



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

ROVENNE LUIZA SILVA

A INFLUÊNCIA DO pH NA GÊNESE DE HORIZONTE COM CARÁTER COESO

FORTALEZA

2022

ROVENNE LUIZA SILVA

A INFLUÊNCIA DO pH NA GÊNESE DE HORIZONTE COM CARÁTER COESO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S583i Silva, Rovenne Luiza.

A influência do pH na gênese de horizonte com caráter coeso / Rovenne Luiza Silva. –
2022.

91 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero.

1. Tabuleiro Costeiro. 2. Argiluviação. 3. Adensamento. 4. Dispersão de argila. I. Título.

CDD 631.4

ROVENNE LUIZA SILVA

A INFLUÊNCIA DO pH NA GÊNESE DE HORIZONTE COM CARÁTER COESO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

Aprovado em: 30/05/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Juliana Matos Vieira (Examinador)
(FUNCEME)

A mim!

Aos meus pais Rita e Luís por todo amor.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por me permitir acordar todos os dias e descansar todas as noites.

As minhas irmãs Susanne, Lea, Rosenilda, Rosângela e Ana Nery por todo apoio.

A Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo por me proporcionar ingressar e estar me qualificando, contribuindo para minha formação profissional e pessoal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia (CNPq) instituição que fomentou minha bolsa de Mestrado.

Ao professor Dr. Ricardo Espíndola Romero pela orientação, paciência, amizade e pela confiança, contribuindo tanto para minha vida profissional como pessoal.

Ao professor Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota pela orientação e toda paciência durante minhas inseguranças e dúvidas durante o curso e pela disponibilidade do uso do Laboratório de Física do Solo.

Ao professor Dr. Carlos Tadeu por toda paciência e disponibilidade em aconselhar e instruir durante a conclusão desse processo.

Aos professores Drs. Maria Eugenia Ortiz Escobar e Fernando Felipe Ferreyra Hernandez por toda colaboração, paciência e instruções durante minhas dúvidas. Ao professor Dr. Raul Shiso Toma e Raimundo Nonato Assis Júnior pela disponibilidade de equipamentos e conselhos na descrição do trabalho.

A professora Dr. Mirian Cristina Gomes Costa por disponibilizar a utilização do Laboratório de Manejo do Solo.

Aos Técnicos Laboratoristas Deyse Maia, Vitória Emily, Caio, Franzé, Crisanto e Fátima por todo apoio, instruções e agilidade na execução das minhas atividades para concluir o trabalho referido.

Ao seu Antônio José e Amilson da FUNCEME por toda colaboração.

Aos Funcionários do Departamento de Ciência do Solo Edilson, Marilene, Helena.

Aos amigos e colegas Jardelson, Gilcivan, Angélica Lopes, Ícaro Vasconcelos, Alexandre, José Lucas, Rafaela Batista, Mateus Guimarães, Willian

Axl, Fernanda Abreu, Ana Maria, Dariane Viana e Kway pela amizade e motivação sugeridas durante todo o percurso até aqui.

A todos que, mesmo não sendo citados contribuíram para a conclusão de mais uma etapa e crescimento pessoal da pessoa que sou hoje.

RESUMO

Nos Tabuleiros Costeiros, que se estendem do Sudeste ao Norte do Brasil, os solos foram desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras e podem apresentar horizontes com caráter coeso, os quais são adensados. Assim, esse trabalho foi desenvolvido partindo-se da hipótese que o pH do solo pode contribuir com a formação de horizontes com caráter coeso por influenciar a dispersão das argilas e, conseqüentemente, o adensamento. O objetivo geral do presente estudo foi avaliar a faixa de pH que pode contribuir para a dispersão da argila, favorecendo a argiluviação e o adensamento de horizontes dos solos dos Tabuleiros Costeiros, buscando-se especificamente (i) determinar os parâmetros físicos, relacionados ao caráter coeso, que foram influenciados pelo pH do solo e (ii) avaliar a influência do pH na dispersão da argila em solos com diferentes concentrações de argila. O experimento foi conduzido com material coletado nos horizontes B, com caráter coeso – CCC e sem caráter coeso – SCC, de solos em áreas com menor teor de argila ($\sim 200 \text{ g kg}^{-1}$ / Pacajus-CE) e com maior teor de argila ($\sim 300 \text{ g kg}^{-1}$ / Fortaleza-CE). As amostras foram coletadas em tubos de policloreto de vinil (PVC) de 7 cm de altura e 5 cm diâmetro, sendo estes submetidos a nove ciclos de percolação com soluções com os seguintes valores de pH: 4,25; 4,75; 5,25; 5,75 e 6,25. Após os ciclos foram realizadas análises de argila dispersa em água (ADA), densidade do solo (D_s) e resistência do solo à penetração (R_p), com o intuito de avaliar se houve influência no grau de adensamento do solo. Foram realizadas outras análises físicas e químicas para complementar os resultados referente translocação da argila por influência do pH. Foi adotado o esquema fatorial $2 \times 2 \times 5$, onde o primeiro fator corresponde aos dois solos (com mais e com menos argila), o segundo fator corresponde aos horizontes Bt com caráter coeso e sem caráter coeso e o terceiro fator corresponde aos cinco valores de pH, com cinco repetições. Conclui-se que: (i) a hipótese foi confirmada para o horizonte de Fortaleza - SCC (FSC) e refutada para o de Pacajus-SCC (PSC); (ii) algumas variáveis identificadoras do caráter coeso foram sensíveis ao tratamento com as soluções de pH, como D_s e R_p no (PSC) não havendo translocação da argila dispersa em água (ADA) por influência do pH que caracterize o horizonte como coeso. O tratamento com as soluções (diferentes pH) favoreceu a dispersão de argila no horizonte FSC; (iii) no horizonte de Fortaleza -

CCC (FCC), as soluções menos ácidas contribuíram para o aumento do adensamento; no horizonte de Pacajus – CCC (PCC), os teores de ADA não foram alterados, porém observou-se que material fino foi perdido durante os ciclos das soluções percolantes; (iv) os parâmetros físicos influenciados pelo pH das soluções percolantes foram Rp, Ds, argila total, ADA, grau de floculação e porosidade total.

Palavras-chave: Tabuleiro Costeiro; argiluviação; adensamento; dispersão de argila.

ABSTRACT

In Tabuleiros Costeiros, which extends from Southeast to Northern Brazil, the soils were developed from sediments of the Formação Barreiras and can present horizons with cohesive character, which are dense. Thus, this work was developed based on the hypothesis that soil pH may contribute to the formation of cohesive horizons by influencing clay dispersion and, consequently, densification. The general objective of this study was to evaluate the pH range that can contribute to clay dispersion, favoring clay tilting and densification of horizons of soils of Tabuleiros Costeiros, seeking specifically (i) to determine the physical parameters, related to the cohesive character, which were influenced by soil pH and (ii) to evaluate the influence of pH on clay dispersion in soils with different clay concentrations. The experiment was conducted with material collected from the B horizons, with cohesive character - CCC and without cohesive character - SCC, of soils in areas with lower clay content (~200 g kg⁻¹ / Pacajus-CE) and higher clay content (~300 g kg⁻¹ / Fortaleza-CE). The samples were collected in polyvinyl chloride (PVC) tubes, 7 cm high and 5 cm in diameter, which were submitted to nine cycles of percolation with solutions with the following pH values: 4,25; 4,75; 5,25; 5,75 and 6,25. After the cycles, analyses of water dispersed clay (WDA), soil density (SD) and soil resistance to penetration (Rp) were performed, to evaluate if there was any influence on the degree of soil densification. Other physical and chemical analyses were performed to complement the results regarding clay translocation due to pH influence. The factorial scheme was 2 x 2 x 5, where the first factor corresponds to the two soils (with more and with less clay), the second factor corresponds to the Bt horizons with cohesive character and without cohesive character and the third factor corresponds to the five pH values, with five repetitions. We conclude that: (i) the hypothesis was confirmed for the Fortaleza horizon - SCC (FSC) and refuted for the Pacajus-SCC (PSC); (ii) some variables identifying the cohesive character were sensitive to the treatment with pH solutions, as D_s and R_p in the (PSC) and there was no translocation of the water dispersed clay (WDA) by the influence of pH that characterizes the horizon as cohesive. The treatment with the solutions (different pH) favored the dispersion of clay in the FSC horizon; (iii) in the Fortaleza - CCC (FCC) horizon the less acidic solutions contributed to increased densification; in the Pacajus - CCC (PCC) horizon the ADA contents were not altered, but it was observed that fine material was lost

during the cycles of percolating solutions; (iv) the physical parameters influenced by the pH of the percolating solutions were R_p , D_s , total clay, ADA, flocculation degree and total porosity.

Keywords: Coastal Tablelands; argiluviation; densification; clay dispersion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Formação Barreiras	14
2.2	Tabuleiros costeiros	15
2.3	Atributo diagnóstico: caráter coeso	16
2.3.1	<i>Caráter coeso: aspectos genéticos</i>	17
2.3.2	<i>Caráter coeso: identificação</i>	18
2.4	O pH	20
2.5	Origem das cargas elétricas do solo	21
2.6	Caulinita	22
2.7	Comportamento da dupla camada difusa	22
2.8	Influência do pH na dispersão e floculação	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Caracterização das áreas e seleção dos perfis	25
3.2	Coleta do solo e delineamento adotado	27
3.3	Caracterização do solo em estudo	28
3.4	Ensaio laboratorial	28
3.5	Análises físicas	30
3.5.1	<i>Resistência do solo à penetração (RP)</i>	30
3.5.2	<i>Densidade do solo (ρ_s)</i>	31
3.5.3	<i>Granulometria</i>	32
3.5.4	<i>Argila dispersa em água (ADA)</i>	33
3.5.5	<i>Grau de floculação (GF)</i>	33
3.5.6	<i>Densidade das partículas (ρ_p)</i>	33
3.5.7	<i>Porosidade total</i>	34
3.5.8	<i>Umidade residual</i>	34
3.6	Análises químicas	34
3.6.1	<i>Bases trocáveis e hidrogênio extraível</i>	35
3.6.2	<i>Capacidade de troca de cátion (CTC)</i>	35
3.6.3	<i>Potencial hidrogeniônico (KCL e H₂O)</i>	36
3.7	Análises Estatísticas	36

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Resistência do solo à penetração	37
4.2.	Densidade do solo e densidade das partículas	43
4.3.	Análise granulométrica	46
4.4.	Argila dispersa em água	52
4.5.	Grau de flocculação e porosidade total	58
4.6.	Análises químicas	63
4.7.	Análises multivariadas	66
5	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A - CÁLCULOS REALIZADOS NO PREPARO DAS SOLUÇÕES DE PH	82
	APÊNDICE B - FOTOS DE MANCHAS NA COR DE ALGUNS TRATAMENTOS FSC - FCC	83
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS ANÁLISES QUÍMICAS ...	84
	APÊNDICE D – ATRIBUTOS CONSIDERADOS PARA ANÁLISES MULTIVARIADAS	87
	APÊNDICE E – DADOS ESTATÍSTICOS DA DENSIDADE	88
	ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DOS PERFIS DE FORTALEZA E PACAJUS	89

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os Tabuleiros Costeiros distribuem-se ao longo da faixa litorânea, associados aos sedimentos da Formação Barreiras, que ocorrem desde o estado do Rio de Janeiro até o Amapá (Arai, 2006), e são caracterizados por relevo tabular e áreas planas (Pereira e Cestaro, 2012). No que se refere à região Nordeste, esses Tabuleiros apresentam condição climática favorável em razão de sua localização, que, embora dividida entre estações secas e período chuvoso, situa-se em uma zona mais úmida (Nunes, Silva e Vilas Bôas, 2011).

Essas condições climáticas e de relevo, associadas à proximidade de grandes centros consumidores e à infraestrutura para o escoamento da produção, têm despertado interesse, tornando-se fatores importantes para a exploração agrícola. Embora tais condições sejam satisfatórias, esses solos podem apresentar limitações em alguns horizontes, relacionadas ao caráter coeso, o qual representa um impedimento físico ao desenvolvimento das raízes das plantas e ao fluxo de água.

As características de consistência, resistência e adensamento observadas nesses horizontes dos solos dos Tabuleiros Costeiros proporcionaram a inclusão do atributo diagnóstico “caráter coeso” no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2018).

Segundo o SiBCS (Santos *et al.*, 2018), o caráter coeso é atribuído a horizontes subsuperficiais cujo adensamento é de natureza pedogenética, apresentando resistência à penetração, são duros a extremamente duros quando secos e friáveis ou firmes quando úmidos. Apresentam fraca organização estrutural e podem ser maciços, com tendência à formação de blocos, e textura de média a fina. O Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (Santos *et al.*, 2015) indica que essa característica se desenvolve a partir de sedimentos da Formação Barreiras, ocorrendo com expressividade em Argissolos e Latossolos, e classifica a coesão em dois graus: (a) moderadamente coeso e (b) fortemente coeso.

No tocante à pedogênese do caráter coeso, existem algumas comprovações que indicam sua formação, embora certos aspectos ainda não estejam elucidados. Para Vieira *et al.* (2012), a gênese desse horizonte está associada à cimentação fraca ou moderada de compostos amorfos, envolvendo a presença de material sílico-aluminoso e sílica. Corrêa *et al.* (2008), em estudos

realizados na Bahia, associaram a gênese desse caráter à presença de argilas muito finas (menores que $0,2 \mu\text{m}$) e à translocação entre horizontes ou dentro do mesmo. Segundo Lima Neto *et al.* (2009), sua formação pode estar relacionada à deposição de argila dispersa nos microporos, à argila iluvial, à alternância de ciclos de umedecimento e secagem e à presença de compostos orgânicos, bem como ao acúmulo de sílica secundária.

Embora ainda não existam estudos que comprovem que o pH seja um fator influenciador na gênese do caráter coeso, a pedogênese do solo pode ser afetada por processos de floculação e dispersão das partículas. A interação entre duas partículas depende da intensidade das forças de atração e repulsão que atuam simultaneamente. Como a quantidade de cargas elétricas é dependente do pH do solo, este afeta diretamente o processo de floculação e dispersão das partículas (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015).

O presente estudo foi desenvolvido com o intuito de analisar se há influência do pH na formação de horizontes com caráter coeso. Para isso, a hipótese testada é baseada na existência de valores de pH, que ocorrem naturalmente no solo, que contribuem na formação de horizontes com caráter coeso por influenciarem a dispersão das argilas. O objetivo geral foi avaliar a faixa de pH (entre 4,25 e 6,25) que pode contribuir para a dispersão da argila, favorecendo a argiluviação e o adensamento de solos dos Tabuleiros Costeiros. Os objetivos específicos foram: i) avaliar a influência do pH na dispersão da argila em solos com diferentes conteúdos de argila; ii) determinar os parâmetros físicos, relacionados ao caráter coeso, que foram influenciados pelo pH do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abaixo, estão pontuados os principais assuntos para compreensão do objeto de estudo.

2.1 Formação Barreiras

Arai (2006) e Suguio e Nogueira (1999) afirmam que, há muito tempo, estudiosos da área observaram, ao longo da faixa litorânea que se estende do estado do Rio de Janeiro até o Amapá, a ocorrência de uma notável sequência contínua de sedimentos pouco ou não consolidados, litologicamente variando entre argilas e conglomerados, e apresentando estratificação irregular e bastante distinta. Essa sequência de sedimentos, denominada Formação Barreiras, é bem delimitada dentro da coluna estratigráfica, repousando sobre as formações cretáceas, o embasamento cristalino ou formações terciárias marinhas, destacando-se por uma erosão bastante expressiva (Mabesoone *et al.*, 1972).

Os registros sobre a Formação Barreiras chamaram a atenção dos navegadores portugueses quando chegaram à costa do Brasil em 1500 (Arai, 2006). Em carta ao rei de Portugal, Pero Vaz de Caminha atribuiu a essa unidade litoestratigráfica a designação de “Barreiras”, referindo-se às falésias dessa formação

Segundo Costa *et al.* (2002), no final da época Plioceno, e de acordo com Rêgo *et al.* (2019), no início do Pleistoceno — há aproximadamente dois milhões de anos —, favorecida por um clima quente e árido, ocorreu a deposição dos sedimentos que originaram a Formação Barreiras. Diversos autores (Suguio e Nogueira, 1999; Vilas Bôas, Sampaio e Pereira, 2001; Nunes, Silva e Vilas Bôas, 2011) afirmam que a idade da Formação Barreiras varia do Mioceno ao Pleistoceno inferior. No entanto, Moura-Fé (2014), ao estudar o tema, concluiu que ainda existem muitas imprecisões quanto à sua idade geológica.

Morais *et al.* (2006) consideram que a designação “Barreiras” tem sido empregada com significado estratigráfico. Mabesoone *et al.* (1972) relataram que, em estudos realizados nos arredores de Pernambuco, devido à presença de uma desconformidade erosiva, a área poderia ser dividida em duas formações: a inferior, denominada Formação Guararapes, e a superior, Formação Riacho Morno. A união

dessas duas formações representaria, terminologicamente, um grupo: o Grupo Barreiras. Diante disso, Suguio (1998, *apud* Moura-Fé, 2014) ressalta que, por não existir um tamanho pré-determinado para essas unidades, o conjunto não pode ser subdividido em formações distintas. Assim, Moura-Fé (2014) recomenda o uso da terminologia Formação Barreiras para aplicação atual.

Os sedimentos da Formação Barreiras estão associados às feições geomorfológicas predominantes dessa região, conhecidas como Tabuleiros Costeiros. Romero e Lima (2004) relatam que os sedimentos gerados pela atuação de processos pedogenéticos na Formação Barreiras dão origem aos solos dos Tabuleiros Costeiros.

