao Laboratório de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, localizado no Campus de Tucuruí,

4.3.2. Difractometria de Raios-X (DRX)

As amostras foram submetidas a análises mineralógicas através da técnica de ensaio denominada de Difractometria de Raios-X (DRX). O ensaio de DRX é utilizado para determinar estruturas cristalinas em materiais. A Difractometria é considerada um ensaio que complementa as análises químicas, auxiliando na determinação das propriedades químicas de um material (JIN *et al.*, 2021).

O funcionamento do ensaio consiste em um feixe de raios-X que é incidido sobre o material investigado, e a interação entre os elétrons e a matéria permite os raios penetrarem no material (ZHOU *et al.*, 2018). Ainda conforme os autores, os raios-X difratam em diferentes direções segundo a estrutura cristalina do elemento.

Na presente pesquisa, a identificação das fases cristalinas das amostras foi obtida com base nas medidas realizadas em um difratômetro de feixe divergente, modelo *Empyreon* da Malvern Panalytical, tubo de raios-X cerâmico de Co ($K\alpha_1=1,78896 \text{ \AA}$) e filtro $k\beta$ de Fe (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

As análises foram realizadas no LCM – Laboratório de Caracterização Mineral, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA, por uma equipe de laboratório do orientador. Um difratômetro semelhante ao utilizado no laboratório supracitado pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Difratorômetro modelo *Empyreon*.



Fonte: Caritat e Troitzsch, 2021.

As condições instrumentais utilizadas foram: varredura de 5° a 110° em 2θ ; voltagem de 40kV e corrente de 35mA; tamanho do passo $0,0263^\circ$ em 2θ , varredura de $3,0072^\circ$ a $94,9979^\circ$ em 2θ , tempo/ passo de 30,6s, fenda divergente: $\frac{1}{4}^\circ$ e antiespalhamento: $\frac{1}{2}^\circ$, máscara: 10mm (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

As amostras já preparadas previamente, tem ainda uma etapa de redução granulométrica. Elas são pulverizadas em “gral de ágata” até atingir a granulometria compatível para análise. Depois, são preenchidas em porta amostra específico do Difratorômetro da Panalytical, através do método *back-loading*.

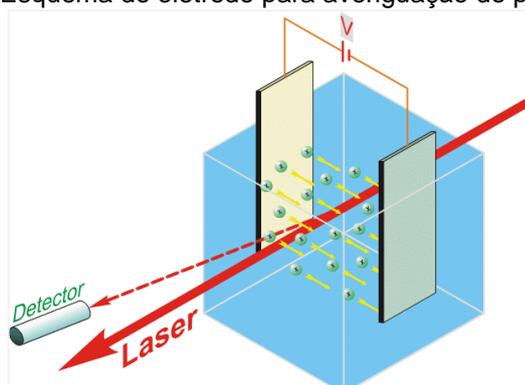
A identificação dos minerais é feita através da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) tanto no banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File*) como no COD (*Crystallography Open Database*).

4.3.3. Potencial Zeta

Como destacado em tópicos anteriores, o potencial Zeta mede a magnitude da repulsão ou atração das cargas entre partículas, indicando a sua estabilidade e oferecendo uma visão detalhada sobre as causas da dispersão, agregação ou floculação da amostra analisada (MALVERN, 2013).

Uma vez que o potencial Zeta não pode ser medido diretamente, utiliza-se a técnica da mobilidade eletroforética, a qual se caracteriza pela introdução, em uma cuba, de uma suspensão coloidal diluída com dois eletrodos, aplicando-se, posteriormente, um potencial elétrico (MALVERN, 2013), conforme observado na Figura 24. As partículas que possuem carga elétrica líquida irão mover-se em direção ao eletrodo de carga contrária, sendo que, quanto maior sua carga elétrica maior será o campo elétrico aplicado.

Figura 24 – Esquema do eletrodo para averiguação do potencial Zeta.



Fonte: Instrutécnica, 2018.

No trabalho em questão, a determinação do potencial Zeta foi feita a partir da técnica supracitada (mobilidade eletroforética) das partículas em suspensão (1 mg da amostra dispersa em 10 mL de água), medido sob tensão de polarização de 200 V em analisador de partículas, modelo *Litesizer 500*, marca *Anton Paar*. As análises foram realizadas Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, em Belém-PA.

4.3.4. Análises químicas e de parâmetros físico-químicos

Neste trabalho, foram realizados ensaios para determinação de alguns parâmetros do solo, como o valor do seu pH, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e quantidade de Matéria Orgânica do Solo (MOS). São dados importantes para se realizar a análise de um solo e conhecer os mecanismos que se fazem presentes.

As referidas análises foram realizadas em laboratórios pertencentes ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), da Universidade de São Paulo, em Piracicaba-SP, sendo um dos laboratórios de referência no Brasil.

Para discussão dos resultados da CTC, foram utilizados os parâmetros de valores da Região Amazônica apresentados nos estudos de Chauvel (1982), realizados sob coordenação da Embrapa. O trabalho original foi citado por Carvalho, Sousa e Sousa (2005) que simplificaram a classificação da CTC do solo como está disposto na Tabela 6, que pode ser observada a seguir.

Tabela 6 – Classificação da CTC para solos amazônicos.

Faixa	CTC a pH 7,0	
	cmol/dm ³	mmol/L
Baixa	<5,5	<55,0
Média	5,6 – 15,0	56 a 150
Alta	15,1 a 50,0	151 a 500
Muito alta	> 50,1	> 501

*1 dm³ equivale a 1 kg.

Fonte: Chauvel, 1982 *apud* Carvalho, Sousa e Sousa, 2005.

O Guia de Análise de Solos da Embrapa (2015) traz também os valores comuns de matéria orgânica para ser comparada com a amostra estudada. A margem pode ser observada na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Valores de Matéria Orgânica.

M.O.	g. kg ⁻¹
Baixo	<10,5
Médio	15 a 30
Alto	>30

Fonte: Embrapa, 2015.

Após análises químicas e de parâmetro físico-químicas, partiu-se para os ensaios de resistência para se obter os valores de sensibilidade.

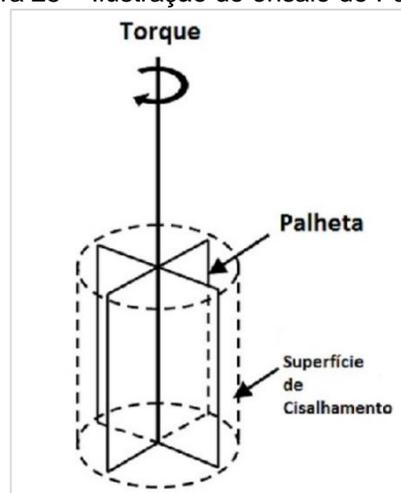
4.3.5. Ensaio de resistência e sensibilidade

Os valores de sensibilidade na literatura, são obtidos por meio de ensaios de resistência do solo. Assim, foram realizados dois ensaios para tal, o ensaio de Palheta e o ensaio de cone de queda livre.

O ensaio de Palheta, também chamado de *Vane Test*, tem como execução a NBR 10905/1989, segundo a qual se faz uma cravação no solo de uma palheta metálica e seção cruciforme, aplicando-se um torque nesta. O torque é aplicado na velocidade de 6º/minuto até que ocorra o cisalhamento do solo por torção. A partir do torque máximo medido, calcula-se a resistência não drenada do solo *in situ* (S_u).

O ensaio realizado foi do tipo perfuração prévia, que é feito um furo prévio o qual é revestido (Figura 25). Depois, a palheta é posicionada no fundo do furo, cravada em mais de 0,5 m no solo e rotacionada. Após aplicação do torque máximo, são realizadas 10 voltas completas da palheta e repete-se o ensaio para medida da resistência amolgada (S_{ur}).

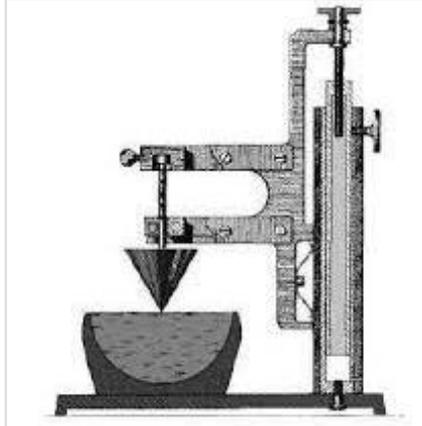
Figura 25 – Ilustração do ensaio de Palheta.



Fonte: GeoPesquisa, 2016.

O ensaio de Cone de Queda Livre (*Fall Cone Test – FCT*) é realizado segundo a norma estrangeira British Standard BS1377. O ensaio se resume no posicionamento do cone sobre uma amostra de solo (Figura 26). Logo em seguida, o cone é liberado, vindo a penetrar na superfície da amostra devido ação do seu peso próprio. Por fim, a resistência é estimada a partir de correlações empírica.

Figura 26 – Ensaio de cone de queda livre.



Fonte: Furg, 2014.

Para a resistência remoldada, foi utilizado como parâmetro os valores encontrados no trabalho de Torrance (1996). Para Torrance, uma argila pode ser considerada uma argila rápida, quando sua resistência remoldada é menor que 0,5 KPa. Para qualquer valor acima deste, o autor classifica a argila muito sensível. E, para a sensibilidade, foram adotados os parâmetros de Rosenqvist (1953), que podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de sensibilidade.