2.2 Tabuleiros costeiros

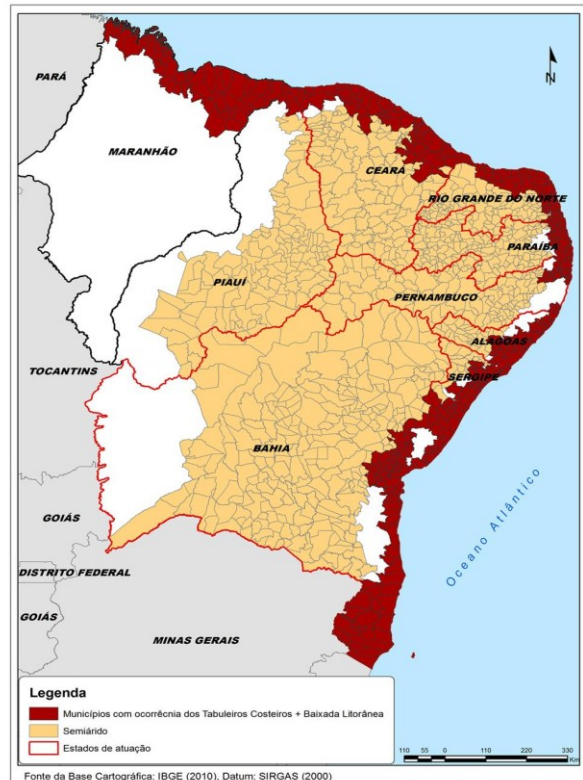
Assim como proposto etimologicamente, o termo Tabuleiros Costeiros é definido em função de suas formas tabulares, composição sedimentar e localização costeira. Dessa forma, o conceito de Tabuleiros Costeiros está sobretudo relacionado às características geológicas, morfológicas e de localização (Pereira e Cestaro, 2012). Ocorrendo em toda a faixa litorânea da região Nordeste do país e sob diferentes condições climáticas, os Tabuleiros Costeiros ocupam grande extensão do litoral (Figura 1), distribuídos nos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Maranhão (Marques, 2019).

Segundo Dantas *et al.* (2014), estudos realizados no leste do Maranhão indicam que os sedimentos da Formação Barreiras deram origem a solos com predominância de caulinita na fração argila. Essa mesma característica mineralógica caulínica também foi observada em estudos conduzidos por Lima Neto *et al.* (2009) no estado de Alagoas, evidenciando que o elevado grau de intemperismo desses solos é uma marca da unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros.

Entre as classes de solos predominantes nos Tabuleiros Costeiros, destacam-se os Latossolos e Argissolos Amarelos, que se sobressaem em relação às demais classes em quase todos os estados da região Nordeste, como Pernambuco, Bahia, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Paraíba (Jacomine, 1996). No entanto, outras classes podem ocorrer em menor expressão, como Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Acinzentados,

Latosolos Vermelho-Amarelos, Plintossolos e Espodossolos (Jacomine, 1996; Araújo Filho, Carvalho e Silva, 2001, Vieira, 2013).

Figura 1 - Localização dos Tabuleiros Costeiros no Nordeste brasileiro



Fonte: DOMPIERI *et al.*, 2015.

Os Tabuleiros Costeiros podem apresentar solos com adensamento em alguns de seus horizontes; em decorrência disso, é atribuído o diagnóstico denominado caráter coeso (Santos *et al.*, 2018). Esse atributo pode ocasionar impedimentos físicos à penetração das raízes e à dinâmica da água (Araújo *et al.*, 2018).

2.3 Atributo diagnóstico: caráter coeso

Santos *et al.* (2018), no SiBCS, apresentam o caráter coeso no terceiro nível categórico das classes de Latossolos e Argissolos. A ocorrência desse caráter foi registrada por Duarte *et al.* (2000) e Giarola *et al.* (2009) no Espírito Santo, Fonsêca *et al.* (2007) e Cintra *et al.* (2009) em Sergipe, Silva *et al.* (1998), Oliveira (2008) e Lima Neto *et al.* (2010) em Alagoas, Lima *et al.* (2004) e Vieira *et al.* (2012)

no Ceará, Macedo *et al.* (2008) e Ramos *et al.* (2013) no Rio de Janeiro, Resende *et al.* (2014) e Dantas *et al.* (2014) no Maranhão, Corrêa (2005), Santana *et al.* (2006), Corrêa *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2019) na Bahia, Melo *et al.* (2014) e Marcelo (2015) em Pernambuco e Sena (2016) no Amapá.

Segundo alguns autores, a ocorrência de solos com caráter coeso está relacionada a depósitos sedimentares da Formação Barreiras, pertencentes às unidades geomorfológicas que se estendem por grandes regiões da costa litorânea brasileira, denominadas Tabuleiros Costeiros, apresentando em sua composição materiais argiloarenosos, argilosos e arenosos, com alto grau de intemperismo (Corrêa, 2005; Corrêa *et al.*, 2015; Dantas *et al.*, 2014; Silva, 2019).

Os horizontes que apresentam caráter coeso, em condições naturais, têm fraca organização estrutural e, geralmente, são maciços, com tendência à formação de blocos (Giarola e Silva, 2002; Santos *et al.*, 2018). Deve-se destacar que, quando uma amostra seca de solo com esse caráter coeso é imersa em água, ela se desmancha (Santos *et al.*, 2018).

Pode-se observar esse atributo em horizontes transicionais AB e/ou BA, normalmente entre 30 e 70 cm de profundidade, podendo ainda se prolongar até o horizonte Bw ou coincidir com o Bt, integral ou parcialmente (Santos *et al.*, 2018). Contudo, em alguns trabalhos sobre o tema, o caráter coeso foi registrado em horizontes abaixo de 100 cm de profundidade (Duarte, 2013; Vieira, 2013; Duarte, 2015; Bezerra *et al.*, 2014).

2.3.1 Caráter coeso: aspectos genéticos

Com base nos trabalhos de diferentes pesquisadores (Giarola e Silva, 2002; Lima Neto *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2012; Vieira, 2010; Paula, 2018), ainda há muita discussão sobre a gênese do caráter coeso. Alguns estudos relacionam-no à forte instabilidade estrutural, à argila dispersa nos microporos, ao adensamento por dessecação resultante da alteração da estrutura do solo devido à alternância dos ciclos de umedecimento e secagem, assim como à presença de sílica secundária.

Corrêa *et al.* (2008) e Lima Neto *et al.* (2010) afirmam que a gênese do caráter coeso está relacionada à migração da fração argila com diâmetro inferior a 0,002 mm, na forma de argila dispersa, ocorrida no processo pedogenético de argiluviação, em que a argila é transportada das camadas superficiais para as

subjacentes, entre os horizontes ou dentro do mesmo horizonte, causando obstrução da rede porosa.

Para Araújo Filho, Carvalho e Silva (2001), a gênese ocorre durante o período de secamento do solo e, dependendo do grau de umidade, a sílica e outros aluminosilicatos, quando em excesso, atuam como agentes cimentantes, favorecendo o endurecimento temporário do horizonte.

Segundo Bezerra *et al.* (2014), a gênese também está relacionada a partículas de areia mal selecionada, pois os grãos menores se acomodam nos grandes espaços deixados pelos grãos maiores. Associado a isso, o material fino é depositado por argiluviação, preenchendo os poros existentes entre as areias mal selecionadas e reduzindo significativamente o volume de vazios.

Os trabalhos de Vieira *et al.* (2012) e Vieira (2013) mostram que os compostos amorfos (mal cristalizados) e os ciclos de umedecimento e secagem influenciam na alta resistência do solo à penetração, sendo esses fatores determinantes na pedogênese de solos com caráter coeso.

Lima *et al.* (2006) indicam que o adensamento está relacionado à porosidade, uma vez que o tamanho (pequeno), o formato (arredondado) e a orientação (horizontal) das partículas influenciam diretamente o processo nas áreas adensadas. Menezes (2016), em trabalho sobre a rede porosa de solos com caráter coeso, concluiu que os horizontes com esse atributo apresentam rede porosa distinta quanto à morfologia, com orientação horizontal e funcionalidade reduzida quando comparados a solos sem caráter coeso.

Giarola *et al.* (2009), trabalhando com solos dos Tabuleiros Costeiros de diferentes estados do Nordeste, observaram baixo grau de ordenamento cristalino das caulinitas, o que não favorece o ajuste face a face desse argilomineral.

2.3.2 Caráter coeso: identificação

Os primeiros relatos que identificaram o caráter coeso datam da década de 1950, contudo, a partir da década de 1980, os estudos começaram a ser intensificados (Jacomine, 1996). Embora o tema já fosse mencionado em pesquisas anteriores, o caráter coeso não estava inserido na classificação de solos, sendo citado apenas como uma característica de consistência observada em campo (Vieira, 2013). Apesar dos avanços nas pesquisas em ciência do solo, a identificação

desse caráter ainda é realizada de forma qualitativa, por meio da análise morfológica do perfil, na qual se avalia a consistência do solo nos estados úmido, seco e molhado, podendo-se, posteriormente, indicar o grau de coesão do material (Santos *et al.*, 2015).

A resistência do solo à penetração (R_p) aumenta à medida que a umidade do solo diminui, ocorrendo de forma linear em horizontes sem coesão e de maneira exponencial nos horizontes coesos (Vieira, 2013). Em geral, a R_p em horizontes coesos excede 3 MPa (Giarola e Silva, 2002). Em estudos conduzidos por Giarola *et al.* (2001), em solos com baixa umidade, foi determinada uma R_p de 12,76 MPa em horizontes coesos e de 1,44 MPa em horizontes não coesos.

Diversos autores (Giarola *et al.*, 2001; Vieira, 2012; Dantas *et al.*, 2014; Bezerra *et al.*, 2014) observaram que o elevado valor de R_p é um parâmetro quantitativo útil para a identificação de horizontes com caráter coeso. Santana *et al.* (2006) complementam que esse atributo é altamente responsivo na identificação do caráter coeso sob diferentes condições de umidade, devendo ser avaliado em teores de umidade inferiores àqueles considerados críticos para expressar a coesão.

Araújo Filho, Carvalho e Silva (2001); Giarola *et al.* (2001); Santana *et al.* (2006); Dantas *et al.* (2014) e Bezerra *et al.* (2014) observaram que o alto valor da densidade do solo (D_s) é uma das principais propriedades associadas à identificação do horizonte coeso. Araújo Filho, Carvalho e Silva (2001) destacam que a D_s varia de 1,5 a 1,8 g/cm³ em horizontes coesos e, quando associada ao aumento da R_p (Giarola *et al.*, 2001), pode provocar restrições ao desenvolvimento radicular das culturas.

Santana *et al.* (2006) e Ramos *et al.* (2013) avaliaram a macroporosidade e observaram que essa propriedade é importante na identificação do caráter coeso, apresentando valores entre 0,03 m³/m³ e 0,12 m³/m³. Segundo os autores, a macroporosidade pode até substituir a condutividade hidráulica saturada como indicador, por ser de determinação mais simples e apresentar menor variabilidade. A microporosidade, por outro lado, não se mostrou um atributo indicativo para caracterizar a coesão.

Giarola *et al.* (2001), Moreau *et al.* (2006), Lima Neto *et al.* (2010) e Dantas *et al.* (2014) observaram que o teor de argila dispersa em água em horizontes coesos é elevado quando comparado aos horizontes superficiais, constituindo uma análise complementar na identificação desse caráter.

Bezerra *et al.* (2014) e Araújo *et al.* (2018) verificaram que, partindo de uma textura argilosa a argiloarenosa, o elevado teor de partículas de areia mal selecionadas, associado ao processo de argiluviação, pode atuar como indicativo da presença de coesão.

Silva *et al.* (2020) afirmam que a resistência tênsil (RT) está diretamente relacionada ao teor de argila. Os autores evidenciam que o aumento do teor de argila implica no aumento da RT, inferindo, assim, que essa propriedade está fortemente associada à coesão do solo.

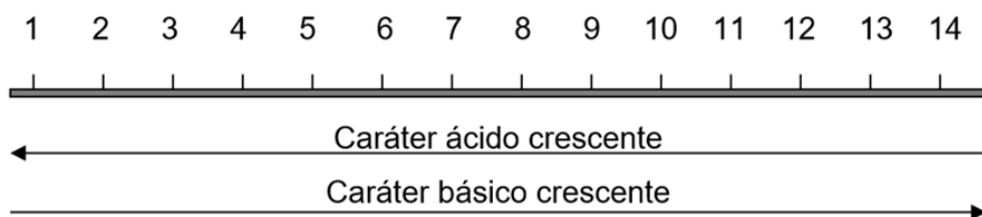
Santana *et al.* (2006), Lima Neto *et al.* (2009), Ramos *et al.* (2013) e Santos *et al.* (2019) investigaram a condutividade hidráulica saturada em solos coesos e observaram que essa propriedade se apresenta reduzida, em função do conteúdo de água, quando comparada à de solos sem o caráter coeso, concluindo que esse parâmetro é adequado para o diagnóstico de camadas coesas.

2.4 O pH

O potencial hidrogeniônico (pH) é um índice que expressa o caráter de acidez ou basicidade de uma solução. Sua determinação se baseia na concentração de íons $[H^+]$ ou $[OH^-]$, sendo o pH definido como o logaritmo negativo (Eq. 1) da concentração de íons hidrogênio na solução. Em uma escala simplificada que varia de 0 a 14 (Figura 2), valores baixos indicam acidez e valores altos indicam alcalinidade (Feltre, 2004).

No solo, o grau de acidez ou alcalinidade é denominado acidez ativa, observada por meio da atividade do íon H^+ na solução do solo (Lopes, 2017). O controle do pH é extremamente importante, pois, na agricultura, cada cultura exige uma faixa adequada para seu melhor desenvolvimento (Feltre, 2004).

Figura 2 - Escala para soluções básicas e ácidas



Fonte: Feltre, 2004.

Segundo Meurer, Rheinheimer e Bissani (2015), a maior parte dos solos brasileiros é ácida, apresentando pH inferior a 5,5. Para o crescimento da maioria das culturas, a faixa de pH mais favorável situa-se entre 5,7 e 6,0 (Sousa, Miranda e Oliveira, 2007).

Quando as fases sólidas (mineral e orgânica) e líquida (solução do solo – ácida ou básica) interagem, ocorrem inúmeras reações nessa interface sólido-líquido, alterando o ambiente químico do solo. A adsorção de íons é um dos mecanismos atuantes nessa interface e influencia diretamente na presença e no comportamento das cargas elétricas superficiais da fase sólida (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015).

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] + \text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] = \text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (1)$$

2.5 Origem das cargas elétricas do solo

As cargas elétricas estão diretamente ligadas às partículas coloidais do solo, dependendo de sua origem permanente ou variável (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015).

As cargas elétricas permanentes originam-se na superfície dos argilominerais durante a substituição isomórfica (SI), independentemente do valor de pH do solo (Alleoni, Mello e Rocha, 2019). Nessa substituição, os raios iônicos do íon que substitui e do íon substituído devem ser semelhantes para que ocorra a troca de cátions centrais nos tetraedros ou octaedros, dentro da estrutura do mineral. Quando a substituição envolve um cátion de maior valência por outro de menor valência, ocorre um desbalanceamento de cargas, originando cargas negativas (Alleoni, Mello e Rocha, 2019). A SI é a principal fonte geradora de cargas negativas nos minerais do tipo 2:1, indicando a predominância das cargas permanentes nessa mineralogia da fração argila (Kampf, Marques e Curi, 2015; Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

As cargas elétricas variáveis resultam da adsorção de íons na superfície dos colóides minerais [bordas quebradas dos filossilicatos, sítios de troca bloqueados e sesquióxidos de Fe e Al] e orgânicos [dissociação dos grupos funcionais], sendo denominadas íons determinadores de potencial. Dentre esses, os principais são H^+ e OH^- , possibilitando o uso terminológico do termo “cargas

dependentes do pH”, que podem ser positivas ou negativas (Alleoni, Mello e Rocha, 2019). Na superfície desses colóides orgânicos ou inorgânicos [minerais], a fonte geradora de cargas elétricas dos argilominerais do tipo 1:1 varia em função do pH da solução do solo, indicando a predominância de cargas variáveis (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

2.6 Caulinita

As cargas variáveis em solos de regiões tropicais ou subtropicais (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015) podem representar mais de 70% das cargas elétricas na superfície dos argilominerais do tipo 1:1 (Ribeiro *et al.*, 2011). A caulinita é o principal argilomineral do tipo 1:1 do grupo dos filossilicatos, sendo o mais comum nos solos brasileiros, com abundância em Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Plintossolos e Cambissolos (Kampf, Marques e Curi, 2015).

A depender das concentrações de H^+ e OH^- na solução do solo (IBGE, 2015), as cargas elétricas variáveis originadas podem influenciar os processos de protonação e desprotonação (Ribeiro *et al.*, 2011). Nesse processo, destaca-se a adsorção de cátions, que influencia o valor do ponto de carga zero (PCZ) (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

Para cada solo, existe um valor de pH em que a quantidade de cargas elétricas positivas é igual à de cargas elétricas negativas, esse valor de pH é denominado PCZ (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015), pois, no PCZ, não há predominância de carga (Baldotto e Veloso, 2013). Quando o pH está abaixo do PCZ, o balanço de cargas elétricas é positivo, já quando o pH está acima do PCZ, esse balanço é predominado por cargas elétricas negativas (Kampf, Marques e Curi, 2015).