Tipos de sensibilidade	St
<i>Slightly sensitive clays</i> (Argilas ligeiramente sensíveis)	1 – 2
<i>Medium sensitive clays</i> (Argilas moderadamente sensíveis)	2 – 4
<i>Very sensitive clays</i> (Argilas muito sensíveis)	4 – 8
<i>Slightly quick clays</i> (Argilas ligeiramente rápidas)	8 – 16

Fonte: Rosenqvist, 1953.

O trabalho acima é um trabalho experimental que trouxe uma nova classificação quanto a argilas rápidas, sendo um trabalho mais recomendado para classificação de argilas sensíveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho foram divididos em três subseções, sendo a primeira fase a análise do perfil do solo; a segunda fase que trata da análise mineralógica; e a última fase que envolve os ensaios de sensibilidade e ensaios químicos.

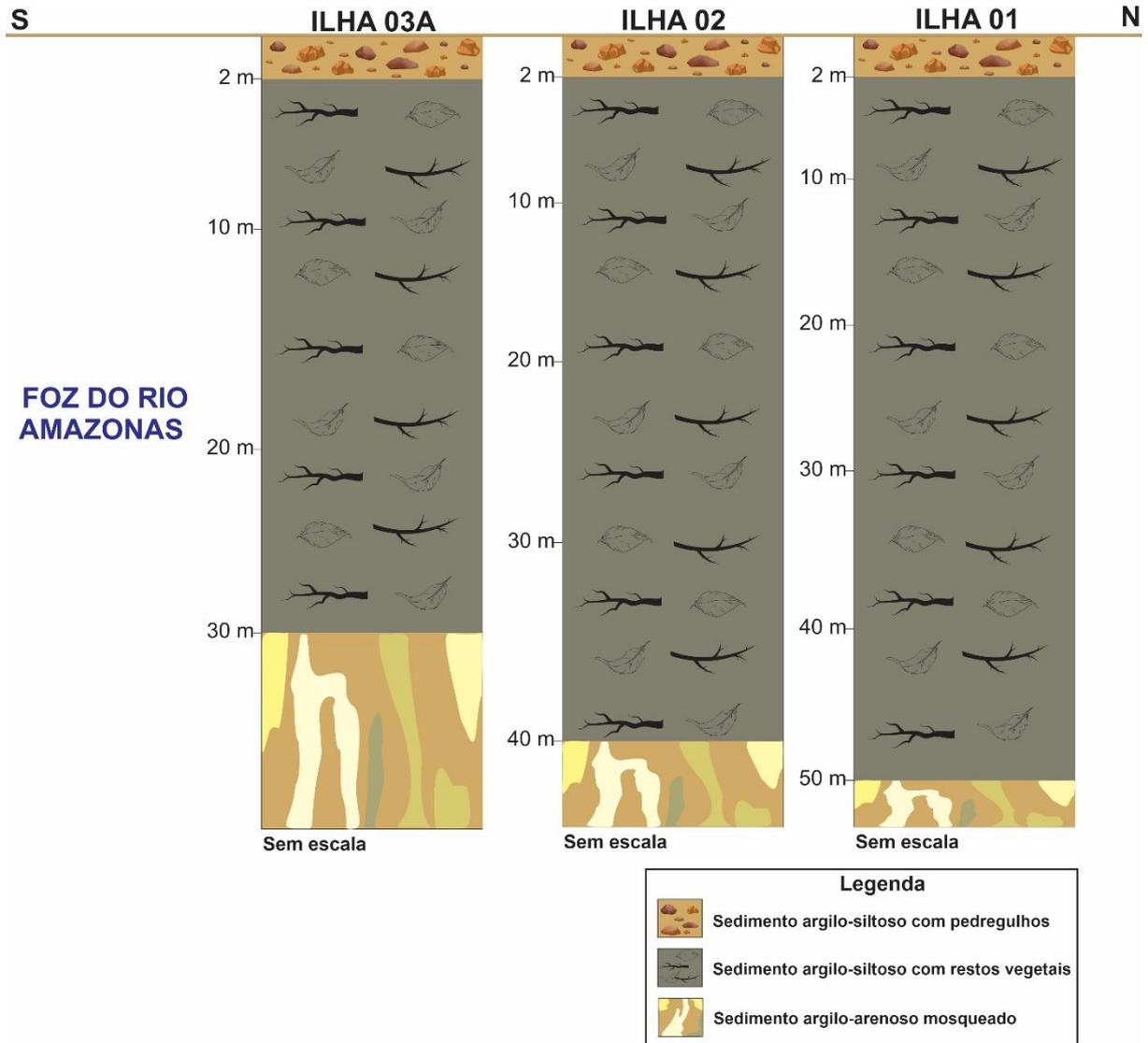
5.1. Análise do perfil geológico

Para compreensão dos resultados posteriores, é imprescindível entender os aspectos do solo da região. Por isso, de acordo com o ensaio SPT, foi possível construir o seguinte perfil da Figura 27.

A área analisada localizada na Planície Fluvio-marinha Macapá, como apontado em momento anterior, indicou pertencer a unidade geológica dos Depósitos Fluvio-marinhos Holocênicos. O termo “depósitos” é utilizado para descrever sedimentos de materiais inconsolidados como argila, silte e areia, que são transportados e depositados por algum processo e agente natural, como rios e marés (TEIXEIRA *et al.*, 2019).

O termo “fluvio-marinho” indica que esses sedimentos podem ter sido depositados tanto pelos rios, como pelo mar, já que a área de estudo está próxima da foz do Rio Amazonas.

Figura 27 – Perfil geológico das ilhas de investigação do subsolo.



Fonte: Autora. Adaptado de Teixeira *et al.*, 2019.

Os perfis geológicos são compostos, da base para o topo, por sedimentos argilo-arenosos cuja profundidade de ocorrência aumenta em direção a foz do Rio Amazonas, tal como pode ser observado na figura acima. Na ilha 01, através dos furos do SPT, observou-se uma faixa de 8 metros de profundidade desses sedimentos.

A camada argilo-arenosa (Figura 28) ora possui pedregulhos, ora não possui, com textura mosqueada, à qual é composta majoritariamente por quartzo e caulinita. Tal camada é rígida, constituída de forma descontínua por anatásio, mica/ilita e hematita. A cor dessa camada está relacionada a presença predominante de hematita, comum em solos ferríferos. A ocorrência desse óxido de ferro parecem ser consequência da intemperização de minerais da rocha de origem, sendo, talvez, herdado tais características diretamente dela.

Figura 28 – Camada argilo-arenosa do perfil do solo: a) amostrador SPT; b) solo misto; c) solo amarelado.



Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

Sobreposto aos sedimentos arenosos, ocorre uma camada espessa de sedimentos argilo-siltosos. Esses sedimentos são recobertos por camadas de aterro com presença de pedregulhos e espessura predominantemente de 2 metros.

A camada intermediária apresentou coloração cinza escuro (Figura 29), composta por quartzo, caulinita, mica/ilita, feldspato e outros minerais (TEIXEIRA *et al.*, 2019). Tal camada foi marcada pela presença de restos vegetais (folhas, madeiras, raízes e cascas), que continham uma estrutura preservada.

Figura 29 – Texturas da camada argilo-siltosa com matéria orgânica: a) amostrador SPT; b) retalho de madeira; c) amostra com fragmento vegetal; d) retalho de madeira com orientação contrária aos sedimentos.



Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

É comum solos que possuem alta quantidade de quartzo apresentarem coloração clara. Contudo, esta situação é alterada em função da matéria orgânica, que, como pode ser observado nas imagens, foi encontrado em grande quantidade no solo analisado.

Na camada de argila da Figura 29, também podem ser observados fragmentos com laminações plano-paralelas, cujos restos vegetais possuem um centro poroso, de espectro mole e esponjoso, presente em todas as amostras.

A sensibilidade de um solo argiloso pode ser avaliada preliminarmente através da amolgação da argila. Em campo, constatou-se de imediato que os sedimentos de solos estavam extremamente mole e pegajoso, perpassando com facilidade entre os dedos, sendo classificado quanto a sua consistência como muito mole.

Basicamente, as 3 (três) camadas sedimentares que compõem esse perfil geológico desta região de Santana apresentaram continuidade lateral, com características químicas, mineralógicas e texturais semelhantes.

Tal composição também se faz muito presente em outras regiões estuarinas tropicais, inclusive em regiões de manguezais de forte ocorrência de matéria orgânica, como já encontrados no estuário do Rio Caetés, região bragantina, e no nordeste do estado do Pará (BARBOSA *et al.*, 2015; VILHENA *et al.*, 2018).

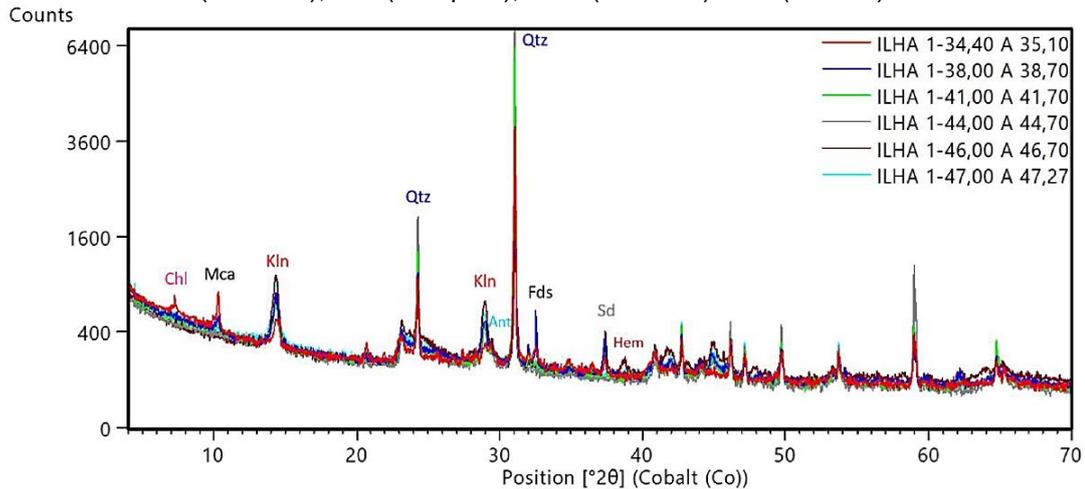
5.2. Análise mineralógica pela difratometria de raios-X

Os argilominerais são indicativos de origem, intemperismo e marcadores de sedimentos marítimos e fluviais. Como já mencionado, Santana possui influência direta de rios e oceano, permitindo com que vários argilominerais sejam transportados pelas águas do rio e incorporados aos solos.

Desse modo, os resultados mineralógicos obtidos através da análise por DRX são os mais significativos para a caracterização de fases cristalinas presentes em diferentes materiais de qualquer natureza. No caso da pesquisa em questão, este ensaio é ainda mais relevante, em função da granulometria extremamente fina das partículas de argila, o que dificulta o emprego da maioria das outras técnicas analíticas da composição mineralógica.

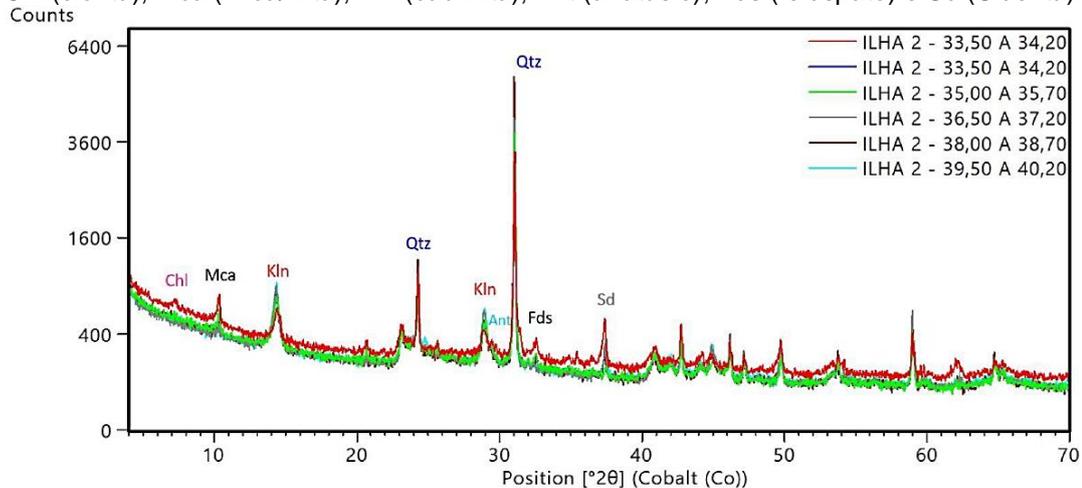
De modo geral, as amostras apresentaram uma estrutura muito semelhante entre si, como pode ser observado nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32, a seguir. A esquerda dos gráficos tem-se a intensidade relativa (eixo y), e na parte inferior se encontra o ângulo de *bragg* (eixo x).

Figura 30 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 1, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados os picos: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato), Hem (hematita) e Sd (siderita).



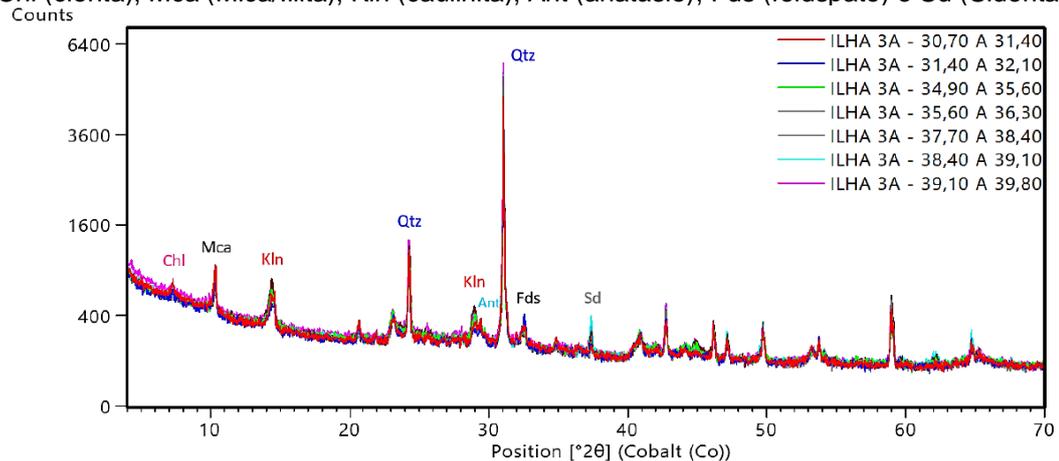
Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

Figura 31 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 2, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados apenas os picos principais (mais intensos) de cada fase: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato) e Sd (Siderita).



Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

Figura 32 – Superposição dos difratogramas das amostras da Ilha 3A, com a identificação das fases presentes. Estão assinalados apenas os picos principais (mais intensos) de cada fase: Qtz (quartzo), Chl (clorita), Mca (Mica/Ililita), Kln (caulinita), Ant (anatásio), Fds (feldspato) e Sd (Siderita).



Fonte: Teixeira *et al.*, 2021.

De um modo geral, a mineralogia das amostras é composta, principalmente, por quartzo, e por três tipos de argilominerais: caulinita (a mais abundante), mica/illita e clorita, em proporções variáveis. A proporção entre quartzo e argilominerais é semelhantemente variada, pois depende, em profundidade, das oscilações da dinâmica na sedimentação fluviomarina, de partículas mais grosseiras (silte-arenosas, dominadas por quartzo), ou mais finas, dominadas por argilominerais.

Um dado apresentado pelo DRX que merece destaque, se refere a presença do quartzo (Qtz) e da caulinita (Kln) tanto na amostra total quanto nas frações de argila. Tal fato sugere que a rocha originária do solo da região em estudo sofreu fortes processos de intemperismo físico e químico, uma vez que o quartzo é um mineral resistente ao intemperismo, o que dificulta sua fragmentação em frações tão pequenas como as frações de argila, indicando um processo intempérico intenso (FRITSCH *et al.*, 2009; HORBE *et al.*, 2007).

Já a caulinita é considerada um mineral comum na fração de argila de solos onde o clima é tropical (clima amazônico) e se forma através do intenso intemperismo da região. Como é um produto desse processo, a caulinita pode chegar a dominar a amostra nessa fração.

Conforme observado nas amostras das três ilhas, há certa predominância de illita e clorita. No caso desses argilominerais, Guyot *et al.* (2007) ressaltaram que o fato das águas da região amazônica serem constituídas por águas advindas de diversas localidades, é comum a presença de sedimentos dos rios andinos, os quais apresentam alto teor de illita e clorita (>50%). Tal informação também foi constatada em outro trabalho de Filizola e Guyot (2011). Esse misto de águas pode ter influenciado na leva de sedimentos para a região de Santana.

Os seguintes minerais acessórios, que se encontram em baixas concentrações (<5%), foram identificados na maioria das amostras: anatósio, feldspatos, hematita e siderita.

No caso dos outros minerais encontrados nas amostras, são tipos comuns em perfis lateríticos na região amazônica, inclusive, no rio Amazonas. No caso, a maior parte (cerca de 90%) dos minerais desses perfis vêm das Cordilheira dos Andes, geralmente minerais do tipo 2:1, como o feldspato, formados com menor grau de intemperismo, sendo depositados nas várzeas dos rios (GUIMARÃES *et al.*, 2013; BOUCHEZ *et al.*, 2014).

O anatásio, por ser um mineral não comum na região de estudo (MELACK *et al.*, 2008), provavelmente foi carregado pelas águas e os sedimentos depositados nas várzeas do município.

A hematita, por sua vez, faz parte do óxido de ferro encontrado no solo de Santana, o qual foi constatado por meio da sua cor avermelhada, característica deste tipo de óxido. A presença da hematita também indica intensa atividade da matéria orgânica na redução e decomposição dos óxidos de ferro, sendo um dos principais solos encontrados em assentamentos humanos (GUIMARÃES *et al.*, 2013).

Observou-se, conforme a Tabela 9, altos valores de alumínio (Al) e sílica (SiO₂) para a camada de argila-siltosa, resultados semelhantes obtidos por Rebêlo *et al.* (2020), os quais já eram esperados, devido o Alumínio ser o metal mais abundante no solo, e o fato do solo ter grande quantidade de silte, tornando-os mais presentes nesta camada.

Tabela 9 – Composição química da camada argilo-siltosa com restos vegetais.