O mineral do tipo caulinita possui ponto isoelétrico (PIE) de 5,25 (Kampf, Marques e Curi, 2015) e, quando medido eletrocineticamente, o PIE é igual ao ponto de carga zero (PCZ) (Fontes, Camargo e Sposito, 2001). O PCZ constitui a propriedade mais importante dos fenômenos que ocorrem na dupla camada elétrica de interface reversíveis (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

2.7 Comportamento da dupla camada difusa

As cargas elétricas na superfície dos argilominerais possibilitam a geração de campos elétricos que atraem íons da solução do solo, cátions são atraídos por cargas negativas e ânions por cargas positivas. Esses íons ficam distribuídos em torno dos colóides com cargas elétricas, dando origem à camada difusa (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

O modelo da dupla camada difusa (DCD), que explica a distribuição dos íons em torno das partículas carregadas eletricamente, é conhecido como modelo de Gouy-Chapman (Amaro Filho, Assis Júnior e Mota, 2008). A premissa é que há uma maior concentração de cátions atraídos na superfície carregada negativamente (camada de Stern), enquanto os ânions são repelidos, chegando a uma concentração próxima de zero (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015). À medida que os cátions são atraídos pelas cargas negativas das partículas, os ânions são repelidos, formando duas regiões sob influência do campo elétrico, as quais explicam o equilíbrio e o desequilíbrio das soluções quanto à concentração desses íons (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

A espessura da camada difusa depende da concentração de íons na solução do solo, da valência e do grau de hidratação, relacionados à formação e à complexação de superfície (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015). O efeito dessas combinações influencia as forças de difusão e atração dos íons e, conseqüentemente, os processos de dispersão ou floculação. A teoria proposta por Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek (teoria DLVO) estabelece que o balanço eletrostático é utilizado para explicar os processos de floculação e dispersão de colóides (Azevedo e Bonumá, 2004).

2.8 Influência do pH na dispersão e floculação

Em solos que apresentam cargas dependentes de pH, algumas propriedades podem influenciar os processos de floculação e dispersão das partículas (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015). Quando o pH está acima do estabelecido pelo PCZ, as cargas elétricas dependentes de pH se elevam, causando repulsão entre as partículas (Cunha *et al.*, 2014). Quando o pH está próximo ou abaixo do PCZ, o predomínio de cátions se sobressai, promovendo a floculação entre as partículas (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015).

Na análise granulométrica de solos com cargas variáveis, quando o pH está elevado (básico), a geração de cargas elétricas negativas favorece o predomínio das forças que causam a repulsão das partículas, dispersando as argilas. À medida que o pH é reduzido (ácido), a geração de cargas positivas causa a aproximação das partículas e, conseqüentemente, a floculação do material em suspensão (Guimarães *et al.*, 2013).

A espessura da DCD também afeta os processos de dispersão e floculação. À medida que as forças predominantes são de origem na complexação de esfera-externa [a qual as moléculas de água permitem apenas uma atração eletrostática entre íons e a superfície de carga oposta], devido à presença de cátions monovalentes ou à baixa concentração de eletrólitos, as forças são repulsivas. Quando as forças são originadas da complexação de esfera-interna [em que não há molécula de água influenciando a atração, possibilitando uma ligação direta do íon ao grupo funcional], a presença de íons di, tri e tetravalentes comprime a DCD (Meurer, Rheinheimer e Bissani, 2015).

A hidratação dos íons é outro fator que afeta o processo de floculação e dispersão, pois os íons hidratados são responsáveis por promover a compressão ou a expansão da DCD. A série liotrópica expressa a ordem de afinidade quanto à valência e hidratação de um íon com a superfície das partículas, apresentando a seguinte sequência: $H^+ \ggg Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ \sim NH_4^+ > Na^+$. Da esquerda para a direita, a série indica o aumento da afinidade de atração (Alleoni, Mello e Rocha, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, com material coletado em duas áreas dos Tabuleiros Costeiros, nos municípios de Fortaleza e Pacajus, Estado do Ceará.

3.1 Caracterização das áreas e seleção dos perfis

O trabalho foi desenvolvido com material de horizontes de solos sem caráter coeso (SCC) e com horizontes com caráter coeso (CCC) em duas áreas de Tabuleiros Costeiros do Estado do Ceará. Os locais foram selecionados com base em estudos precedentes realizados por Vieira (2013). As coletas foram realizadas em uma trincheira no Campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará, no município de Fortaleza-CE, e em um corte de estrada no município de Pacajus-CE, à margem direita da Rodovia Santos Dumont (BR-116), sentido Fortaleza-Pacajus. A Tabela 1 destaca a localização em coordenadas das áreas de estudo.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das áreas de estudo

Local	Latitude/Longitude
Fortaleza (P1)	4° 11' 27,30" S 38° 28' 37" W
Pacajus (P2)	4° 11' 27,3" S 38° 28' 48,6" W
Pacajus (P3)	4° 11' 30,6" S 38° 28' 36,7" W

Fonte: Elaborado pela autora

As características gerais das áreas estão dispostas na Tabela 2.

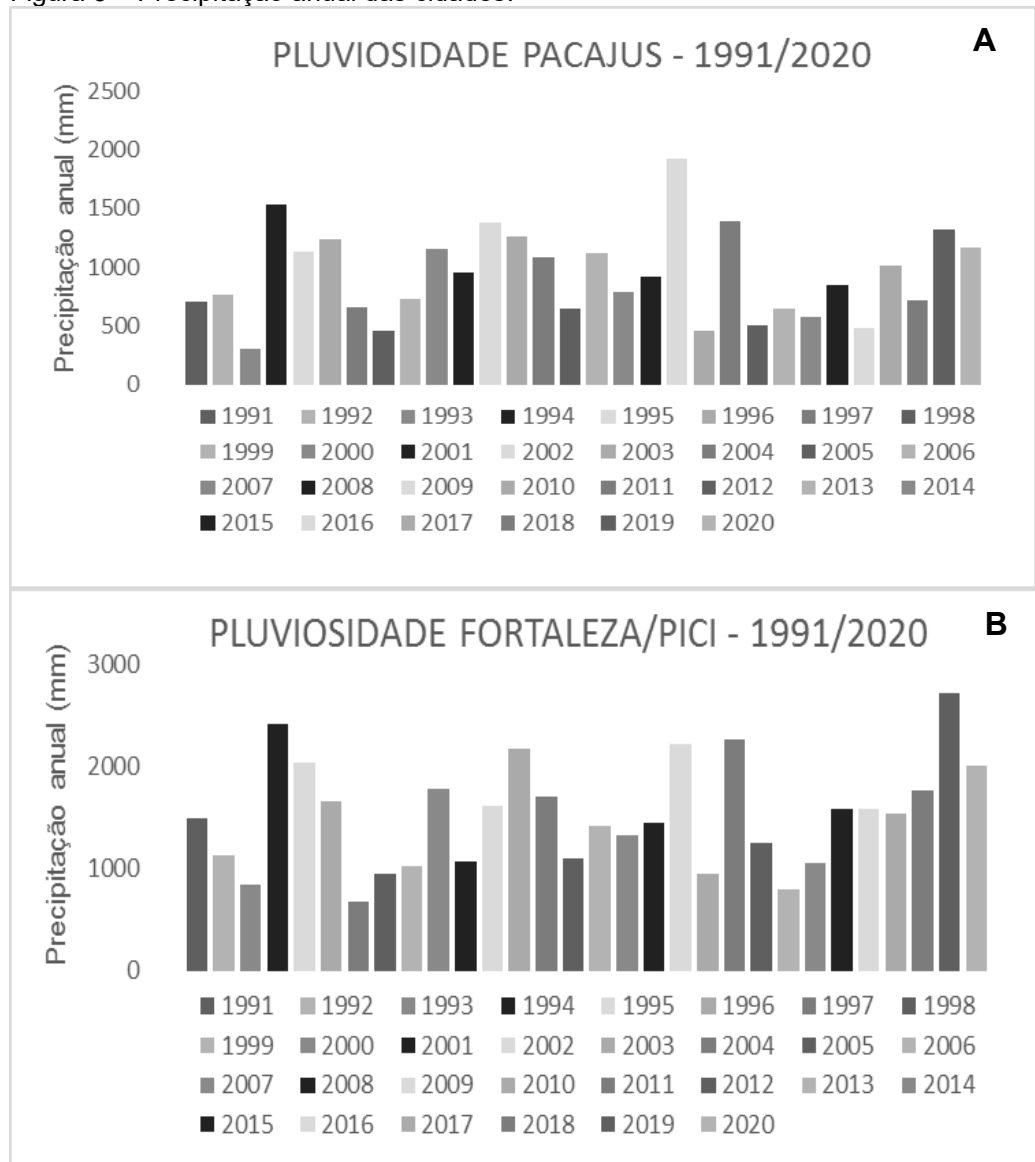
Tabela 2 – Características gerais das áreas de estudo.

Local	Clima*	Vegetação	Período chuvoso
Fortaleza	Aw' Tropical quente sub-úmido com chuvas de verão	Complexo Vegetacional da Zona Litorânea e Floresta Perenifólia Paludosa Marítima	Janeiro a maio
Pacajus	Aw, Tropical quente semiárido brando	Caatinga Arbustiva Densa e Complexo Vegetacional da Zona Litorânea	Janeiro a abril

Fonte: IPECE, 2017. * Classificação de Koppen.

As precipitações médias foram de 930,72 mm e 1. 522,77 mm, respectivamente, em Pacajus (Figura 3A) e Fortaleza (Figura 3B). As duas áreas foram selecionadas com o intuito de coletar solo do horizonte B com maior (textura franco-argilo-arenosa) e menor (textura franco-arenosa) conteúdo de argila.

Figura 3 – Precipitação anual das cidades.



A*: Código do posto de coleta – 103 – Pacajus B*: Código do posto de coleta – 363 – PICI

Fonte: FUNCEME, (2021) adaptado pela autora.

No município de Fortaleza, o mesmo perfil foi utilizado para a coleta nos horizontes com caráter coeso (Bt2) e sem caráter coeso (Bt1), pois o teor de argila é semelhante. No município de Pacajus, a coleta foi realizada em perfis diferentes, situados a aproximadamente 60 m de distância, para que os horizontes com e sem caráter coeso apresentassem conteúdo de argila semelhante (Tabela 3).

Tabela 3 – Horizontes com caráter coeso e sem caráter coeso dos Tabuleiros Costeiros

Perfil	Local	Horizonte	Prof. (cm)	Teor de argila (g kg ⁻¹)
Coeso				
P1	Fortaleza	Bt2	79-112	338
P2	Pacajus	Bt	125-156+	221
Não Coeso				
P1	Fortaleza	Bt1	63-79	317
P3	Pacajus	Bt2	152-173	217

Fonte: VIEIRA (2013), adaptado pela autora.

3.2 Coleta do solo e delineamento adotado

A coleta do solo foi realizada nos horizontes Bt, Bt1 e Bt2, seguindo a localização e as características de cada horizonte (Tabela 4). As amostras de solo foram coletadas com (a) estrutura preservada, em tubos de PVC com 7 cm de altura e 5 cm de diâmetro (Figura 4), com tecido em sua extremidade inferior para evitar perda de solo, e (b) estrutura não preservada, para caracterização do solo. As amostras com estrutura preservada foram utilizadas na condução do experimento.

Figura 4 - Coleta de solo em campo



Fonte: Autora.

O delineamento adotado foi inteiramente casualizado, com ensaio fatorial 2 x 2 x 5 e cinco repetições. O primeiro fator corresponde aos horizontes selecionados sem (SCC) e com caráter coeso (CCC). O segundo fator corresponde às diferentes porcentagens de argila dos solos. O terceiro fator corresponde aos cinco valores de pH das soluções utilizadas para umedecer o solo.

3.3 Caracterização do solo em estudo

A classificação dos solos e as características morfológicas dos horizontes selecionados seguem a descrição de Vieira (2013) e encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição morfológicas dos horizontes selecionados.

Local	Classe de solo	Hor.	Descrição morfológica
Fortaleza	P1: Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico	Bt1 SCC ¹	63-79 cm, bruno (7,5 YR 5/4 úmida), amarelo avermelhado (7,5 YR 6/6 seca); franco-argilo-arenosa, moderada média a grandes blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.
		Bt2 CCC ²	79-112 cm, bruno forte (YR 5/6 úmida), amarelo avermelhado (7,5 YR 6/6 seca); argilo-arenoso, maciça com tendências à formação de blocos subangulares; extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
Pacajus	P2: Argissolo Acinzentado Eutrófico abruptico	Bt CCC	125-156+ cm, cinzento-claro (10YR 7/2 úmida), branco (7,5 YR 8/1 seca), mosqueado bruno-amarelo-escuro (10 YR 4/4), abundante, grande, distinto; franco argilo arenosa; maciça com tendências à formação blocos subangulares; muito dura; friável, não plástica e não pegajosa.
		Bt2 SCC	152-173 cm, amarelo (10 YR 7/6 úmido) amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/4 seca); mosqueado amarelo-avermelhado (5YR 7/8) pouco médio a grande e proeminente; franco argilo arenosa; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

Fonte: VIEIRA (2013); FREITAS (2010), adaptado pela autora.
 SCC¹: Sem caráter coeso; CCC²: Com caráter coeso.

A descrição das características morfológica dos perfis dos solos em estudo, descritas por Vieira (2013) e Freitas (2010) encontram-se no (Anexo I).

3.4 Ensaio laboratorial

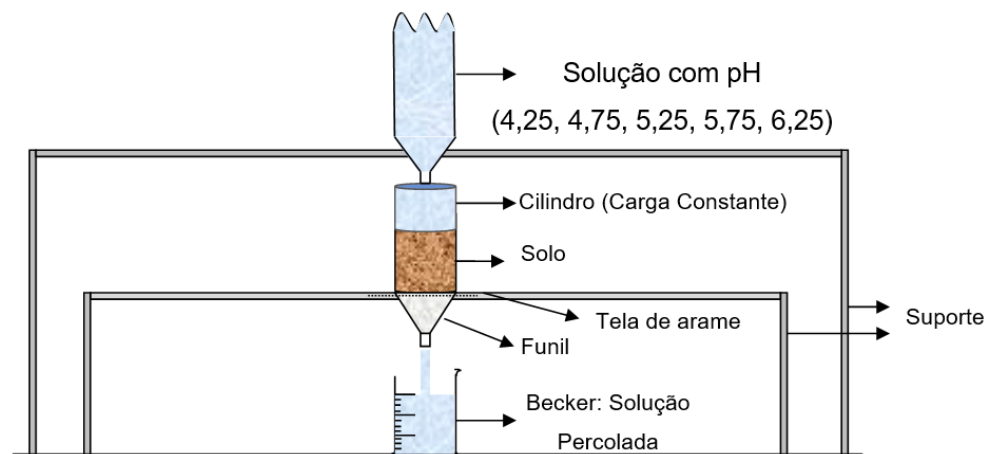
O material com estrutura não preservada foi colocado para secar ao ar, destorroado e peneirado em malha com abertura de malha de 2 mm, com o objetivo de obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), para realização das análises prévias.

As amostras com estrutura preservada foram submetidas a nove ciclos de solução percolante durante o umedecimento e, posteriormente, secas ao ar. Esses ciclos foram realizados com soluções preparadas (Apêndice I), utilizando água destilada, ácido clorídrico ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e hidróxido de sódio ($0,0025 \text{ mol L}^{-1}$). Os líquidos foram homogeneizados até alcançar os seguintes valores de pH: 4,25; 4,75; 5,25; 5,75 e 6,25 (Apêndice I). Esses valores de pH foram determinados com base no valor do PCZ da caulinita (*item 4. 4. 2*).

Antes de os tubos serem encaminhados para o ciclo da solução percolante, os cilindros foram deixados por 24 h em bandeja com uma lâmina de água destilada, para saturação do solo por capilaridade. Em seguida, os tubos de PVC foram colocados em um suporte de madeira de bancada e, posteriormente, acoplou-se um tubo adicional com as mesmas dimensões no topo do cilindro, semelhante ao permeâmetro de carga constante (Embrapa, 2017). Na parte superior do tubo foi adicionada a solução com o pH referente ao tratamento, com o auxílio de uma garrafa PET.

O volume de solução que percolou por ciclo em cada cilindro foi de 300 mL, em coluna d'água 170 mm, totalizando 1. 530 mm, do volume total com os nove ciclos de percolação, isso, semelhante a lâmina de água (precipitação pluvial de Fortaleza). O objetivo foi manter o fluxo da solução constante, semelhante ao esquema do permeâmetro de carga constante (Figura 5).

Figura 5 – Esquema do Permeâmetro de Carga Constante



Fonte: EMBRAPA, (2017); adaptado pela autora.

Após o término de cada ciclo, foi dado início a um novo ciclo de percolação até completar o último. Vale ressaltar que o tempo de percolação dos 170 mm nos tratamentos FCC e FSC foi de aproximadamente 72 h, enquanto nos tratamentos PCC e PSC foi de cerca de 10 h. Não houve uma estimativa padrão para o tempo de percolação, pois a conclusão de cada ciclo dependia das condições físicas do solo, como teor de argila e porosidade.

O número de ciclos foi estabelecido com base em Vieira (2013), que concluiu que a quantidade de 9 ciclos de umedecimento e secagem podem aumentar o adensamento, ocasionando mudanças consideráveis nos parâmetros físicos do solo.

3.5 Análises físicas

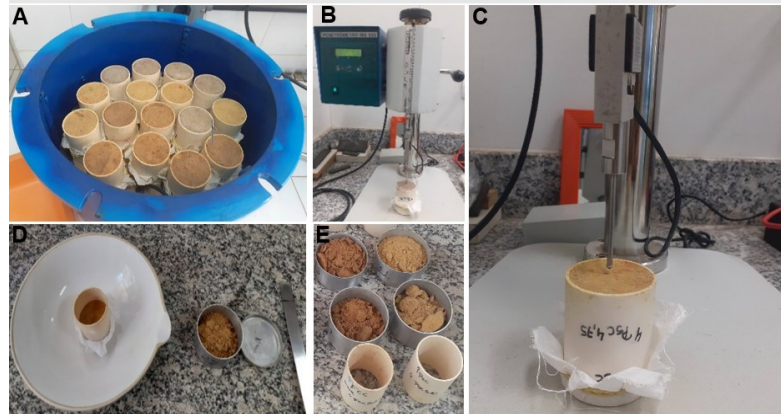
Os materiais de solo considerados para as análises físicas foram as posições superior (PS - 3,5 cm) e inferior (PI - 3,5 cm) do cilindro, com o objetivo de verificar se ocorreu mudança no teor de argila entre essas duas posições.

3.5.1 Resistência do solo à penetração (RP)

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em todos os tratamentos, com uma repetição por amostra, utilizando um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kgf (Silva, 2016), registrando uma leitura por segundo (Menezes, 2016). Para aquisição de dados, foi utilizado software próprio acoplado a um microcomputador conectado ao equipamento, conforme descrito por Tormena, Silva e Libardi (1998).

Após o ciclo de secagem, os tratamentos FSC foram levados ao equipamento, porém, o material encontrava-se extremamente seco, atingindo o limite do equipamento, com 15 kgf em aproximadamente 1 minuto. Diante disso, os cilindros foram levados à Câmara de Richards (Figura 6A) e submetidos à tensão de 5 atm, conforme sugerido por Vieira (2019), buscando o controle da umidade das amostras.

Figura 6 - Ensaio das análises de RP e densidade



Fonte: Autora.

Após esse processo, os cilindros do tratamento FSC foram novamente levados ao equipamento e realizada a leitura, no entanto, o valor de RP excedeu 12 kgf para o mesmo tratamento. Visando evitar dificuldades no tratamento FCC, os cilindros foram novamente levados à câmara e submetidos a uma tensão de 1 atm. Após atingir a uniformidade da umidade (1 atm), as amostras foram colocadas no equipamento para determinação da RP, utilizando o material da posição inferior (PI) do cilindro (Figuras 6B e 6C).

3.5.2 Densidade do solo (ρ_s)

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico. Após a determinação da resistência à penetração, as amostras foram colocadas em latas de alumínio e levadas à estufa a 105 °C até atingirem massa constante, sendo posteriormente pesadas, conforme metodologia sugerida pela Embrapa (2017). A densidade do solo foi obtida pela seguinte equação:

$$\rho_s = \left[\frac{\text{massa do solo}}{\text{volume solo}} \right] \quad (2)$$

em que:

ρ_s = densidade do solo em (g. cm⁻³)

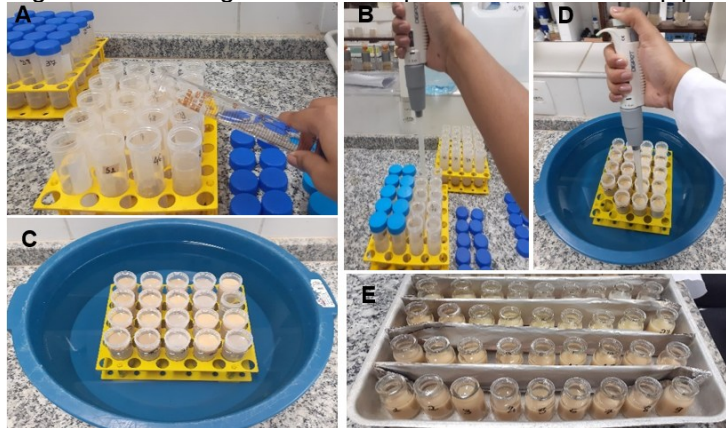
Após o cálculo da densidade, o material do cilindro foi separado em posições superior (PS) e inferior (PI) (*item 3. 5*) (Figuras 6D e 6E), destorroado, tamisado e acondicionado em sacos plásticos para início das análises com amostras indeformadas.

3.5.3 Granulometria

A quantificação da fração argila foi determinada pelo método da micropipeta, inicialmente proposto por Miller e Miller (1987), seguindo a marcha descrita em detalhes por Almeida (2008), com algumas adaptações realizadas por Queiroz *et al.* (2022). Foram utilizados 6 g de solo, aos quais foram adicionados 37 mL de água destilada e 3 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1 N, para dispersão química das partículas.

As amostras foram colocadas em tubos de centrifuga de 50 mL e agitadas por 14 horas em mesa de agitação horizontal, com 120 oscilações por minuto, para promover a dispersão química e física das partículas do solo. Após a agitação, os tubos foram colocados em repouso em banho-maria por 2 horas, a 23 °C, com o objetivo de atingir o equilíbrio térmico entre a suspensão e o ambiente (Figura 7). Para promover a homogeneização, após o repouso, o material foi agitado com um bastão de vidro.

Figura 7 - Ensaio granulométrico pelo método da micropipeta



Fonte: Autora.

A determinação da fração argila foi realizada por amostragem de 2,5 mL da solução dispersa. Um pipetador foi inserido a uma profundidade de 2,5 cm após o tempo de sedimentação, conforme calculado pela Lei de Stokes (os cálculos consideraram a sedimentação na profundidade h de 5 cm; no entanto, conforme recomendação de Mota *et al.* (2019), a inserção da ponta da pipeta ocorreu em $h/2$). O volume pipetado da solução dispersa foi transferido para um béquer de 30 mL de capacidade volumétrica e, em seguida, levado à estufa (105 °C, até massa constante) para determinação da massa da fração argila + dispersante. Foi realizada

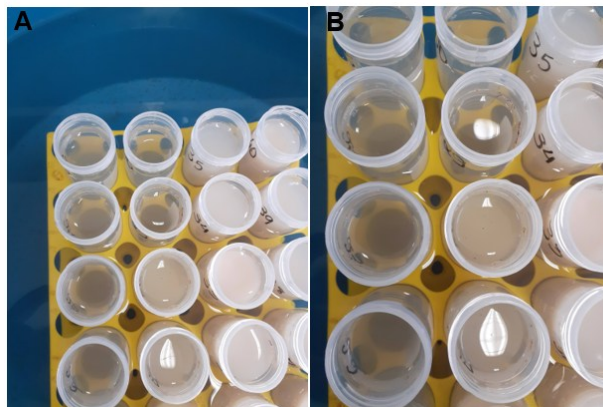
a pipetagem da prova em branco para determinar o dispersante (Figura 7). A areia foi determinada por tamisação e o silte, por diferença.

Foi considerado o material do cilindro da PS e PI para fazer a determinação da granulometria analisando essas duas posições.

3.5.4 Argila dispersa em água (ADA)

Foi adotado o mesmo procedimento da análise granulométrica, porém sem o uso do dispersante químico (Figura 8) e desconsiderando as frações areia e silte. Foi considerado o material do cilindro das posições PS e PI para a determinação da ADA, analisando essas duas posições.

Figura 8 - Ensaio granulométrico pelo método da micropipeta ADA



Fonte: Autora.

3.5.5 Grau de floculação (GF)

O grau de floculação (GF) foi calculado a partir da argila total e da argila dispersa em água, de acordo com a equação a seguir. Foi considerado o material do cilindro das posições PS e PI para a determinação do GF, analisando essas duas posições.

$$GF(\%) = \left[\frac{\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}}{\text{argila total}} \right] * 100 \quad (3)$$

3.5.6 Densidade das partículas (pp)

A densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. Após a determinação da densidade do solo, 20 g da amostra foram transferidos para um balão volumétrico, sendo posteriormente adicionado álcool etílico, conforme metodologia sugerida pela Embrapa (2017). A densidade das partículas foi obtida pela seguinte equação:

$$\rho_p = \left[\frac{\text{massa do solo}}{\text{volume total (balão)} - \text{volume gasto (completar balão)}} \right] \quad (4)$$

em que:

ρ_p = densidade das partículas em (g. cm⁻³)

3.5.7 Porosidade total

Obtida por método indireto, utilizando os valores da densidade das partículas (g cm⁻³) e da densidade do solo (g cm⁻³), seguindo a metodologia sugerida por Amaro Filho, Assis Júnior e Mota (2008). A porosidade foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\alpha = 1 - \left[\frac{\rho_s}{\rho_p} \right] . 100 \quad (5)$$

em que:

α (%) = porosidade

ρ_s (g. cm⁻³) = densidade do solo

ρ_p (g. cm⁻³) = densidade das partículas

3.5.8 Umidade residual

A umidade residual do solo foi determinada pelo conteúdo de água presente nas amostras, seguindo a metodologia sugerida pela Embrapa (2017).

$$\text{Umidade residual (\%)} = [(TFSA - TFSE) / TFSE] . 100 \quad (6)$$

3.6 Análises químicas

Optou-se por realizar as análises químicas porque a concentração de bases trocáveis pode influenciar os processos de dispersão e floculação do solo. O Al³⁺ influencia a movimentação do íon H⁺ nos sítios de troca. A capacidade de troca

de cátions (CTC) varia em função do pH da solução do solo, devido às cargas dependentes de pH (Meurer, Rhenheimer e Bissani, 2015).

3.6.1 Bases trocáveis e hidrogênio extraível

Os cátions cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) trocáveis foram extraídos com cloreto de potássio (KCl 1 M) e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica. O sódio (Na^+) e o potássio (K^+) trocáveis foram extraídos com solução de Mehlich 1 e determinados por fotômetro de chama.

Para a determinação da acidez potencial, hidrogênio e alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foram extraídos com solução de acetato de cálcio (1 N) e determinados por titulação de complexação com hidróxido de sódio (NaOH 0,0606 N), utilizando indicador fenolftaleína a 3% em álcool.

Na determinação da acidez trocável, o alumínio (Al^{3+}) foi extraído com solução de cloreto de potássio (KCl 1 N) e determinado por titulação de complexação com hidróxido de sódio (NaOH 0,025 N), utilizando indicador azul de bromotimol. Após a determinação, foi realizado o cálculo da saturação por alumínio. O hidrogênio extraível (H^+) foi determinado pela diferença algébrica entre a acidez trocável e a acidez potencial (Embrapa, 2017). Equações para determinação da acidez:

$$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+} (\text{cmol}_c. \text{kg}^{-1}) = V_{\text{NaOH}} - V_{\text{branco}} \quad (7)$$

$$\text{Al}^{3+} (\text{cmol}_c. \text{kg}^{-1}) = (V_{\text{NaOH}} - V_{\text{branco}}) \times [\text{NAOH}]_{\text{real}} \times 40 \quad (8)$$

$$m (\%) = (100 \cdot \text{Al}^{3+}) / (\text{Valor S} + \text{Al}^{3+}) \quad (9)$$

em que:

$\text{H}^+ + \text{Al}^3$ ($\text{cmol}_c. \text{kg}^{-1}$) = Acidez Potencial

V_{NaOH} = Volume de Hidróxido gasto

V_{Branco} = Volume do Branco

Al^{3+} ($\text{cmol}_c. \text{kg}^{-1}$) = Alumínio

$[\text{NAOH}]_{\text{real}}$ = Hidróxido de Sódio Padronizado (0,02304 M)

40 = equivale a conversão de $\text{mmol}_c. \text{kg}^{-1}$ para $\text{cmol}_c. \text{kg}^{-1}$

$m(\%)$ = Saturação por alumínio

Valor S = Soma de bases

3.6.2 Capacidade de troca de cátion (CTC)

A CTC do solo é definida como a capacidade que o solo possui de reter cátions na forma trocável, sendo obtida a partir da soma total dos cátions que o solo

pode reter na superfície coloidal, juntamente com a acidez potencial (Embrapa, 2017).

3.6.3 Potencial hidrogeniônico (KCl e H₂O)

O pH foi medido em H₂O e KCl, na proporção 1:2,5, por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido (Embrapa, 2017).

3.7 Análises Estatísticas

Os dados obtidos do delineamento experimental 2 x 2 x 5, com cinco repetições, foram submetidos à análise de variância, com comparação de médias pelo teste de Tukey ao nível de 5%. Foi realizada análise discriminante multivariada, com comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância, para verificar as maiores diferenças entre os tratamentos.

Com as médias das repetições, foi realizada análise de regressão para verificar a tendência dos tratamentos em função do pH, análise de componentes principais (PCA) para caracterizar os tratamentos e análise de agrupamento para verificar a similaridade entre eles.

Todas as pressuposições das análises estatísticas de variância, como homogeneidade de variância entre tratamentos, normalidade e independência dos resíduos das variáveis, foram verificadas. Quando uma dessas pressuposições não foi atendida, utilizou-se o método de transformação potencial ótima de Box-Cox nas variáveis, com o objetivo de atender às condições exigidas. Todas as análises foram realizadas no programa *SAS Studio*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados resultam do comportamento dos tratamentos com diferentes valores de pH (4,25; 4,75; 5,25; 5,75 e 6,25) em solos coesos e não coesos, com distintos teores de argila. Essas soluções de pH podem ocasionar alterações físicas e químicas no solo, influenciadas principalmente pelos processos de dispersão e floculação.

4.1. Resistência do solo à penetração

A análise de variância para os dados de resistência à penetração (RP) (Tabela 5) evidencia diferenças significativas entre os locais de coleta (Fortaleza e Pacajus) e entre os tipos de horizonte (coeso e não coeso), havendo também interações entre local e pH, conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 5 - Análise de variância da resistência do solo à penetração.

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Resistência do Solo à Penetração	Local (F1)	1	26,25	26,25	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	15,77	15,77	0,0001*
	pH (F3)	5	14,12	2,82	0,0022 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	6,56	6,56	0,0028 ^{NS}
	Interação F1xF3	5	28,31	5,26	0,0001*
	Interação F2xF3	5	5,69	1,13	0,1591 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	9,78	1,95	0,0209 ^{NS}
	Tratamentos	23	104,52	4,54	0,0001*
	Resíduo	96	67,04	0,69	
	Total	119	171,57	5,24	

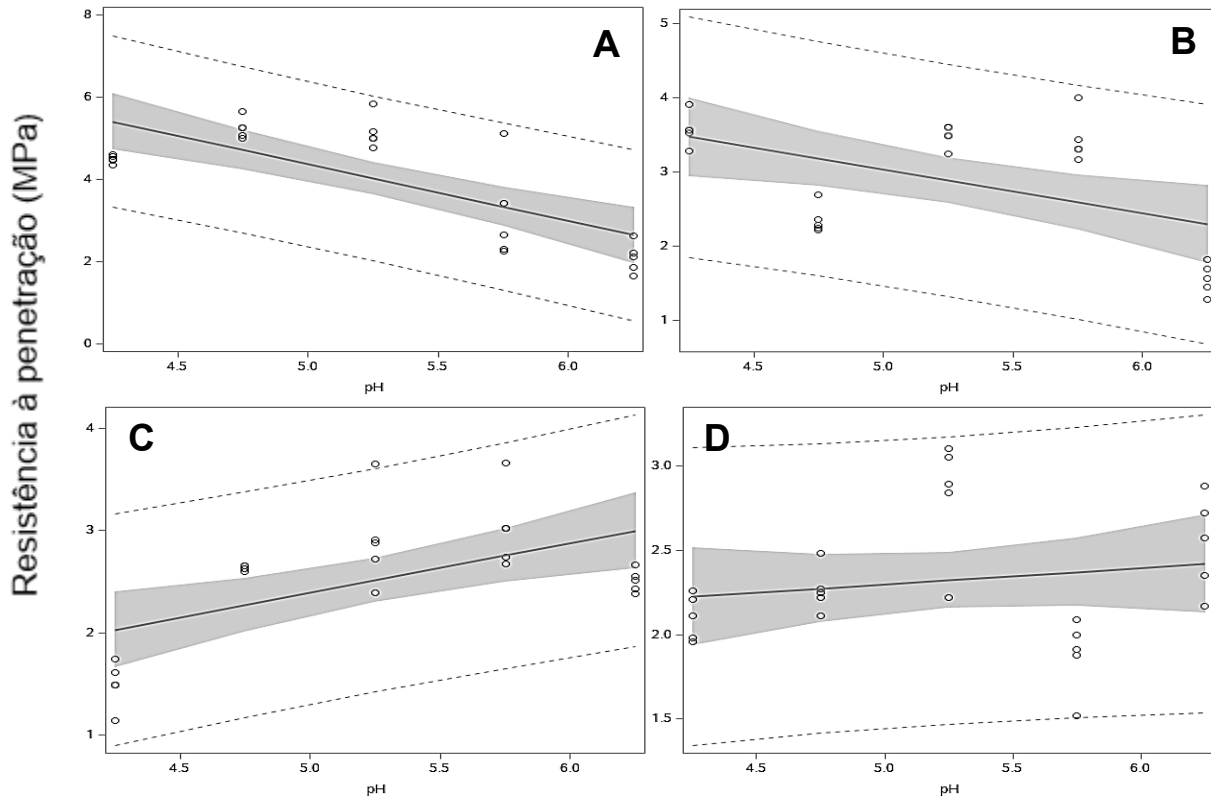
GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% ^{NS} não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

No tocante às interações, foram observadas diferenças significativas nas fontes de variação local e pH. Os teores de argila são semelhantes entre os horizontes de um mesmo local, entretanto, diferem entre os locais (Tabela 3). Em solos com mineralogia caulínica e pH abaixo de 5, pode haver o predomínio de cargas positivas na superfície das partículas, que atraem ânions (*item 4. 2. 4*). Já em solos com pH acima de 5, o predomínio é de cargas negativas, que atraem cátions (Meurer, Rhenheimer e Bissani, 2015). Com base nisso, a análise de regressão

linear expressa estatisticamente as tendências entre os tratamentos em função do pH (Figura 9).

Figura 9 - Correlação da RP com os tratamentos em função das soluções de pH.