Amostras	SiO₂ (Sílica)	Al₂O₃ (Óxido de alumínio)	Fe₂O₃ (Hematita)	K₂O (Óxido de potássio)
Furo 1 16-17 m	51,95	19,82	7,10	2,52
Furo 1 25-26 m	53,20	20,54	8,72	2,44
Furo 1 39-40 m	54,10	22,66	4,62	1,08
Furo 2 12-13 m	57,43	19,69	7,31	2,87
Furo 2 33-34 m	61,40	18,64	4,01	2,09
Furo 2 40-41 m	61,08	19,12	5,82	1,63
Amostras	MgO (Óxido de magnésio)	Na₂O (Óxido de sódio)	CaO (Óxido de cálcio)	SO₃ (Trióxido de enxofre)
Furo 1 16-17 m	1,38	0,60	0,36	3,42
Furo 1 25-26 m	1,04	0,50	0,40	0,27
Furo 1 39-40 m	0,38	0,17	<0,10	0,40
Furo 2 12-13 m	1,38	0,64	0,51	0,52
Furo 2 33-34 m	0,93	0,48	0,32	0,20
Furo 2 40-41 m	0,77	0,37	0,23	0,16

Nota: Unidade em % massa; (<) valores inferiores ao limite de detecção pelo método de análise utilizado.

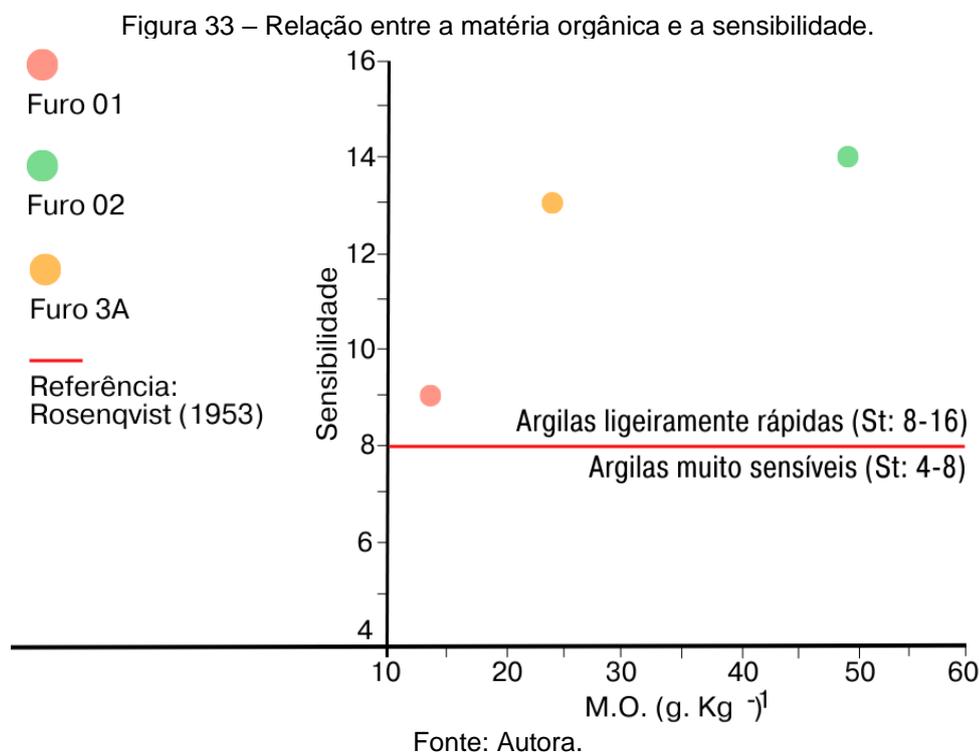
Fonte: Autora.

Além disso, alumino silicatos são a maioria dos minerais primários e secundários formados após ação do intemperismo nas rochas, que, ao serem decompostos pela água com gás carbônico, liberam o alumínio na forma Al^{3+} .

O sódio foi um dos elementos de menor concentração nas amostras analisadas. Tal fato pode ser explicado pelo fato deste elemento não ser muito utilizado pelas plantas, logo apresenta baixa quantidade no solo. Ademais, o aumento de sódio pode favorecer a dispersão da argila, dificultando movimento de ar e de água, formando camadas impermeáveis.

5.3. Análises químicas e de parâmetros físico-químicos

A partir do conjunto dos resultados das análises químicas, foi possível realizar a classificação das argilas presentes no solo da região estudada quanto a sensibilidade. A relação entre a Matéria Orgânica (M.O) e a sensibilidade pode ser conferida na Figura 33.



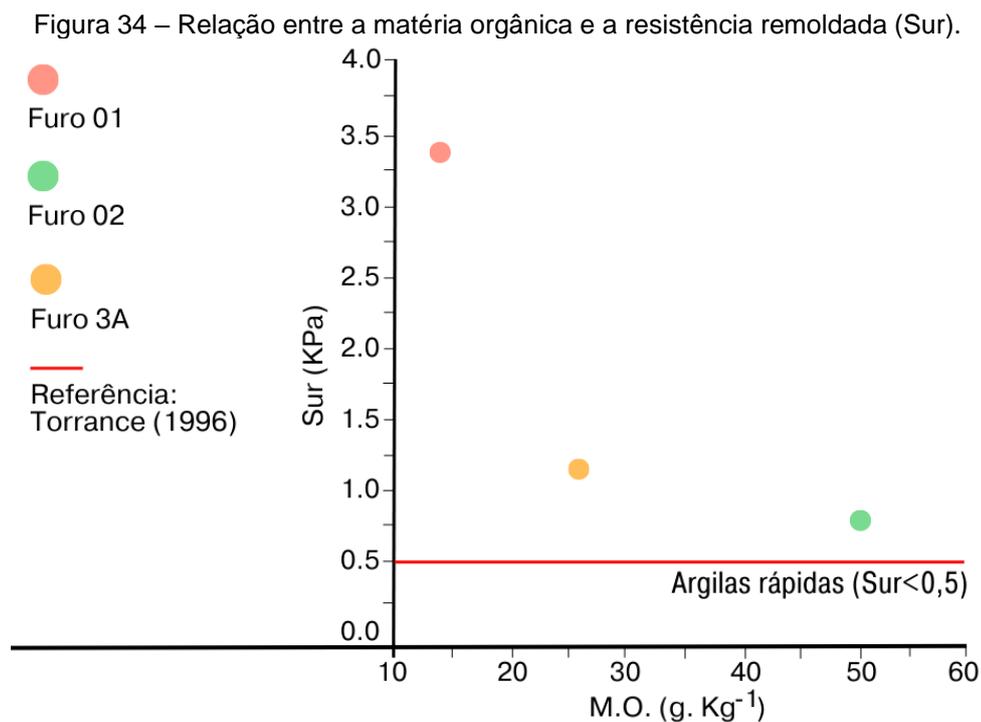
Todas as amostras da Figura 33 foram classificadas como argilas rápidas (St 8-16), conforme a classificação de Rosenqvist (1953). A amostra do Furo 01 apresentou, aproximadamente, um índice 9 de sensibilidade e 14 g. Kg⁻¹ de M.O. Já a amostra do Furo 3A, apresentou um índice 13 de sensibilidade, com 25 g. Kg⁻¹ de

M.O. E, por último, a amostra do Furo 02 indicou um índice 14 de sensibilidade e 50 g. Kg⁻¹ de M.O.

Além disso, referente a quantidade de M.O., todas as amostras foram classificadas em “média” ou “alta” quantidade. De modo geral, o que se observou nas amostras de argila foi precisamente o aumento da sensibilidade, a partir do aumento da matéria orgânica.

É importante relembrar que a sensibilidade de uma argila é intensificada pelo aumento dos cátions monovalentes e diminuição dos cátions divalentes, sendo que cátions como o Ca²⁺ e Mg²⁺ são removidos do sistema principalmente pela matéria orgânica. Assim, quando o valor da M.O. aumenta, concomitantemente, o valor da sensibilidade também aumenta. Portanto, nas amostras de argila analisadas, compreende-se que a matéria orgânica e a sensibilidade são fatores diretamente proporcionais.

E, na Figura 34, tem-se a relação entre a M.O. e a resistência remoldada da argila.



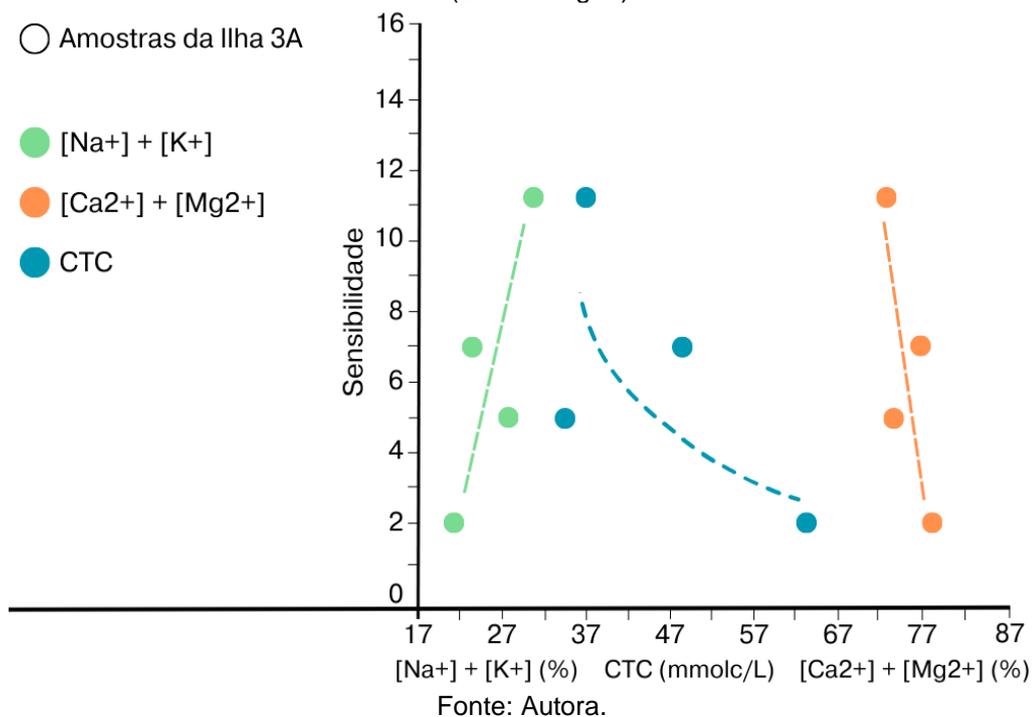
Observa-se nas amostras da figura acima a diminuição da resistência remoldada (S_{ur}) à medida que a quantidade de matéria orgânica aumenta. Os valores de M.O para os furos 01, 02 e 3A são os mesmos obtidos na Figura 33, sendo,