A: FCC - Fortaleza com coesão, B: FSC - Fortaleza sem coesão, C: PCC - Pacajus com coesão, D: PSC - Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos tratamentos FCC e FSC (Figuras 9A e 9B), a RP apresenta tendência significativamente decrescente: à medida que o pH aumenta, a RP diminui. Isso pode ser explicado pela influência da umidade do solo e pelo comportamento das soluções de pH quanto às concentrações de H^+ e OH^- (IBGE, 2015). A percolação da solução menos acidificada, com valores acima do PCZ da caulinita, promoveu a dispersão das partículas coloidais e, conseqüentemente, o aumento da dupla camada difusa. Essa dispersão favoreceu o incremento da microporosidade e, como consequência, houve maior retenção de água (Figura 11), resultando na redução da RP.

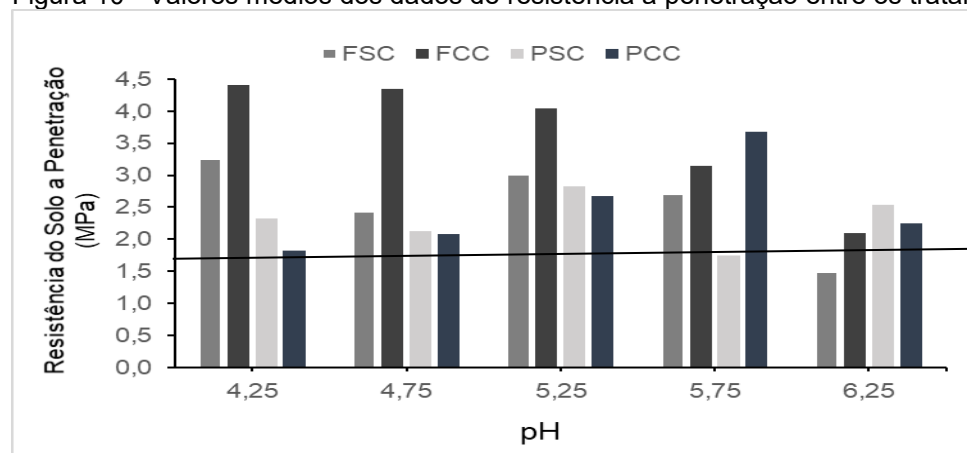
Meurer, Rhenheimer e Bissani (2015) complementam que as partículas do tipo caulinita podem apresentar carga líquida negativa em meio acidificado, o que dispersa as frações com cargas dependentes de pH, ocasionando o acúmulo de material solto na posição inferior (PI) dos cilindros, preenchendo os poros vazios.

Nos tratamentos PCC (Figura 9C), observou-se que, à medida que o pH aumenta, a tendência da RP é crescente. Esses dados estão relacionados à perda de material fino, principalmente nas soluções mais acidificadas (4,25; 4,75 e 5,75), conforme abordado no *item 4. 4*. Esse comportamento indica que o material disperso e, conseqüentemente, perdido pelo fluxo da solução percolante, possibilitou o reajuste das partículas finas do solo, resultando em comportamento inverso ao observado nos solos com maior teor de argila (FSC e FCC).

No solo de Pacajus sem caráter coeso PSC (Figura 9D), o tratamento com soluções percolantes de diferentes pH não causou diferenciação nos valores de RP.

Os valores de resistência à penetração foram maiores no horizonte com caráter coeso de Fortaleza (FCC), quando tratado com as soluções mais ácidas de 4,41 (pH 4,25), 4,34 (pH 4,75) e 4,04 (pH 5,25) MPa (Figura 10). Embora maiores valores de umidade proporcionem menor RP, o tratamento FCC, mesmo apresentando a maior umidade, registrou os valores de RP mais elevados.

Figura 10 - Valores médios dos dados de resistência à penetração entre os tratamentos



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

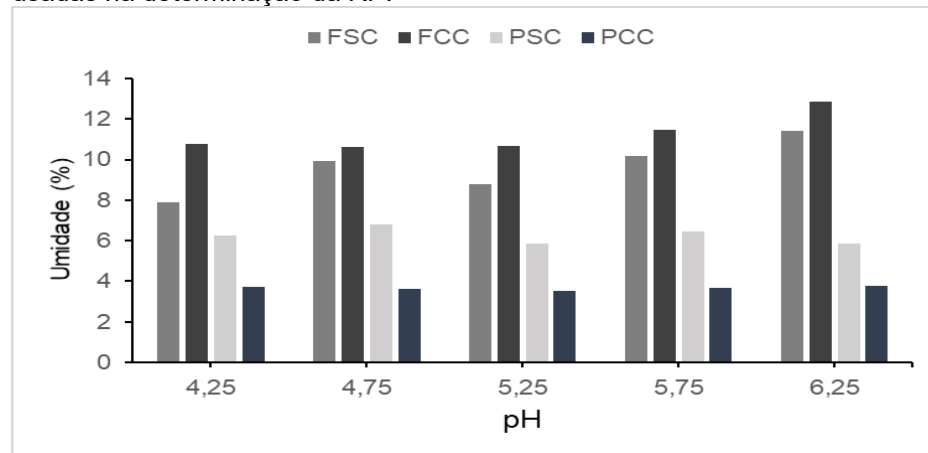
Fonte: Elaborado pela autora.

A RP (Figura 10) reduz-se à medida que soluções com pH acima do PCZ da caulinita percolam. Ao observar a Figura 11, o gráfico de umidade apresenta valores mais altos nas mesmas posições, ou seja, valores de pH acima do PCZ correspondem aos maiores teores de umidade e, conseqüentemente, à menor RP.

Considerando o comportamento da resistência do solo em função da umidade, observa-se que os valores médios de pH apresentados nas Figuras 10 e

11 refletem uma relação de dependência entre as variáveis. Em pH mais acidificado (4,25–4,75), a umidade é menor e a RP é maior; já em pH menos acidificado (5,75–6,25), a umidade é maior e a RP menor, indicando a co-dependência dessas variáveis.

Figura 11 - Valores médios da umidade na tensão de 1 atm nas amostras usadas na determinação da RP.



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que a umidade se manteve uniforme dentro de cada tratamento, porém, diferiu entre os tratamentos, evidenciando a influência dessa característica no comportamento em função do pH.

A Figura 11 mostra que os tratamentos de Fortaleza, com e sem caráter coeso, apresentaram os maiores teores de umidade. Esse comportamento está diretamente relacionado ao teor de argila, que é superior ao dos solos de Pacajus. Conseqüentemente, o tamanho e o preenchimento dos poros, bem como a ADA, foram fatores controladores dessa resposta.

A análise granulométrica permitiu quantificar os teores de argila, os tratamentos de Fortaleza apresentaram maiores valores, com aproximadamente 380 g kg^{-1} no horizonte com caráter coeso e 344 g kg^{-1} no horizonte sem caráter coeso. Já o solo de Pacajus apresentou menor teor de argila, com cerca de 230 g kg^{-1} no horizonte sem caráter coeso e 127 g kg^{-1} no horizonte com caráter coeso.

A análise de variância para os dados de umidade do solo na tensão de 1 atm (Tabela 6) evidencia diferenças significativas entre os locais de coleta (Fortaleza e Pacajus), entre os valores de pH e nas interações local–horizonte e local–pH, conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 6 - Análise de variância da umidade do solo na tensão de 1 atm

Variáveis	Fontes de Variação	GF	SQ	QM	F
Umidade do Solo à 1 atm	Local (F1)	1	717,00	717,00	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	2,42	2,42	0,1606 ^{NS}
	pH (F3)	5	29,87	93,45	0,0002*
	Interação F1xF2	1	93,45	7,46	0,0001*
	Interação F1xF3	5	26,58	6,64	0,0006*
	Interação F2xF3	5	6,03	1,50	0,2978 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	5,51	1,37	0,3438 ^{NS}
	Tratamentos	19	880,88	46,36	0,0001*
	Resíduo	80	96,72	1,20	
	Total	99	977,60	47,57	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; * significativo a 5% ^{NS} não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Houve diferença significativa entre os tipos de horizonte (coeso e não coeso) e entre os locais (Fortaleza e Pacajus). Essa diferença reflete o comportamento das partículas primárias do solo, indicando que o adensamento, mesmo entre as soluções mais e menos acidificadas, atua em conjunto com o espaço poroso na retenção de umidade.

Figura 12 - Desdobramento de interação da umidade na pressão de 1atm

LOCAL	TIPO	Estimate	
Fortaleza	Com	11.2748	
Fortaleza	Sem	9.6528	
Pacajus	Com	6.2308	
Pacajus	Sem	3.9860	

Pacajus com (PCC), Fortaleza sem (FSC), Fortaleza com (FCC), Pacajus sem (PSC). As barras com cores diferentes no tratamento indicam diferença.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se também que os solos de Pacajus, nas soluções mais e menos acidificadas (4,25 e 6,25), apresentaram maior perda de material fino, o que proporcionou um reajuste das partículas durante o processo de secagem do solo.

Vieira (2013), trabalhando com amostras deformadas de solos com horizontes coesos, identificou valores de RP variando de 3,70 a 5,14 MPa. Embora

os teores de argila fossem mais elevados (290 a 440 g kg⁻¹), o presente estudo apresentou resultados de RP semelhantes (Figuras 9 e 10). Lima *et al.* (2004), estudando Argissolo Acinzentado sob cultivo, com umidade entre 10 e 15% e teor de argila de 290 g kg⁻¹, encontraram valores de RP entre 4,5 e 5,5 MPa, ligeiramente superiores aos observados no tratamento FCC.

Nos horizontes sem caráter coeso de Fortaleza (FSC), o comportamento, como esperado, apresentou RP menor em comparação ao tratamento FCC. Vieira (2019), ao estudar amostras deformadas de Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo com horizontes coesos e teores de argila de 253 e 285 g kg⁻¹, respectivamente, observou, nos ciclos 6 e 9, valores de RP variando de 2 a 3,5 MPa, semelhantes aos obtidos neste estudo. A Figura 10 mostra que, nos solos de Pacajus, com teores de argila inferiores a 230 g kg⁻¹ e nove ciclos de solução percolante, foi possível identificar valores semelhantes, variando de 2 a 3,5 MPa entre os pH 4,25 e 5,75.

Nos tratamentos de Pacajus, com e sem horizonte coeso (PSC e PCC), os valores de RP foram inferiores aos tratamentos de Fortaleza. Vale ressaltar que os teores de argila do tratamento PSC são superiores aos do PCC, e que os teores de areia no tratamento PCC são maiores que no PSC, o que pode influenciar a resposta da variável. Embora os valores de RP no tratamento PSC tenham sido levemente superiores, os tratamentos de Pacajus não apresentaram grandes diferenças de RP, exceto no pH 5,75 (Figura 10).

Vieira (2013), em estudos com solos de horizontes coesos e teor de argila entre 130 e 338 g kg⁻¹, encontrou valores de RP semelhantes aos constatados nos tratamentos PSC e PCC. Menezes (2016), trabalhando com solos coesos de Aquiraz, com teor de 253 g kg⁻¹ de argila, observou valores de RP entre 2 e 3 MPa, coincidindo com os do tratamento PSC.

Segundo Mullins *et al.* (1987), Reichert, Reinert e Braida (2003) e Tormena *et al.* (2004), quando o solo está seco, valores de RP superiores a 2 MPa correspondem a condições em que a cultura sofre impedimento físico, sendo esse considerado o valor crítico para o desenvolvimento radicular de algumas espécies. Os valores de RP encontrados neste estudo enquadram-se nesse limite crítico (linha divisória da Figura 10).

Corado Neto *et al.* (2015), estudando solos nos períodos seco e chuvoso, observaram que, no período úmido, os valores de umidade foram duas a três vezes

maiores que no período seco, refletindo diretamente na RP. Isso evidencia que a umidade do solo no período úmido influenciou fortemente os valores de RP.

Segundo Giarola *et al.* (2003), o aumento do estresse efetivo ocorre à medida que as partículas de argila e silte mantêm contato entre si quando secas, favorecendo a formação de pontes entre os grãos de areia e, assim, aumentando a RP em condições de solo seco (Mullins *et al.*, 1987).

A resistência à penetração (RP) está diretamente relacionada à densidade do solo, pois o aumento da densidade reduz a porosidade, dificultando a penetração das raízes. O comportamento crescente desses atributos afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, o crescimento radicular, a dinâmica da água, a absorção de nutrientes e o fluxo gasoso, limitando o crescimento regular da cultura.

4.2. Densidade do solo e densidade das partículas

A análise de variância dos dados de densidade (Tabela 7) mostra diferenças significativas entre os locais de coleta (Fortaleza e Pacajus) e entre os tipos de horizonte (coeso e não coeso), havendo também interação entre horizonte e local, conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7 - Análise de variância da densidade do solo

Variável	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Densidade do Solo	Local (F1)	1	0,04	0,04	0,0003*
	Horizonte (F2)	1	0,14	0,14	0,0001*
	pH (F3)	5	0,009	0,002	0,7639 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	0,20	0,20	0,0001*
	Interação F1xF3	5	0,03	0,006	0,1022 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	0,02	0,005	0,1631 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	0,037	0,007	0,0675 ^{NS}
	Tratamentos	23	0,50	0,02	0,0001*
	Resíduo	96	0,33	0,003	
	Total	19	0,84	0,02	

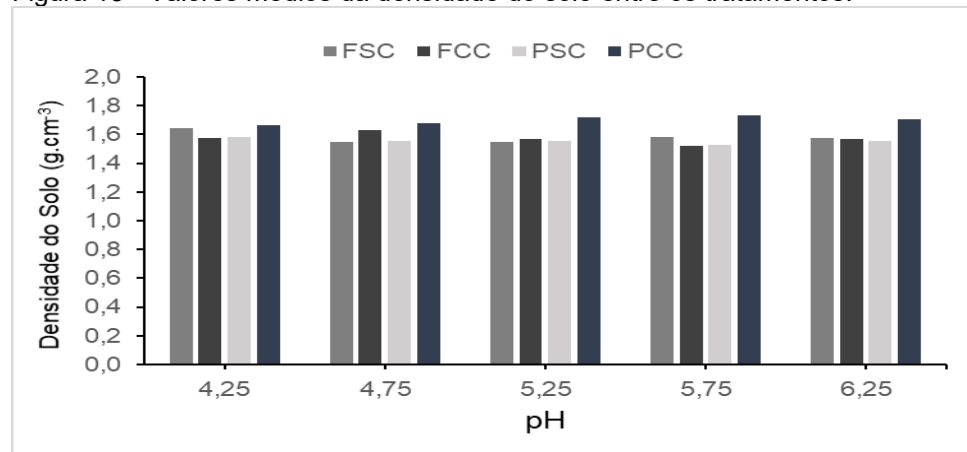
GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; * significativo a 5% ^{NS} não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

No horizonte com caráter coeso de Pacajus (PCC), foi possível observar os maiores valores de densidade do solo (Ds) com todas as soluções percolantes. A

diferença entre esse tratamento e os demais (PSC, FSC e FCC), que apresentaram valores ligeiramente semelhantes em todas as soluções percolantes (Figura 13), podem estar relacionadas à perda de material fino durante os ciclos de percolação no ensaio laboratorial (*item 4. 4*).

Figura 13 - Valores médios da densidade do solo entre os tratamentos.



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

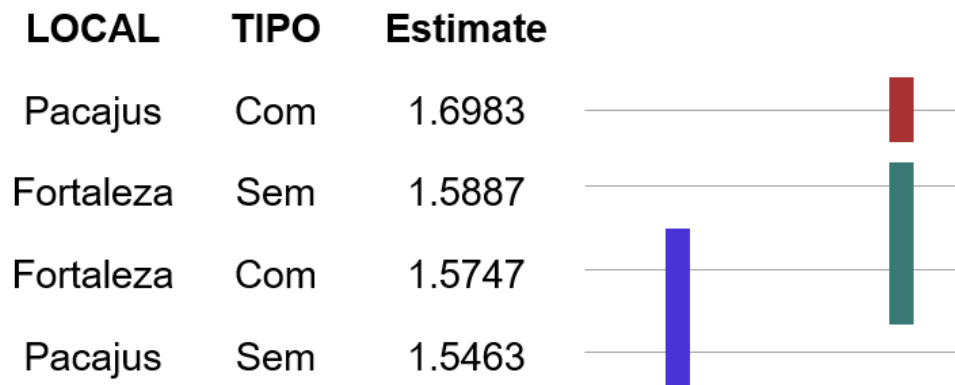
Fonte: Elaborado pela autora

No tocante à textura, o teor de argila entre os tratamentos diminuiu na seguinte sequência: FCC > FSC > PSC > PCC. Para o teor de areia, a sequência decrescente foi: PCC > PSC > FSC > FCC. Torna-se importante obter informações sobre outras variáveis para compreender o comportamento da D_s , que atua em conjunto com as condições físicas do solo, refletindo em seus resultados. Aguiar (2008), estudando Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de café, relata que as partículas mais finas podem ser translocadas verticalmente e provocar o entupimento dos poros, aumentando a D_s .

Ao comparar os teores médios de densidade do solo (Figura 14) em relação aos horizontes coeso e não coeso de Fortaleza e Pacajus, observa-se que o horizonte com caráter coeso de Pacajus (PCC) é o único que difere dos demais tratamentos, enquanto os tratamentos FSC, FCC e PSC apresentam valores semelhantes.

A textura é um fator que contribui para o comportamento da densidade nos solos estudados. Brady e Buckman (1976) relatam que a densidade aparente em solos arenosos é mais elevada, enquanto em solos de textura fina e argilosa a densidade é reduzida devido à maior porosidade, que diminui a aproximação das partículas e, conseqüentemente, altera o volume total do solo.

Figura 14 - Desdobramento da interação da densidade do solo com relação ao local e tipo de horizonte.



Pacajus com (PCC), Fortaleza sem (FSC), Fortaleza com (FCC), Pacajus sem (PSC). As barras com cores diferentes no tratamento indicam diferença, a barra com a mesma cor no tratamento indica semelhança.

Fonte: Elaborado pela autora.

Araújo *et al.* (2004), em estudos com Latossolo Vermelho de textura argilosa, observaram valores de D_s entre 0,95 e 1,25 Mg m^{-3} , enquanto nos solos arenosos os valores variaram entre 1,35 e 1,85 Mg m^{-3} (Araújo, Tormena e Silva, 2004). Em solos argilosos, a formação de microagregados de partículas de argila pode aumentar a porosidade e reduzir a densidade, já em solos arenosos, esse comportamento se deve ao maior peso específico das partículas de quartzo na fração areia (Aguiar, 2008).

No tocante à textura do solo, Reichert, Reinert e Braida (2003) observaram que, em solos arenosos, a média da D_s variou entre 1,6 e 1,8 g cm^{-3} , enquanto em solos argilosos variou de 1,4 a 1,6 g cm^{-3} , sendo esses valores considerados críticos, com impedimento severo ao desenvolvimento das culturas. Os valores do presente estudo mostram que os horizontes analisados se enquadram dentro das condições físicas desses limites críticos. Ferreira (2015), trabalhando em áreas com diferentes manejos e solos de textura franca e arenosa, encontrou valores de densidade entre 1,7 e 1,8 g cm^{-3} .

Dantas *et al.* (2014) e Vieira (2019), estudando solos com horizontes de caráter coeso, encontraram resultados semelhantes aos tratamentos PSC e FSC, o que evidencia o comportamento desses tratamentos em solos sem caráter coeso.

Ao analisar a relação entre o pH da solução percolante e a D_s , observou-se, pela análise de regressão, que o pH da solução percolante não influenciou significativamente os valores de densidade do solo (Apêndice V).

A densidade das partículas (D_p) não apresentou interação estatisticamente significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Apêndice V). Os valores obtidos variaram de 2,58 a 2,69 g cm^{-3} entre todos os tratamentos, coesos e não coesos. Menezes (2016), trabalhando com solos coesos e não coesos, encontrou valores de 2,60 g cm^{-3} e complementa que a D_p é um atributo pouco alterável ao longo do tempo, dependendo principalmente da composição mineralógica das partículas do solo.

Carneiro *et al.* (2021), em pesquisas com Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho no Estado da Paraíba, encontraram valores de D_p variando de 2,60 a 2,83 g cm^{-3} . Essa variação foi justificada pela textura do solo, que indicou a presença de quartzo: um mineral mais denso em comparação a outros constituintes minerais. Segundo Amaro Filho, Assis Júnior e Mota (2008), a densidade específica do quartzo situa-se entre 2,65 e 2,66 g cm^{-3} , enquanto a da caulinita varia entre 2,60 e 2,68 g cm^{-3} .

Considerando os valores de D_p entre os tratamentos, observa-se que os solos com maiores teores de areia apresentaram maior D_p (Tabela 16), enquanto os tratamentos com menor teor de areia e maior teor de argila apresentaram valores ligeiramente inferiores, seguindo a sequência: PCC > PSC > FSC > FCC.

4.3. Análise granulométrica

A análise de variância para os dados das frações areia e argila, em relação à posição no cilindro – superior e inferior (Tabela 8), mostra diferença e interação significativa entre os tratamentos, posição e tratamento x posição, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A análise de variância dos teores de areia e argila na posição inferior do cilindro (Tabela 9) mostra diferença e interação significativa entre local (Fortaleza e Pacajus), horizonte (coeso e não coeso) e local x horizonte, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a fração silte não houve efeito significativo.

Tabela 8 - Análise de variância das frações argila e areia em função da posição no cilindro

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Argila	Tratamento (F1)	19	1975820,59	103990,55	0,0001*
	Posição (F2)	1	3751,16	3751,16	0,0013*
	Interação F1xF2	19	344774,39	1972,33	0,0001*
	Tratamentos	39	2017046,15	51719,13	0,0001*
	Resíduo	160	55730,14	348,31	
	Total	199	2072776,30	52067,44	
Areia	Tratamento (F1)	19	2028726,62	106775,08	0,0001*
	Posição (F2)	1	5121,22	5121,22	0,0001*
	Interação F1xF2	19	13190,12	694,21	0,0041*
	Tratamentos	39	2047037,97	52488,15	0,0001*
	Resíduo	160	50199,25	313,74	
	Total	199	2097237,22	52801,89	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% NS não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 - Análise de variância dos teores de areia e argila na posição inferior.

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Areia	Local (F1)	1	10098262,91	1009862,91	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	34171,20	34171,20	0,0001*
	pH (F3)	5	4473,66	894,73	0,3469 NS
	Interação F1xF2	1	153964,39	153964,39	0,0001*
	Interação F1xF3	5	759,22	151,84	0,9647 NS
	Interação F2xF3	5	2429,23	485,84	0,6874 NS
	Interação F1xF2xF3	5	46,35	927,02	0,3264 NS
	Tratamentos	23	1210295,70	52621,55	0,0001*
	Resíduo	96	75639,98	787,91	
	Total	119	1285935,64	53409,47	
Argila	Local (F1)	1	904282,40	904282,40	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	49275,56	49275,56	0,0001*
	pH (F3)	5	5109,53	1021,90	0,5226 NS
	Interação F1xF2	1	160184,05	160184,05	0,0001*
	Interação F1xF3	5	1741,47	348,29	0,9190 NS
	Interação F2xF3	5	10987,75	2197,55	0,1175 NS
	Interação F1xF2xF3	5	10673,42	2134,68	0,1284 NS
	Tratamentos	23	1142254,21	49663,22	0,0001*
	Resíduo	96	116376,71	1212,27	
	Total	119	1258630,92	50875,48	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% NS não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora

A análise de variância para os dados da areia e argila da parte superior do cilindro (Tabela 10) mostra diferença e interação significativa nos teores de argila entre local (Fortaleza e Pacajus), horizonte (coeso e não coeso) e interação local x horizonte. Para areia, houve diferenças entre locais, com interação local x horizonte, horizonte x pH e local x horizonte x pH, pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Para a fração silte, não houve efeito significativo.

Ao se comparar os teores médios de argila e areia no cilindro (Figura 15), observa-se que não houve diferença significativa em função dos tratamentos com as soluções de pH.

Tabela 10 - Análise de variância dos teores de areia e argila na posição superior

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Areia	Local (F1)	1	1031688,02	1031688,03	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	113,41	113,41	0,7372 NS
	pH (F3)	5	8052,31	1610,46	0,1652 NS
	Interação F1xF2	1	132889,7	132889,7	0,0001*
	Interação F1xF3	5	3936,64	787,32	0,5621 NS
	Interação F2xF3	5	50548,74	10109,74	0,0001*
	Interação F1xF2xF3	5	36676,14	12675,22	0,0001*
	Tratamentos	23	1290604,98	56113,26	0,0001*
	Resíduo	96	96134,72	1001,4	
	Total	119	1386739,75	57114,66	
Argila	Local (F1)	1	904282,40	923300,37	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	49275,56	16473,86	0,0015*
	pH (F3)	5	5109,53	1642,23	0,3878 NS
	Interação F1xF2	1	160184,05	279046,24	0,0001*
	Interação F1xF3	5	1741,47	1683,66	0,3731 NS
	Interação F2xF3	5	10987,75	1145,30	0,5962 NS
	Interação F1xF2xF3	5	10673,42	2678,61	0,1355 NS
	Tratamentos	23	1254569,58	54546,5	0,0001*
	Resíduo	96	148815,53	1550,16	
	Total	119	1403385,12	56096,66	

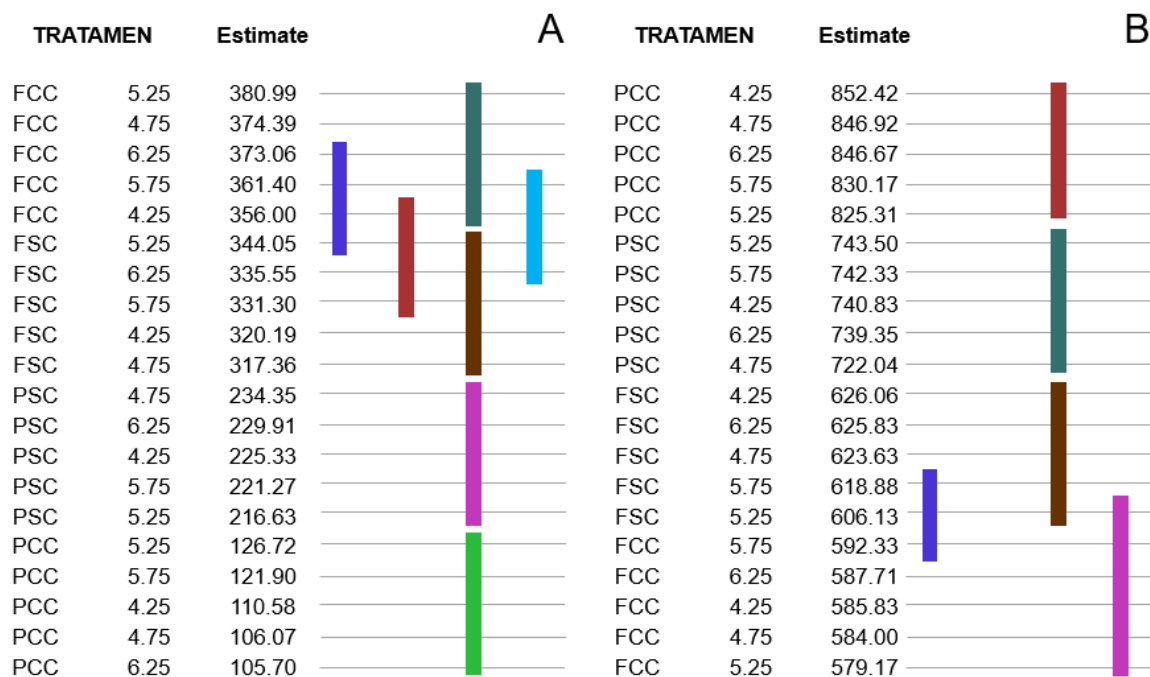
GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% NS não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora

Entretanto, partindo do pressuposto de que ocorre a dispersão das partículas em solos com pH alto e a floculação em pH baixo (Meurer, Rhenheimer e

Bissani, 2015), esperava-se que esses tratamentos ocasionassem diferenciação nos teores de argila, que poderia estar dispersas e sofrer translocação. Essa ausência de diferença no teor de argila (Figura 15A) pode estar associada ao baixo número de ciclos de solução percolante, já que, em condições naturais, o quantitativo de percolação é mais intenso.

Figura 15 - Desdobramento da interação dos teores de argila e areia após os tratamentos com soluções ácidas



A: Argila; B: Areia.

Tratamento: soluções percolantes com valores de pH (4,25; 4,75; 5,25; 5,75; 6,25).

FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

As barras com cores diferentes no tratamento indicam diferença, a barra com a mesma cor no tratamento indica semelhança.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os tratamentos com diferentes soluções de pH também não causaram diferença significativa nos teores de areia (Figura 15B), o que está coerente com os resultados da argila, visto que a fração areia não sofre movimentação interna no solo. Por se tratar de solos dos Tabuleiros Costeiros, deve-se destacar que as partículas de areia mal selecionadas, somadas ao processo de argiluviação, favorecem o reajuste das partículas coloidais dispersas no solo e, conseqüentemente, o desenvolvimento do caráter coeso (Bezerra *et al.*, 2014 e Araújo *et al.*, 2018).

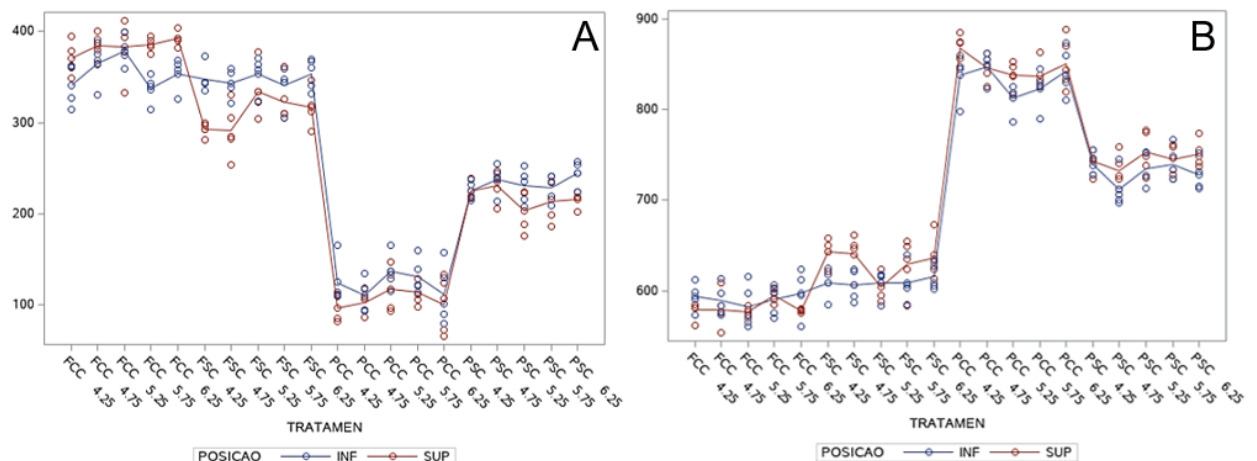
Levando-se em consideração o local de coleta, há diferença significativa entre os solos de Fortaleza (com maior teor de argila) e Pacajus (com menor teor de

argila) (Figura 15). Analisando-se os dados da área de Pacajus, observa-se que houve diferença entre os horizontes (PSC e PCC), o que se refletiu na classe textural (Tabela 11), variando entre areia franca no PCC, e franco-argilo-arenoso no PSC. Além disso, os teores de areia são maiores em Pacajus quando comparados aos tratamentos de Fortaleza.

A análise granulométrica do solo do cilindro foi realizada em dois compartimentos: posição superior (PS) e posição inferior (PI). Os resultados (Figura 16A) mostram que os maiores teores de argila estão na PI no horizonte sem caráter coeso de Fortaleza (FSC). Entretanto, no horizonte com caráter coeso (FCC), os maiores valores de argila encontram-se na PS, o que indica que não houve movimentação das partículas coloidais pelas soluções percolantes.

Considerando o movimento da argila em campo, pode-se inferir que essa argila dispersa esteja sendo translocada do horizonte superior para o inferior, que é o coeso, promovendo assim um aumento no adensamento. Lima *et al.* (2006), trabalhando com a micromorfologia e análise de imagens de um Argissolo Acinzentado com caráter coeso, concluíram que a distribuição espacial dos poros, o tamanho e orientação, são influenciadas pelo adensamento natural que formam o caráter coeso.

Figura 16 - Análise de variância com comparação de médias para as partículas de areia e argila em relação a posição do cilindro



INF: Inferior, SUP: Superior. FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão. A: Argila, B: Areia.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos horizontes de Pacajus (PSC e PCC), observa-se a predominância de maiores teores de argila na posição inferior (Figura 16A), situação que pode estar

associada à translocação dos colóides da posição superior para a inferior nos diferentes tratamentos com soluções percolantes (Tabela 11).

Tabela 11 - Resultados da análise granulométrica nos dois compartimentos do cilindro: posição superior e inferior

Local	Hor.	pH	Granulometria								Classe Textural **	
			Areia		Silte		Argila		Argila Controle		Sup.	Inf.
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.		
----- (g kg ⁻¹) -----												
Fortaleza	SCC (FAA)*	4,25	643	609	65	43	292	348			FAA	FAA
		4,75	641	606	68	51	291	343			FAA	FAA
		5,25	604	609	62	37	334	354	355	339	AA	FAA
		5,75	629	608	49	51	322	340			FAA	AA
		6,25	636	615	46	31	317	354			FAA	AA
	CCC (AA)*	4,25	578	593	51	66	371	341			AA	AA
		4,75	579	589	37	46	384	365			AA	AA
		5,25	576	582	41	39	383	379	393	378	AA	AA
		5,75	595	590	19	73	386	337			AA	FAA
		6,25	577	597	30	48	392	354			AA	FAA
Pacajus	SCC (FAA)*	4,25	742	739	32	35	225	225			FAA	FAA
		4,75	732	712	37	51	231	237			FAA	FAA
		5,25	752	734	44	35	203	230	229	228	FAA	FAA
		5,75	746	739	41	32	214	229			FAA	FAA
		6,25	751	728	34	28	215	244			FAA	FAA
	CCC (AF)*	4,25	867	837	36	38	97	124			AF	AF
		4,75	846	847	52	42	102	110			AF	AF
		5,25	838	812	44	52	117	136	100	98	AF	AF
		5,75	837	823	49	46	113	131			AF	FA
		6,25	851	842	49	47	100	111			AF	AF

SCC: Sem caráter coeso, **CCC:** Com caráter coeso., **pH:** Soluções ácidas.

FAA: Franco-argolo-arenosa; **AA:** Argilo-arenoso; **AF:** Areia franca; **FA:** Franco arenoso. * Classe textural inicial, ** Classe textural após o tratamento.

Fonte: Elaborado pela autora.

Feições de iluviação da argila foram identificadas em material (horizontes com caráter coeso) destorroados e submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, indicando que a argila iluvial está relacionada à gênese desses solos com caráter coeso Vieira, (2019). Bezerra *et al.* (2014), trabalhando com solos com caráter coeso, concluíram que a gênese do caráter coeso pode ser indicada pela

argiluviação, combinada com a areia mal selecionada. Os autores evidenciam ainda que as frações granulométricas podem determinar a formação de horizontes coesos.