respectivamente, 14, 50 e 25 g. Kg⁻¹. Quanto o valor de S_{ur} , a amostra do furo 01 obteve um valor de 3,4; a amostra do furo 02 obteve 0,7; e, por último, a amostra do furo 3A, obteve 1,2.

Na análise da resistência remoldada, duas amostras (Furo 01 e Furo 3A) foram classificadas como argilas muito sensíveis, segundo a classificação de Torrance (1996). Porém, a amostra do Furo 02 estava quase na fronteira entre uma argila rápida ($S_{ur} < 0,5 \text{ KPa}$) e uma argila muito sensível. Quando tal fato ocorre, o autor cita que tal argila também deve ser considerada como uma argila metaestável.

Já na Figura 35 são apresentados os resultados relativos à sensibilidade, soma dos cátions monovalentes (Na^+ e K^+), divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC) de amostras da Ilha 3A. Constatou-se que o valor da sensibilidade é intensificado por meio do aumento relativo da concentração de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, concomitantemente com a atenuação do $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e CTC.

Figura 35 – Relação entre a sensibilidade e a soma dos cátions monovalentes (Na^+ e K^+), divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e CTC.



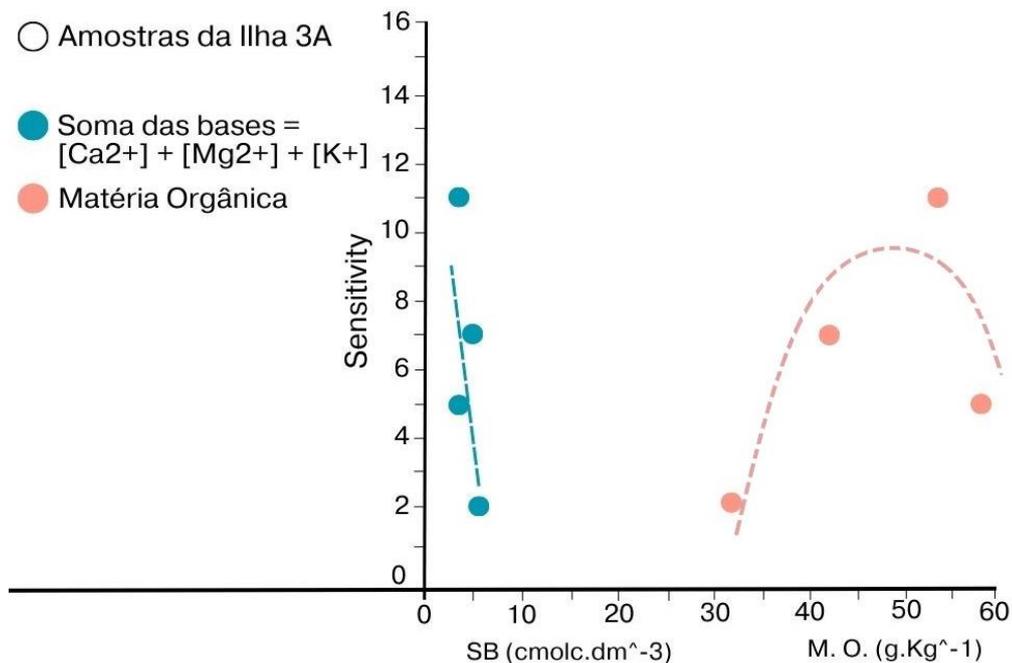
Ainda segundo a figura acima, os valores de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ variaram de 19 a 28% (esquerda para a direita), e à medida que aumentaram, a sensibilidade alterou-se do índice 2 para o índice 11. Já o valor da CTC variou de 62,0 mmolc/L para 37,0 mmolc/L

(direita para a esquerda), junto com a soma dos cátions divalentes $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, de 79 para 72% (direita para a esquerda), mantendo-se os valores de sensibilidade.

Conforme a classificação da CTC de Chauvel (1982 *apud* CARVALHO; SOUSA; SOUSA, 2005) para solos amazônicos, os valores de CTC para as amostras da Ilha 3A foram classificadas, quanto a quantidade, de “baixa” a “média”.

Conquanto, na Figura 36 é apresentada a relação entre a sensibilidade, soma de bases trocáveis (SB) e matéria orgânica. A soma de bases, basicamente, indica os teores de cátions permutáveis $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$, com exceção do H^+ e Al^{3+} .

Figura 36 – Relação entre a sensibilidade, soma de bases (SB) e a Matéria Orgânica.



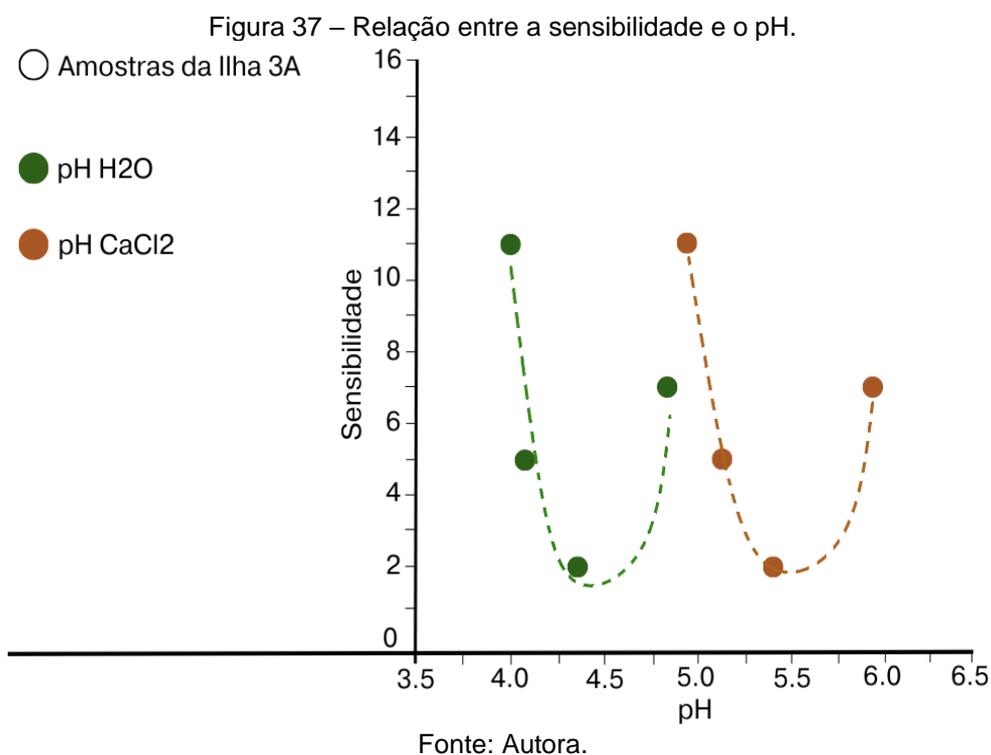
Fonte: Autora.

A quantidade ínfima relativa a soma de bases indica um solo distrófico (pouco fértil), ou seja, pobre em Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , porém, apresentando um alto teor de alumínio trocável. Esta informação se encontra de acordo com o que foi averiguado nos resultados da Tabela 9, a qual apontou a pouca quantidade dessas substâncias no solo analisado.

Em função desta condição, os poucos cátions saturam as cargas negativas dos coloides, sendo que a maioria destes acabam sendo neutralizados por H^+ e Al^{3+} , uma característica de solo ácido. Estes solos são comuns em regiões tropicais, caso da região da Foz do Rio Amazonas, na qual também há certa intensidade pluviométrica,

que lixivia os elementos alcalinos (Ca^{2+} e Mg^{2+}) das camadas superiores pelas águas com CO_2 , sendo substituídos nos colóides, a posteriori, pelos íons H^+ .

Dando prosseguimento, também foi observada a relação entre a sensibilidade e o pH das amostras da Ilha 3A para as duas formas de análise da solução do solo: em H_2O (água) e em CaCl_2 (cloreto de cálcio). O resultado é observado na Figura 37.

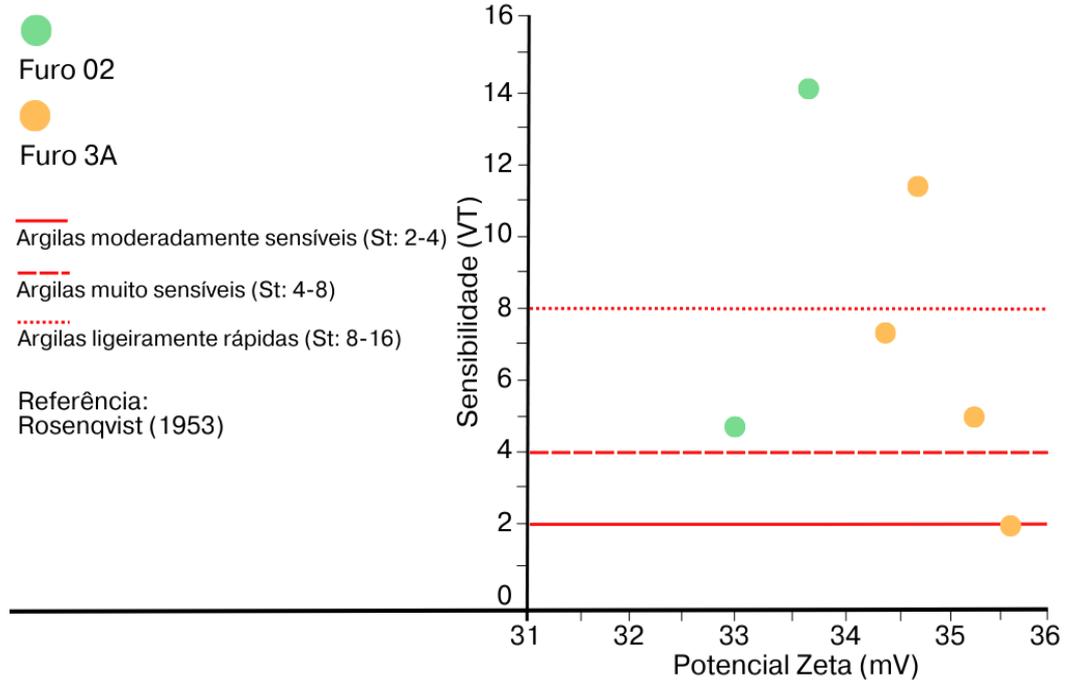


A leitura do pH do solo em solução de H_2O , que variou entre 4,0 e 4,8, foi classificada entre acidez “alta” a “muito alta”. Já o pH do solo em CaCl_2 variou entre 4,9 e 5,9, sendo classificado pelo manual da Embrapa (2010) entre “acidez média” e “elevada”.

Por ser um solo à margem de rio, o qual apresentou grande quantidade de alumínio e matéria orgânica, já se esperava a indicação de um solo ácido, visto que a decomposição da matéria orgânica eleva a concentração de H^+ . Os resultados foram semelhantes aos obtidos por Chig *et al.* (2018) e Zanin *et al.* (2021).

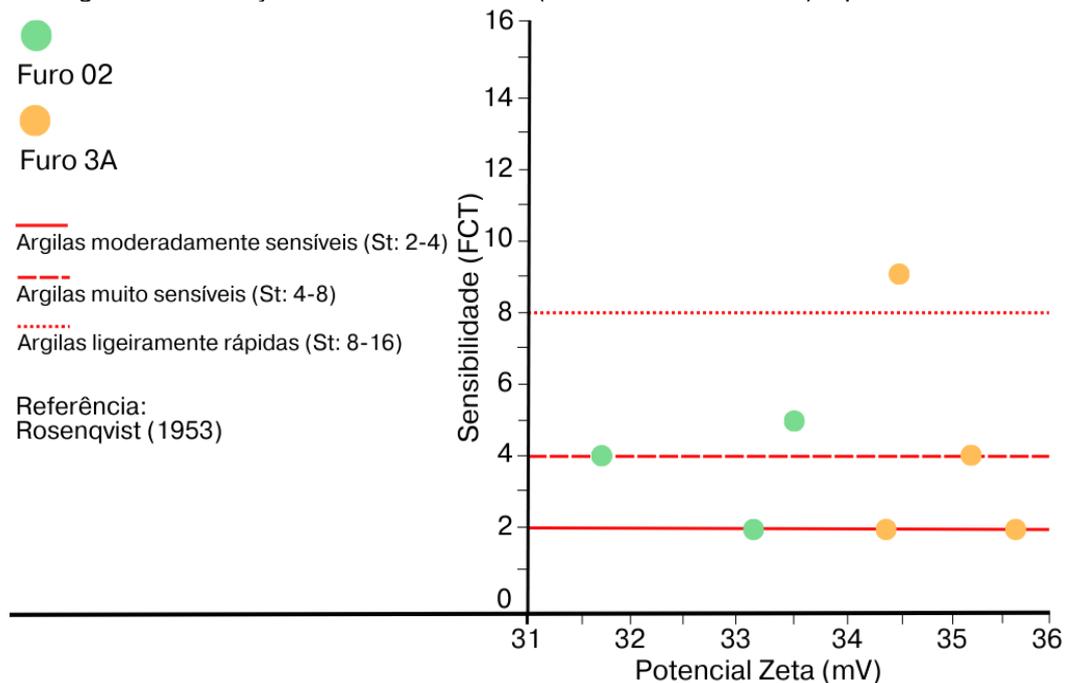
A seguir, é apresentada a Figura 38 e a Figura 39, que mostram a relação entre a sensibilidade e o potencial Zeta (ζ) para dois ensaios de resistência do solo: ensaio *Vane Test* e ensaio de penetração com o cone (*Fall Cone Test*), respectivamente.

Figura 38 – Relação entre sensibilidade (ensaio *Vane Test*) e potencial Zeta.



Fonte: Autora.

Figura 39 – Relação entre sensibilidade (ensaio *Fall Cone Test*) e potencial Zeta.



Fonte: Autora.

Basicamente, todas as amostras apresentaram valores de potencial Zeta próximos. No caso, os menores valores de ζ foram de 33,2mV, com o ensaio *Vane Test*, e 31,3mV para ensaio de *Fall Cone Test*, ambos para as amostras do Furo 02. Além disso, o restante das amostras obtiveram um valor maior que este último, se

encontrando em uma zona de transição entre a instabilidade e estabilidade coloidal, cujo potencial Zeta é considerado alto (valores $>+30\text{mV}$), conforme classificação oferecida pela Malvern (2013), ilustrada na Figura 12.

Tanto no ensaio *Vane Test*, quanto no ensaio *Fall Cone Test*, observou-se nas amostras do Furo 02 e Furo 3A, um aumento conjunto de sensibilidade e valor de potencial Zeta. Um valor alto de ζ indica que as partículas carregadas estão se repelindo, superando as forças de *Van der Waals*. Tal situação deve ter ocorrido em função do aumento da concentração de cátions monovalentes, levando a dispersão dos coloides do solo (DARROW; GUO; TRAINOR, 2020; MÉNDEZ *et al.*, 2018).

Tal mudança na composição dos cátions trocáveis (mais monovalentes e menos divalentes) expande a dupla camada elétrica em torno da partícula de argila, aumentando o potencial Zeta, resultando, assim, na minoração da resistência remoldada, aumentando a sensibilidade.

Ainda, como observado, independentemente do ensaio de resistência realizado, ambos convergem para o mesmo resultado, indicando certa variação na sensibilidade com altos e baixos valores de ζ e sensibilidade. É importante recordar que existem fatores externos que contribuem para a alteração da sensibilidade além da estrutura do solo. Porém, os resultados indicaram um solo disperso, o qual é favorecido pela dominação de cargas negativas, com a interação entre as partículas possuindo um contato fraco face a face.

Além disso, como constatado em gráficos anteriores com a matéria orgânica, o acúmulo deste material pode ter fornecido mais cargas negativas à fração argilosa, aumentando a repulsão entre as partículas.

6 CONCLUSÕES

Conforme as informações destacadas neste estudo, foi possível inferir que a formação geológica da foz do Rio Amazonas contribuiu diretamente para a composição de um solo tão sensível, a qual houve grande reforço de depósitos de sedimentos marinhos e fluviais, característica de solos extremamente moles.

Verificou-se que há significativa variação de teores de metais no solo que acompanha certa diversidade de solos e rochas da própria região Amazônica. No tocante, este trabalho foi imprescindível para confirmar as observações locais, principalmente quanto a heterogeneidade deste solo, marcada pela presença de matéria orgânica, responsável por influenciar suas propriedades.

Destarte, os experimentos levaram a concluir que o solo da região supracitada é sensível, com as amostras de solo variando entre argilas ligeiramente rápidas (*slightly quick clays*) e argilas muito sensíveis (*very sensitive clays*). Constatou-se um solo ácido, o qual a matéria orgânica presente tem sido responsável por lixiviar cátions divalentes, aumentando a quantidade de cátions monovalentes, o que contribuiu para o aumento da sensibilidade.

Ainda, observou-se uma variação na sensibilidade com altos e baixos valores de potencial Zeta, o qual indicaram um solo disperso, favorecido pela dominação de cargas negativas, à qual é uma situação beneficiada pelo acúmulo de matéria orgânica.

Contudo, todos os resultados foram consistentes com outros encontrados na literatura brasileira, o que indica que as técnicas de investigação geotécnicas utilizadas são eficazes para identificar solos sensíveis na região amazônica.