O conteúdo de argila nos tratamentos de Pacajus é inferior ao de Fortaleza. Desta forma, o fluxo da solução percolante atuou dinamicamente em parceria com os macroporos do solo. Em relação às partículas de areia, a diferença observada entre os tratamentos é referente ao fluxo da solução percolante, que alterou o teor de argila, modificando a proporção da areia em caráter relativo, e não absoluto. Isso ocorre porque, ao considerar a argila iluvial e as partículas de areia mal selecionada, o período de secamento permitiu o ajuste entre as partículas no solo.

As partículas de areia são inertes, dessa forma, não foram influenciadas pelo pH da solução, mas sim pelo reajuste e percolação das soluções, que agregaram as partículas coloidais, permitindo que seu comportamento fosse modificado da PS para PI à medida que o solo era seco. Segundo Spera *et al.* (2008) e Alleoni, Mello e Rocha (2019), as cargas elétricas do solo estão diretamente ligadas às partículas coloidais orgânicas e inorgânicas, sendo que, quanto maior o teor de argila e matéria orgânica do solo, maior será o número de cargas elétricas.

No geral, observou-se diferença quanto à posição superior e inferior do cilindro, no entanto, não foi verificada diferença em função dos tratamentos com as soluções percolantes. Ou seja, os tratamentos com diferentes acidez das soluções não causaram diferença entre eles. Isso pode estar relacionado com nove ciclos das soluções percolação, que foram insuficientes para causar alterações significativas.

4.4. Argila dispersa em água

A análise de variância para os dados da argila dispersa em água (ADA), em relação à posição das frações no cilindro (Tabela 12), indica a diferença significativa entre os tratamentos e a posição, mostrando também a interação dos tratamentos com posição, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Levando-se em consideração os teores médios de argila dispersa em água (ADA) no cilindro, observa-se que o material do horizonte sem caráter coeso de Pacajus (PSC) apresentou os menores valores de ADA, sem ter sido influenciado pelo pH das soluções percolantes.

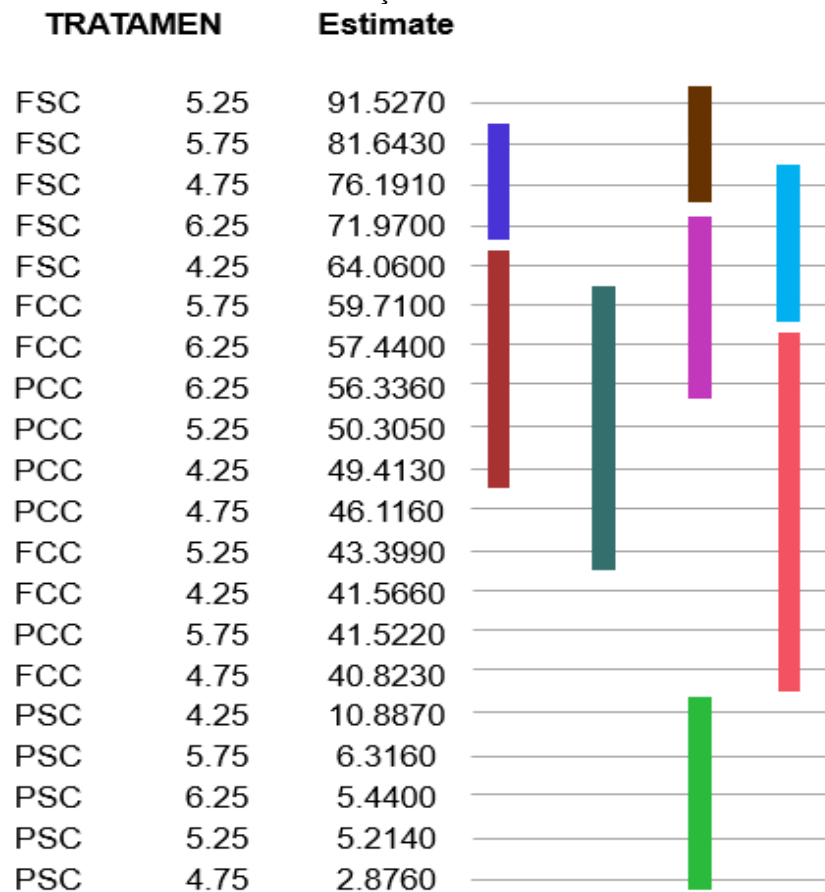
Tabela 12 - Análise de variância da argila dispersa em água em função dos tratamentos com as soluções e da posição do cilindro.

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Argila Dispersa em Água	Tratamento (F1)	19	137455,39	7234,49	0,0001*
	Posição (F2)	1	3485,79	3485,79	0,0001*
	Interação F1xF2	19	14688,57	773,08	0,0001*
	Tratamentos	39	155629,75	3990,50	0,0001*
	Resíduo	160	17611,54	110,07	
	Total	199	173241,30	4100,60	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; * significativo a 5%
 Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 17 complementa os dados apresentados na Figura 18, sendo possível visualizar o comportamento da ADA em função da posição no cilindro (superior e inferior).

Figura 17 - Desdobramento da interação dos valores médios da ADA no cilindro



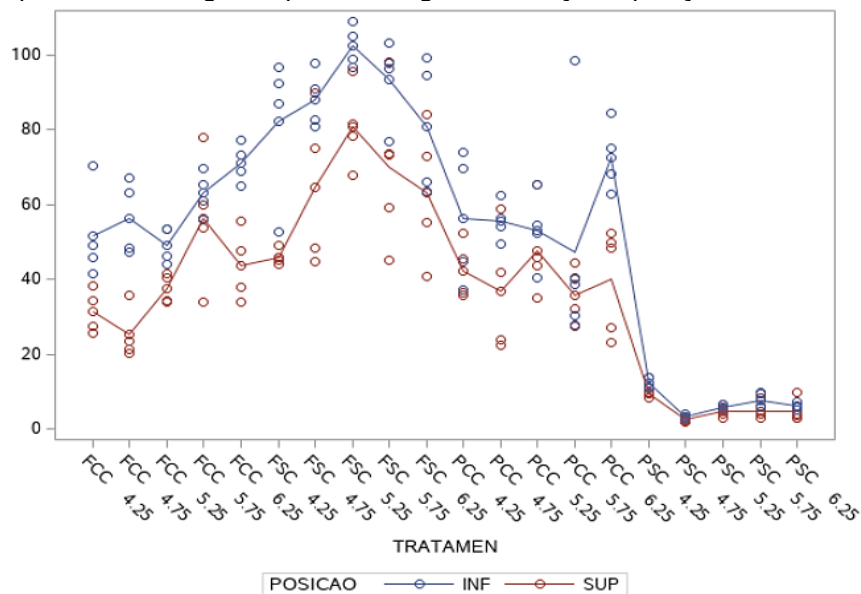
FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

As barras com mesma cor indicam a semelhança entre os resultados.

Fonte: Elaborado pela autora.

O material do horizonte sem caráter coeso de Pacajus (PSC) não apresentou diferença nos teores da ADA entre as posições superior e inferior, para os diferentes tratamentos com soluções percolantes. Entretanto, nos cilindros com material dos horizontes de Fortaleza (FCC e FSC), os valores de ADA foram mais elevados na posição inferior, com maior incremento da ADA nos tratamentos com soluções ácidas. O comportamento da ADA não ficou bem definido para o material dos demais horizontes, apresentando teores semelhantes em alguns tratamentos e mais elevados em uma das posições em outros.

Figura 18 - Análise de variância com comparação de medias para partículas de argila dispersa em água em relação a posição do cilindro



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora

Durante a coleta do material em campo, foi possível observar que alguns tratamentos FCC e FSC apresentavam manchas com coloração distinta em algumas repetições (Apêndice II). Nessas repetições, o fluxo e a atividade das soluções ácidas atuaram de forma mais lenta, influenciando nos dados médios obtidos. Essa diferenciação dos teores quanto à posição corroborava as informações apresentadas por Lima *et al.* (2006), que ao realizar análise de imagens em solos com e sem caráter coeso, identificaram áreas nos horizontes que se apresentam mais adensadas que outras.

Segundo Azevedo e Bonumá (2004), o processo de floculação é causado pelas forças de atração de Van der Waals que surgem devido a variações nos campos eletromagnéticos. A teoria DLVO afirma que a extensão da dupla camada

difusa (DCD) pode ser manipulada pela composição da solução do solo. De acordo com Meurer, Rhenheimer e Bissani (2015), esses processos ocorrem em função das de complexação de esfera, que atuam junto aos cátions monovalentes ou à baixa concentração de eletrólitos, causando forças de repulsão, e das forças de complexação de esfera interna, nas quais íons di e trivalentes permitem a compressão da DCD.

Para os pH 5,25; 5,75 e 6,25, é necessário considerar a quantidade de argila dispersa (Tabela 13), o fluxo da solução percolante, o tempo de percolação (*item 3. 4*), os cátions floculantes e a força de atração elétrica entre as cargas, permitindo inferir que os colóides não conseguiam se ligar, permanecendo dispersos e sendo carregado ao fluxo da solução que deixada do sistema.

Tabela 13 - Valores médios da argila dispersa em água.

Local	Hor.	pH	ADA		ADA CONTROLE	
			SUP.	INF.	SUP.	INF.
-----(g kg ⁻¹)-----						
Fortaleza	Sem Coesão	4,25	46,02	82,10	86,53	76,12
		4,75	64,41	87,96		
		5,25	80,74	102,31		
		5,75	69,86	93,42		
		6,25	63,20	80,74		
	Coeso	4,25	31,41	51,72	48,11	27,06
		4,75	25,24	56,40		
		5,25	37,59	49,21		
		5,75	56,41	63,00		
		6,25	43,78	71,09		
Pacajus	Sem Coesão	4,25	9,36	12,41	5,32	3,01
		4,75	2,46	3,28		
		5,25	4,66	5,76		
		5,75	4,80	7,82		
		6,25	4,66	6,21		
	Coeso	4,25	42,41	56,41	34,91	70,39
		4,75	36,74	55,49		
		5,25	47,52	53,08		
		5,75	35,91	47,13		
		6,25	40,91	72,54		

ADA: Argila dispersa em água.

pH: Soluções ácidas.

SUP: Superior, **INF:** Inferior.

Fonte: Elaborado pela autora.

Corrêa *et al.* (2008), estudando o comportamento de argila fina (AGF) e argila dispersa (AD) em solos vermelhos, amarelos e acinzentados coesos, observaram que essa relação contribuiu para a compreensão dos mecanismos de adensamento e formação dos horizontes coeso, pois a translocação das partículas finas entre ou dentro dos horizontes aumenta a superfície de contato. Assim, as partículas finas dispersas movimentam-se e preenchem os poros presentes no solo, formando pontes de ligação e aumentando a coesão.

Os dados obtidos com material do horizonte com caráter coeso de Fortaleza (FCC) (Figura 19) mostram uma tendência crescente da ADA em função do pH, confirmada pela análise de regressão linear (Tabela 14). Para essa análise, foram considerados os dados das duas posições (PS e PI), totalizando 50 observações. A regressão linear (Figura 19) indica que, a cada aumento de uma unidade de pH, o teor de ADA sofre um incremento de aproximadamente 10,127 g kg⁻¹ (Tabela 14).

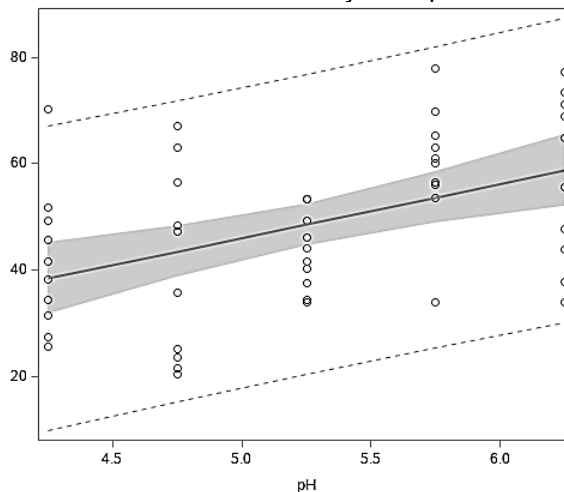
Tabela 14 - Análise de regressão linear do tratamento FCC.

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Argila Dispersa em Água	Tratamento (F1)	1	-4,57	14,68	0,7566 ^{NS}
	pH (F2)	1	10,12	2,77	0,0006*
	Tratamentos	1	2563,90	2563,90	0,0006*
	Resíduo	48	9226,55	192,21	
	Total	49	11790	2756,11	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; * significativo a 5% NS não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Análise de regressão linear no tratamento Fortaleza com ADA* em função do pH.



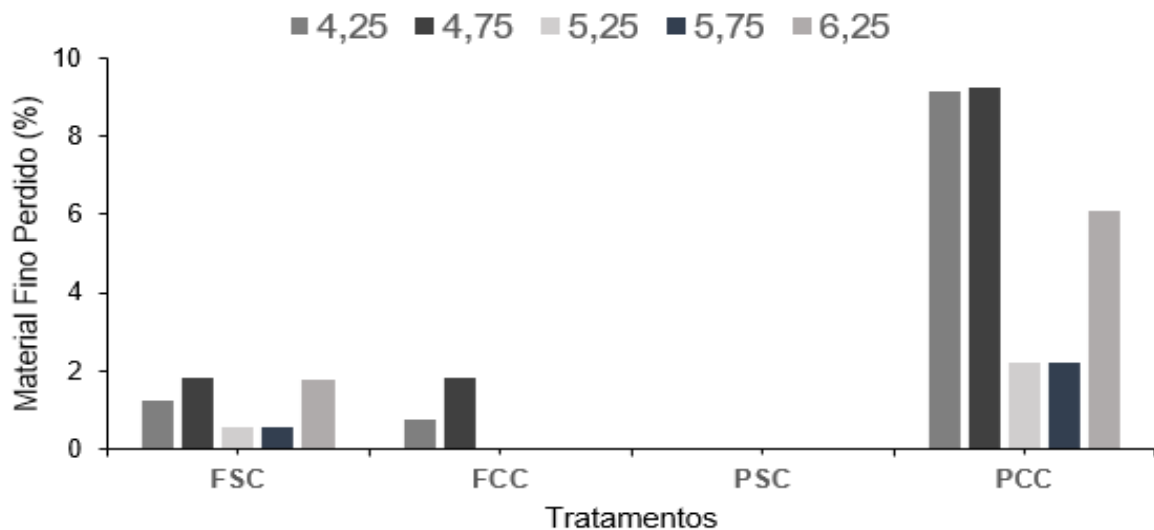
Fonte: Elaborado pela autora
ADA*- Argila dispersa em água

Nessa condição atípica observada na regressão linear, deve-se considerar os cátions Mg^{2+} e Al^{3+} , que são di e trivalentes, respectivamente, e que apresentam os maiores teores entre os íons no tratamento FCC. As soluções mais ácidas podem ter solubilizado mais alumínio (cátion trivalente), o que pode ter favorecido maior floculação, reduzindo a dispersão argila.

Nos tratamentos FSC, PSC e PCC não houve tendência definida na análise de regressão. Contudo, ressalta-se que, em FSC e PCC, ocorreu perda irregular de material fino entre as soluções de pH, o que influenciou no teor de ADA que permaneceu no sistema.

No ensaio laboratorial, foi possível observar que os horizontes sem caráter coeso de Fortaleza (FSC) e com caráter coeso de Pacajus (PCC) perderam material fino nas soluções percolantes com diferentes pH (Figura 20). Verifica-se que o tratamento PCC apresentou as maiores perdas de material nas soluções com pH mais ácido (4,25 e 4,75), resultado associado ao processo de dispersão decorrente das cargas elétricas da superfície dos colóides e da ação dos cátions retidos no complexo de troca.

Figura 20 - Perda de material pelas soluções percolantes com diferentes valores de pH



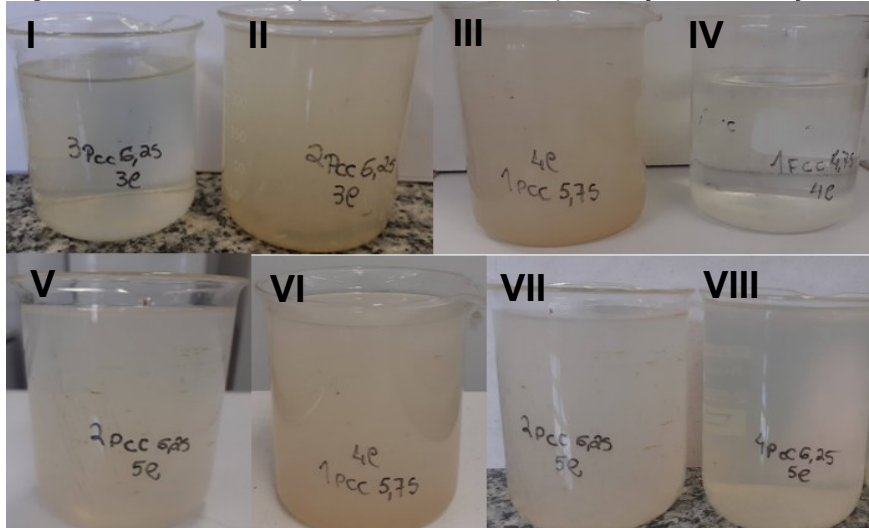
FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora

O tratamento FSC também perdeu material fino (Figura 20) e, ao se considerar que, na natureza, o horizonte coeso é sequencial ao não coeso, esse material seria iluviado, agravando o grau de adensamento do horizonte coeso. A Figura 21 mostra algumas soluções coletadas após os ciclos de percolação, sendo

possível perceber que algumas apresentam mais turvas, com mais quantidade de material em suspensão, enquanto outras são mais translúcidas.

Figura 21 - Material fino perdido nos ciclos de percolação das soluções de pH.