Por fim, considerando que o Brasil possui uma diversidade de regiões fisiográficas, refletindo em variadas classes de solos, a abordagem do tema deve ser mais abrangente e detalhada. Nesse viés, reforça-se a necessidade de estudos regionalizados para melhor entendimento de fatores de influência nos resultados, pois as peculiaridades locais também podem influenciar em cada perfil de solo.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6484**: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020. 32 p.

ABNT. **NBR 10905**: Solos-Ensaio de palheta *in situ*. Rio de Janeiro, 1989. 9 p.

ABREU, C. H. M. *et al.* Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. **Water**, n. 12, v. 3. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.3390/w12030660>>. Acesso em: 29 janeiro de 2023.

AWAN, F. U. R. *et al.* Influence of mineralogy and surfactant concentration on zeta potential in intact sandstone at high pressure. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 607, p. 401-411, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.015>. Acesso em: 30 de agosto de 2022.

BACCI, D. L. C. **Processo de intemperismo físico**. 2021. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6281779/mod_resource/content/1/Aula%209%20e%2010.pdf>. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

BARBOSA, I. C. C. *et al.* Chemical composition of the Bragantino Estuary mangrove sediment (PA) - Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 7, p. 1087-1101, 2015. DOI: <[10.5935/1984-6835.20150060](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150060)>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2023.

BARBOSA, L. L. C. *et al.* Análise de estabilidade de aterro sobre solos moles: métodos construtivos para estabilização. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 51783-51802. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30289>>. Acesso em: 28 de agosto de 2022.

BRITISH STANDARD BS1377. **Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes**. British Standard Institution. 1990.

BOUCHEZ, J. *et al.* Source, transport and fluxes of Amazon River particulate organic carbon: Insights from river sediment depth-profiles. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 133, p. 280-298, mai. 2014. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.032>>. Acesso em: 02 de março de 2023.

BURITI, B. M. A. B. *et al.* Characterization of clays from the State of Paraíba, Brazil for aesthetic and medicinal use. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, P. 78-84, 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653732534>. Acesso em: 08 de setembro de 2022.

CARITAT, P.; TROITZSCH, U. Towards a Regolith Mineralogy Map of the Australian Continent. A Feasibility Study in the Darling-Curnamona-Delamerian Region. **Geoscience Australia**, n. 35, dez. 2021. DOI: <[10.11636/Record.2021.035](https://doi.org/10.11636/Record.2021.035)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

CHAUVEL, A. **Os latossolos amarelos, álicos, argiloso dentro do ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha**. Manaus, 1982, p. 47-60. *Apud* CARVALHO, J. C. R.; SOUSA, C. S.; SOUSA, C. S. **Fertilizantes e Fertilização**.

Departamento de Química Agrícola e Solos. Cruz das Almas, Bahia. 2005. Disponível em: <<https://www.ifbaiano.edu.br/unidades/valenca/files/2011/05/fertilizantes-e-fertilizacao.pdf>>. 159 p. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

CHIG, L. A. *et al.* Uso de series temporais em análise da variação do pH do solo. **Nativa**, v. 6, n. 4, p. 358-363, jul./ago. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5089>. Acesso em: 01 de dezembro de 2022.

COLEPICOLO, E. Buscando informação científica de qualidade para pesquisa em Psicologia. **Estudos Interdisciplinares em Psicologia**, v. 5, n. 2, 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.5433/2236-6407.2014v5n2p133>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.

DARROW, M. M.; GUO, R.; TRAINOR, T. P. Zeta potential of cation-treated soils and its implication on unfrozen water mobility. **Cold Regions Science and Technology**, n. 173, e103029, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103029>>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 9ª. ed. São Paulo: Thonson Learning, 2019.

DENG, Y. *et al.* Pore water salinity effect on the intrinsic compression behaviour of artificial soft soils. **Applied Clay Science**, v. 166, n. 15, p. 299-306, dez. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.027>>. Acesso em: 24 de outubro de 2022.

DIAS, I. A. **Mineralogia e geoquímica de argilominerais da Nhecolândia – Pantanal Sul-Mato-Grossense**. Curitiba, 2019. 71 f. Dissertação (mestrado) – Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2019.

DUARTE, I. J. M. *et al.* Evaluation of nitrate adsorption from aqueous medium using modified montmorillonites. **Eng. Sanit. Ambiental**, v. 24, n. 1, p.21-31, jan./fev. 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019167642>. Acesso em: 08 de setembro de 2022.

ELERT, K.; RODRIGUES-NAVARRO, C. Degradation and conservation of clay-containing stone: A review. **Construction and Building Materials**, v. 330, n. 2, p. 1-16, mai. 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127226>>. Acesso em: 02 de novembro de 2022.

ELSAWY, M. B. D.; ALSHAREKH, M. F.; SHABAN, M. Modeling Undrained Shear Strength of Sensitive Alluvial Soft Clay Using Machine Learning Approach. **Applied Sciences**, v. 12, n. 19, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/app121910177>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.

EMBRAPA. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/882598/conceitos-de-fertilidade-do-solo-e-manejo-adequado-para-as-regioes-tropicais>>. Acesso em: 07 de janeiro de 2023.

EMBRAPA. **Guia prático para interpretação de resultados de Análises de Solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2023.

FAN, B. *et al.* Leaching behaviors of calcium and magnesium in ion-adsorption rare earth tailings with magnesium sulfate. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 31, n. 1, jan., p. 288-296. 2021. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65495-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65495-X)>. Acesso em: 22 de outubro de 2022.

FERREIRA, S. R. M. *et al.* Comportamento tensão-deformação-resistência de uma argila orgânica mole da região norte da cidade do Recife-PE, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, e3711326123, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26123>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566-576, dez. 2011. DOI: <<https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>>. Acesso em: 01 de março de 2023.

FRITSCH, E. *et al.* Organic complexation and translocation of ferric iron in podzols of the Negro River watershed. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 73, n. 7, p. 1813-1825. 2009. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.01.008>>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019. DOI: <[10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73](https://doi.org/10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73)>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

GEERTSEMA, M. *et al.* Sensitive clay landslide detection and characterization in and around Lakelse Lake, British Columbia, Canada. **Sedimentary Geology**, n. 364, p. 217-227, feb. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.12.025>>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. Como delinear uma pesquisa bibliográfica? *In*: GIL, Antonio Carlos (coord.). **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022, p. 59-67.

GONÇALVES, A. C. **Capítulo 2: Processo de formação, mineralogia e sensibilidade das argilas**. *In*: Avaliação da sensibilidade de uma argila mole do Amapá por meio da correlação entre ensaios de CPTU e de laboratório. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Tucuruí, Pará, p. 20-28, 2022. Acesso em: 25 de janeiro de 2023.

GONÇALVES, M. V. B. **Síntese e caracterização de nanotubos de haloisita a partir de argilominerais presente em rejeitos de mineração de ferro**. Ouro Petro, 2019. 154 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de

Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11027>>. Acesso em: 30 junho de 2022.

GRECCO, K. L. Capítulo 2: Revisão de Literatura. In: **Efeito da composição físico-química e mineralógica de solos sobre a dinâmica dos íons nitrato, fósforo e potássio**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.15-18. 2019. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Mineralogical and geochemical influences on sediment color of Amazon wetlands analyzed by visible spectrophotometry. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 3, p. 331-342. 2013. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000300009>>. Acesso em: 02 de março de 2023.

GUYOT J. *et al.* Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. **Catena**, v. 71, n. 2, p. 340-356. 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.02.002>>. Acesso em: 03 de março de 2023.

HIDAYAT, M. *et al.* Zeta potential of a Natural Clayey Sandstone Saturated With Carbonated NaCl Solutions at Supercritical CO₂ Conditions. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 15, jul. 2022. DOI <https://doi.org/10.1029/2022GL099277>. Acesso em: 30 de agosto de 2022.

HORBE, A. M. C. *et al.* Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari – AM. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 81-90. 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000100009>>. Acesso em: 03 de março de 2023.

IBGE, 2004. **Estado do Amapá: Geologia. Mapa geológico**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/mapas/unidades_da_federacao/ap_geologia.pdf>. Acesso em: 01 de março de 2023.

INSTRUTÉCNICA. **Medida de potencial zeta**. 2018. Disponível em: <<https://www.instrutecnica.com.br/produtos/particulas/medida%20zeta.html>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2023.

JIN, X. *et al.* XRD and TEM analyses of a simulated leached rare earth ore deposit: Implications for clay mineral contents and structural evolution. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 225, p. 1-12, set. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112728>>. Acesso em: 22 de outubro de 2022.

LEAL, C. A. *et al.* Influence of reactivity and mineralogical composition on instability due to the disintegration of shales from Paraíba and Ceará States, Brazil. **Revista Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 400-406, jul./set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752630>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

LEPSCH, I. F. Intemperismo dos minerais das rochas e formação dos argilominerais. In:_____. **19 lições de Pedologia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2021. p. 56-84.

LIU, J. *et al.* Effects of soil surface electrochemical properties on soil detachment regulated by soil types and plants. **Science of the total environment**, v. 834, n. 154991, ago. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154991>>. Acesso em: 22 set. 2022.

LIU, Y. *et al.* Acid-base properties of kaolinite, montmorillonite and illite at marine ionic strength. **Chemical Geology**, v. 483, p.191-200, abr. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.018>>. Acesso em: 15 de agosto de 2022.

MACEDO NETO, A. A. K. *et al.* Diagnóstico e variabilidade espacial da fertilidade do solo e produção de cultivos em área de teca no leste do Pará. **Cerne**, n. 26, v. 1, p. 37-47, jan./mar. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1590/01047760202026012683>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2023.

MACHADO, G. M. V.; PINHEIRO, B. L. Depósitos fluviais e marinhos na zona costeira: uma abordagem sedimentológica e morfológica da região de Vitória, ES. **Geografares**, v. 33, p. 1-26, 2021. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/geografares/3449>>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

MALVERN INSTRUMENT. **Catálogo Zetasizer Nano Series User Manual**. MAN 0485, Issue 1.1, Capítulo 13, p. 230-240. Worcestershire, WR14, Reino Unido, 2013. Disponível em: <<https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Malvern%20Zetasizer%20ZS%20DLS%20user%20manual.pdf>>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

MALVERN PANALYTICAL. **About us**. Disponível em: <<https://www.malvernpanalytical.com/br/about-us>>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

MELACK, J. M. *et al.* Flooding hydrology in an Amazonian floodplain lake. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1-2, p. 18-30, 2008. DOI: <10.1016/j.jhydrol.2007.10.055>. Acesso em: 05 de março de 2023.

MELO, T. R.; MACHADO, W.; FILHO, J. T. Charge sparsity: Na index to quantify cation effects on clay dispersion in soils. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 1, e20170392, p. 1-6, 2020. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0392>>. Acesso em: 30 de agosto de 2022.

MÉNDEZ, J. P. *et al.* Potencial zeta e mobilidade eletroforética para recuperação de solo salino com aditivos orgânicos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 4, jul./ago. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1590/1413-70542018424004318>>. Acesso em: 28 de agosto de 2022.

MOHAMED, A. O.; PALEOLOGOS, E. K. Soil-Water Interaction. **Understanding Soil, Water, and Pollutant Interaction and Transport**, p. 161-203. 2018. DOI: <

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804830-6.00006-5>. Acesso em: 25 de agosto de 2022.

MORAIS, I. C. G. *et al.* Influence of the additivition process on cation exchange capacity and viscosity of bentonitic clay dispersions. **Cerâmica**, n. 66, v. 377, jan./mar. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132020663772695>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2023.

NEVES, H. C. V. **Pontos de carga zero e comportamento de coagulação em solos oxídicos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 79 f. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/40317>>. Acesso em: 04 de junho de 2021.

NOVAK, E. *et al.* Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, n. 31, v. 3, p. 1063-1085, jul./set. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.5902/1980509828995>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2023.

NOVO, B. L. *et al.* Avaliação Tecnológica de Cubati/Brasil Montmorillonita. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 7, n. 1, p. 5203–5222, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-352>>. Acesso em: 20 de novembro de 2022.

NUNES FILHO, F. G. *et al.* Híbridos de grafeno/montmorilonita e óxido de grafeno/montmorilonita como nanomateriais funcionais: uma visão da literatura atual. **Cerâmica**, v. 37, n. 382, apr./jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132021673823063>>. Acesso em: 22 de setembro de 2022.

OLIVEIRA, N. M. **Efeito da estrutura na compressibilidade de um solo residual maduro não saturado**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2018. 74 f. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/19848/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

PASCHOARELLI, L. C.; MEDOLA, F. O.; BONFIM, G. H. Características Qualitativas, Quantitativas e Quali-quantitativas de Abordagens Científicas: estudos de caso na subárea do Design Ergonômico. **Revista de Design, Tecnologia e Sociedade**, v. 1, n. 2, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/design-tecnologia-sociedade/article/view/15699/14030>>. Acesso em: 15 de agosto de 2021.

PENG, C. *et al.* Adsorption of ammonium ions onto the external surface of smectite: Effects of layer charge, concentration, anion and comparison with interlayer adsorption. **Applied Clay Science**, v. 230, nov. 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106716>>. Acesso em: 18 de agosto de 2022.

PEREIRA, T. T. C. *et al.* A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação como uso e manejo. **Geonomos**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/29650/23337>>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

RAMOS, S. O. *et al.* Characterization of clays of deposits new located in Parelhas/RN, Brasil, aiming for application in the ceramic industry. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0667>>. Acesso em: 14 de setembro de 2022.

REBÊLO, A. G. M. *et al.* Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia Central. **Química Nova**, v. 43, n. 5, p. 534-539, mai. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170516>>. Acesso em: 24 de novembro de 2022.

REN, Y. *et al.* Thixotropy of soft clay: A review. **Engineering Geology**, v. 287, jun. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106097>>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

ROSENQVIST, I. T. Considerations on the Sensitivity of Norwegian Quick-Clays. **Geotechnique**, v. 3, n. 3, p. 195-200. 1953. DOI: <<https://doi.org/10.1680/geot.1953.3.5.195>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2023.

RUGE, J. C.; MOLINA-GOMEZ, F.; ROJAS, J. P. Thixotropic behaviour study of clayey soils from the lacustrine deposits of Bogotá high plateau. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1386, n. 1, nov. 2019. DOI: <10.1088/1742-6596/1386/1/012050>. Acesso em: 19 de outubro de 2022.

SALGADO, V. G. C. Divergência e transição: o que há de urbano e ribeirinho na Vila Elesbão (AP). **Ponto Urbe**, n. 25, 2019. DOI: <10.4000/pontourbe.7169>. 23 de janeiro de 2022.

SAMPA, N. C. **Capítulo 2.4.6: Conceitos gerais sobre argilas.** *In:* Modelagens dos Mecanismos de interação de linhas de ancoragem de plataformas offshore em Solos Argilosos. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, p.74-96, 2019. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1. P. 83-89, jan./fev. 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S1413-35552007000100013>>. Acesso em: 02 de agosto de 2022.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2 ed. Vol. 1. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1989.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.** 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

SHAHRIAR, A. R.; ABEDIN, M. Z.; JADID, R. Thixotropic aging and its effect on 1-D compression behavior of soft reconstituted clays. **Applied Clay Science**, v. 153, n. 1, mar., p. 217-227. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.029>>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

SHANG, X. *et al.* Empirical formulae for electric double-layer repulsion between two arbitrarily inclined clay particles. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical**

Engineering, v. 10, n. 6, p. 1183-1189, dez. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.005>>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. The Sensitivity of Clays. **Géotechnique**, v. 3, n.1, mar., p. 30–53. 1952. DOI: <<https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.1.30>>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

SOUSA, L. M. M. *et al.* Modelos de formulação da questão de investigação na prática baseada na evidência. **Revista Investigação em Enfermagem**, n. 23, p. 31-39, mai. 2018. Disponível em: <https://www.sinaisvitais.pt/images/stories/Rie/RIE23_s2.pdf>. Acesso em: 02 de agosto de 2022.

SOUZA, K. O. *et al.* Desabamento do Porto de Santana-AP em março de 2013: perspectivas de um impacto socioambiental sobre o Rio Amazonas, Brasil. **Multidisciplinary Scientific Journal**, RC 43010, p. 1-19. 2019. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/2019/12/desabamento-do-porto-de-santana-ap-2.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

TEIXEIRA, M. R. *et al.* **Relatório Técnico de Eixo**. Geologia. Setembro, 2021.

TEIXEIRA, M. R. *et al.* **Relatório Técnico Complementar de Eixo**. Geologia/Química. Maio, 2021.

TEODORO, L.; PARABOCZ, C. R. B.; ROCHA, R. D. C. Caracterização da argila vermiculita expandida: avaliação dos padrões físico-químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente. **Matéria**, n. 25, v. 4, nov. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1151>>. Acesso em: 06 de setembro de 2023.

TORRANCE, J. K. Towards a general model of quick clay development. **Sedimentology**, v. 30, p. 547-555. 1996. DOI: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00692.x>>. Acesso em: 04 de março de 2023.

VELOSO, C. **Representação da retenção ou lixiviação de nutrientes a partir da CTC do solo**. 2022. Disponível em: <<https://blog.verde.ag/nutricao-de-plantas/lixiviacao-de-nutrientes-por-que-o-potassio-possui-o-maior-risco-de-perdas/#:~:text=A%20CTC%20do%20solo%20%C3%A9,cargas%20que%20acontece%20no%20solo.>>. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

VENTURA JUNIOR, E. F. *et al.* Solos moles: os desafios da construção civil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 51803-51824, mai. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30290>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

VIEGAS, M. R. *et al.* **Ensaio de Cone de Queda Livre (Fall cone test) na avaliação da resistência não drenada de solos artificiais adensados**. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/5059/cricte2014_submission_100.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 de setembro de 2022.

VILHENA, M. P. S. P. *et al.* The sources and accumulation of sedimentary organic matter in two estuaries in the Brazilian Northern coast. **Regional Studies in Marine Science**, v. 18, p. 188-196, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.10.007>>. Acesso em: 04 de março de 2023.

WU, Z. *et al.* Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region. **Engineering Geology**, v. 272, p. 1-9, jul. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105648>>. Acesso em: 23 de outubro de 2022.

ZANIN, R. F. B. *et al.* The effect of pH and electrical conductivity of the soaking fluid on the collapse of a silty clay. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 4, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.28927/SR.2021.061620>>. Acesso em: 22 de novembro de 2022.

ZHANG, T. *et al.* Porewater salinity effect on flocculation and desiccation cracking behaviour of kaolin and bentonite considering working condition. **Engineering Geology**, v. 251, n. 9, p. 11-23, mar. 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.007>>. Acesso em: 24 de outubro de 2022.

ZHOU, X. *et al.* XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. **Solid Earth Sciences**, n. 1, v. 3, mar. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.