PCC: Pacajus com caráter coeso, FCC: Fortaleza com caráter coeso.
 I e II: PCC 6,25 (3 ciclos), III e VI: PCC 5,75 (4 ciclos), IV: FCC 4,75 (4 ciclos),
 V e VI: PCC 6,25 (5 ciclos), VIII: PCC 6,25 (5 ciclos).
 Fonte: Autora.

4.5. Grau de floculação e porosidade total

A análise de variância dos dados do grau de floculação (GF), em relação à posição superior e inferior das frações no cilindro (Tabela 15), indica diferença significativa entre os horizontes com e sem caráter coeso, e interação entre os fatores horizontes x local, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No horizonte PSC, os valores médios do GF foram maiores (Tabela 16) e, considerando-se os teores da ADA (Tabela 13), observa-se que os resultados são inversos, ou seja, este horizonte (PSC) apresenta os menores teores de ADA. Isso ocorre porque o grau de floculação das argilas está diretamente ligado às partículas de ADA, uma vez que essa variável corresponde à capacidade da argila de flocular, sendo, portanto, inversamente proporcionais (Portela *et al.*, 2018).

Observa-se ainda que PSC apresenta menor densidade do solo, o que também está associado ao maior percentual do GF, pois, se a argila está floculada, consequentemente a porosidade é maior e a densidade, menor.

O grau de floculação do horizonte de Pacajus sem caráter coeso (PSC) é superior aos demais horizontes, mas o tratamento de Fortaleza com caráter coeso (FCC) apresenta valores próximos ao do PSC (Figura 22).

Tabela 15 - Análise de variância do grau de floculação (GF) na posição superior (PS) e inferior (PI).

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
GF (PS)	Local (F1)	1	453,06	453,06	0,0952 ^{NS}
	Horizonte (F2)	1	4661,41	4661,41	0,0001*
	pH (F3)	5	2081,91	416,38	0,0294 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	17549,11	17549,11	0,0001*
	Interação F1xF3	5	1014,56	202,91	0,2823 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	1257,97	251,59	0,1738 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	1955,59	391,11	0,0389 ^{NS}
	Tratamentos	23	28973,64	1259,72	0,0001*
	Resíduo	96	15312,76	159,50	
	Total	119	44286,40	1419,22	
GF (PI)	Local (F1)	1	1087,09	1087,09	0,0169 ^{NS}
	Horizonte (F2)	1	7773,40	7773,40	0,0001*
	pH (F3)	5	719,52	143,90	0,5652 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	23804,77	23804,77	0,0001*
	Interação F1xF3	5	1423,79	284,75	0,1825 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	1295,83	259,16	0,2282 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	1155,97	231,19	0,2893 ^{NS}
	Tratamentos	23	37260,39	1620,01	0,0001*
	Resíduo	96	17668,66	184,04	
	Total	119	54929,06	1804,05	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; * significativo a 5%
^{NS} não significativo. PS: Posição superior; PI: Posição inferior.

Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que, nos tratamentos de Pacajus com caráter coeso (PCC) e Fortaleza sem caráter coeso (FSC), o comportamento do GF não ficou bem definido, apresentando valores ligeiramente semelhante em algumas soluções mais ou menos ácidas dos tratamentos, o que causou diferença entre elas. Ao relacionar o GF com a ADA, observa-se que quanto maior o teor de ADA, menor o GF.

Fontana *et al.* (2022), trabalhando com horizonte Bw, obtiveram valores de 4 e 15 g kg⁻¹ de ADA, o que resultou em um GF das argilas de 99 e 98%, respectivamente, corroborando os dados encontrados no tratamento PSC. Os resultados para esse tratamento (PSC) indicam que não há um potencial desse horizonte contribuir para aumentar o grau de coeso do horizonte que está abaixo, já que o material está floculado, impedindo a translocação da argila.

Tabela 16 - Valores médios do grau de floculação, porosidade total, densidade do solo e densidade de partículas.

Local	Hor.	pH	GF	PT	Ds	Dp
			------(%)-----		------(g. cm ⁻³)-----	
Fortaleza	Sem Coesão	4,25	74,07	38,45	1,61	2,61
		4,75	74,33	40,11	1,55	2,58
		5,25	76,62	40,16	1,55	2,59
		5,75	76,47	38,52	1,58	2,57
		6,25	76,40	39,13	1,58	2,59
	Coeso	4,25	89,05	37,48	1,58	2,56
		4,75	89,93	37,43	1,63	2,61
		5,25	92,94	39,20	1,57	2,58
		5,75	81,75	41,14	1,52	2,58
		6,25	83,53	39,19	1,57	2,58
Pacajus	Sem Coesão	4,25	95,17	38,41	1,58	2,57
		4,75	96,69	40,32	1,55	2,60
		5,25	97,73	41,81	1,55	2,59
		5,75	97,28	41,05	1,53	2,66
		6,25	98,10	41,42	1,56	2,60
	Coeso	4,25	49,85	38,21	1,66	2,69
		4,75	75,98	36,54	1,67	2,64
		5,25	64,91	34,13	1,72	2,61
		5,75	65,75	33,28	1,73	2,60
		6,25	61,20	33,77	1,71	2,58

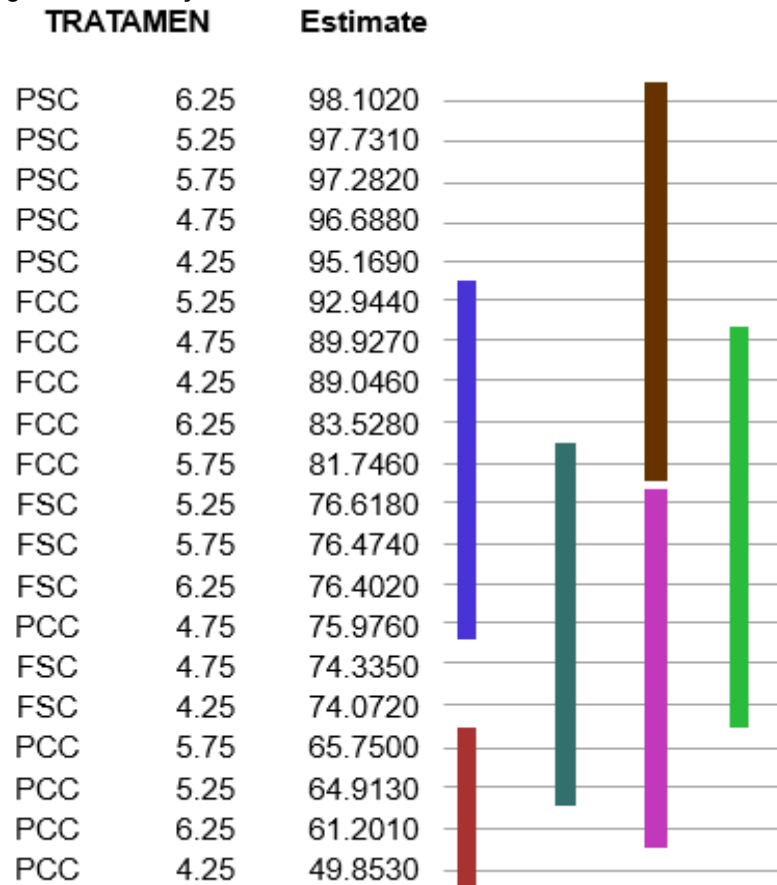
pH: Solução percolante; GL: Grau de floculação; PT: Porosidade total; Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de Partículas.

Fonte: Elaborado pela autora.

O tratamento PCC apresentou os menores valores do GF, o teor de argila foi entre 105 e 124 g kg⁻¹ e o de ADA entre 41 e 56 g kg⁻¹. Embora Moreau *et al.* (2006), tenham indicado que o grau de floculação tende a ocorrer com maior expressividade no horizonte B, em razão da atração eletrostática entre as cargas negativas e positivas das argilas (Menezes, 2016), deve-se considerar que o tratamento PCC apresentou os maiores teores de areia, com média acima de 800 g kg⁻¹. Segundo Portela *et al.* (2018), a fração areia é inerte e não apresenta cargas negativas nem atividade coloidal, o que contribui para os menores valores de GF.

Já nos tratamentos FSC e FCC, os valores foram ligeiramente semelhantes, com média variando entre 70 e 92%. Isso indica que, embora o teor de ADA tenha sido maior nesses tratamentos, o teor de argila entre 317 e 380 g kg⁻¹ possibilitou a atividade das cargas negativas coloidais, causando a atração dessas partículas e, conseqüentemente, maior floculação.

Figura 22 - Desdobramento da interação dos valores médios do grau de flocculação no cilindro



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

As barras com mesma cor indicam a semelhança entre os resultados.

Fonte: Elaborado pela autora

A análise de variância da porosidade total (PT) (Tabela 17), indica diferença significativa entre os horizontes com e sem caráter coeso e interação entre os horizontes x local (Fortaleza e Pacajus), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Pode-se observar que os horizontes sem caráter coeso (FSC e PSC) apresentam maiores valores de PT (Tabela 16) do que os horizontes com caráter coeso das respectivas áreas (FCC e PCC).

Ao relacionar as variáveis PT e DS, é possível observar no PCC que os menores valores de PT refletiram em maiores valores de densidade do solo.

Esse comportamento é justificado porque a porosidade total (PT) corresponde ao total de vazios do solo que podem ser ocupados pela fase líquida ou gasosa, sendo inversamente relacionada à densidade do solo. Ou seja, quanto maior a densidade, menor será a porosidade (Libardi, 2005; Hora, 2018).

Tabela 17 - Análise de variância da porosidade total.

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Porosidade Total	Local (F1)	1	15,85	15,85	0,1232 ^{NS}
	Horizonte (F2)	1	184,85	184,85	0,0001*
	pH (F3)	5	15,80	3,16	0,7889 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	286,01	286,01	0,0001*
	Interação F1xF3	5	69,98	13,99	0,0677 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	68,61	13,72	0,0728 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	97,54	19,50	0,0153 ^{NS}
	Tratamentos	23	738,67	32,11	0,0001*
	Resíduo	96	629,39	6,55	
	Total	119	1368,07	38,66	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios;* significativo a 5% ^{NS} não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

É importante ressaltar que a densidade do solo está relacionada com a estruturação do solo, desta forma, quanto menor a agregação, menor a quantidade de raiz e maior o adensamento nessas camadas. Assim, os poros são influenciados e conseqüentemente reduzidos (Freire, 2012).

Segundo Libardi (2005), os microporos no solo têm a capacidade de armazenar a água, enquanto os macroporos são responsáveis pelo fluxo e aeração desse sistema trifásico. Diante disso, deve-se considerar os teores de argila e areia que compõem os Tratamentos (Tabela 11).

Lima Neto *et al.* (2010) observaram que uma das características para formação do caráter coeso é a iluviação de argila fina (<0,002 mm). Assim, o caráter coeso proporciona aumento da densidade e redução da PT. Esse processo de iluviação pode justificar a menor PT do FCC em relação ao FSC, pois, embora apresentem teores de argila semelhantes, o horizonte com caráter coeso (FCC) mostrou menores valores de PT. O tratamento FSC perdeu material fino com fluxo das soluções percolantes, e, como os valores da ADA (Tabela 13) foram maiores, essas partículas soltas podem ter preenchido os poros existentes.

No horizonte sem caráter coeso de Pacajus (PSC), deve-se considerar o teor de areia acima de 800 g kg⁻¹, indicando maior presença de macroporos, o que justifica os maiores valores de PT entre os tratamentos e os menores valores de Ds.

Considerando as variáveis mencionadas acima (ADA, argila total, areia e DS), a PT segue a seguinte sequencial: PSC > FSC > FCC > PCC.

4.6. Análises químicas

As análises químicas do complexo de troca (Tabela 18) foram realizadas para fins de se avaliar a possível influência de alguns desses elementos nos processos de floculação e dispersão nos solos submetidos à percolação com soluções ácidas.

Os dados apresentados (Tabela 18) mostram que os cátions seguiram o padrão descrito por Alleoni, Mello e Rocha (2019), que constataram que, conforme o número de valência e dos raios hidratados, as bases são retidas no solo seguindo a seguinte série: $H^+ \gg Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ \sim NH_4^+ > Na^+$.

O cálcio foi o cátion trocável encontrado em maior proporção (Tabela 18), sendo um elemento floculante, conforme ratificado por Girão (2011), que, trabalhando em ambiente cárstico no semiárido, observou que, em solos com teores de Ca^{2+} entre 3 e 5 $cmol_c\ Kg^{-1}$, foi necessário a substituição do hidróxido de sódio por hexametáfosfato de sódio para permitir uma dispersão completa das partículas no ensaio granulométrico.

Analisando os teores de Ca^{2+} no presente estudo, observa-se que o processo de formação desses solos e os ciclos de percolação das soluções com diferentes pH permitiram que essa base fosse lixiviada, de modo que o teor desse cátion entre os tratamentos não influenciasse os processos de floculação ou o sítio de trocas na superfície das cargas.

Os teores de Mg^{2+} (Tabela 18) foram inferiores aos de Ca^{2+} . Batista (2010) destacou que, pela maior afinidade do Ca^{2+} em relação ao Mg^{2+} , esse último pode ser deslocado para camadas mais profundas do solo. No presente estudo, observou-se que os valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram superiores aos do Na^+ e K^+ em praticamente todos os horizontes.

Considerando apenas os cátions básicos, verifica-se que o K^+ foi o elemento encontrado em menores proporções (Tabela 18). Batista (2010), ao estudar o movimento dos cátions no solo, observou que o K^+ , por ser retido com menor força de ligação, pode ser mais facilmente lixiviado. Assim, nos solos estudados, é possível verificar que os processos pedogenéticos de translocação e remoção, associados aos ciclos de percolação, favoreceram a lixiviação dessas bases, que possuem ligação fraca com os colóides.

Tabela 18 – Características químicas do solo após tratamento com soluções ácidas

Hor.	pH da Solução	pH (H ₂ O)	pH (KCL)	Complexo Sortivo						
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC ^{(T)*}
------(cmolc kg ⁻¹)-----										
FSC	4,25	5,25	4,34	1,01	0,55	0,11	0,06	0,02	0,53	2,28
FSC	4,75	5,26	4,40	1,22	0,68	0,10	0,06	0,00	0,79	2,86
FSC	5,25	5,11	4,40	0,98	0,60	0,11	0,05	0,06	0,92	2,72
FSC	5,75	5,25	4,48	1,28	0,59	0,12	0,06	0,02	0,76	2,84
FSC	6,25	5,29	4,54	1,11	0,53	0,10	0,05	0,02	0,81	2,61
FCC	4,25	4,86	4,10	0,65	0,79	0,10	0,05	0,17	0,48	2,24
FCC	4,75	4,86	4,26	0,85	0,72	0,10	0,05	0,17	0,60	2,48
FCC	5,25	4,84	4,21	0,76	0,78	0,10	0,05	0,22	0,90	2,80
FCC	5,75	5,01	4,33	0,95	0,70	0,13	0,06	0,00	0,77	2,61
FCC	6,25	4,98	4,30	0,87	0,63	0,10	0,05	0,11	0,83	2,60
PSC	4,25	4,24	3,73	0,10	0,09	0,10	0,05	0,48	0,17	1,00
PSC	4,75	4,17	3,80	0,25	0,07	0,07	0,04	0,50	0,30	1,23
PSC	5,25	4,16	3,79	0,16	0,06	0,10	0,04	0,59	0,25	1,21
PSC	5,75	4,25	3,82	0,30	0,12	0,11	0,05	0,39	0,36	1,33
PSC	6,25	4,36	3,86	0,29	0,07	0,09	0,05	0,41	0,50	1,40
PCC	4,25	5,29	4,42	0,50	0,26	0,08	0,04	0,00	0,22	1,10
PCC	4,75	5,29	4,58	0,46	0,22	0,08	0,05	0,06	0,26	1,13
PCC	5,25	5,33	4,53	0,44	0,29	0,09	0,04	0,00	0,23	1,09
PCC	5,75	5,40	4,64	0,64	0,28	0,11	0,05	0,02	0,27	1,37
PCC	6,25	5,58	4,73	0,54	0,24	0,11	0,05	0,02	0,52	1,47

FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão. CTC^{(T)*}: Capacidade de troca de cátions total.

Fonte: Elaborado pela autora.

Felix *et al.* (2015), estudando solos dos Tabuleiros Costeiro, observaram que há limitação do suprimento de nutrientes devido à mineralogia da fração argila, predominantemente caulínica e associada à textura arenosa, resultando em baixa química natural do solo, o que pode limitar seu uso agrícola em razão dessas características.

Os teores de Al³⁺ trocável foram inferiores a 0,6 cmolc kg⁻¹ (PSC>FCC>FSC=PCC), o que indica que essa variável não se enquadre no caráter alumínico, o qual, segundo Santos *et al.* (2018), exige teor igual ou superior que 4 cmolc kg⁻¹. Segundo Sena (2016), valores de Al³⁺ trocável entre 0,1 e 1,7 cmolc kg⁻¹ em horizontes subsuperficiais podem ser mobilizados no complexo de troca.

Todavia, deve-se considerar que a liberação do Al^{3+} ocorre como consequência da acidez do solo, uma vez que o íon trocável depende inicialmente do pH para ser liberado.

Observa-se ainda que, no tratamento da solução percolante PSC, o pH em água está abaixo de 4,5 (Tabela 18), mas o teor de alumínio não é elevado. Outro fator importante a ser observar nesse perfil é a CTC total, que apresentou os menores valores entre os tratamentos. Dessa forma, é importante verificar a saturação por alumínio do PSC, pois, como a CTC total foi a menor, a saturação por alumínio (Tabela 19) apresentou o maior valor, justificando essa acidez da saturação por alumínio nesse perfil.

Tabela 19 - Saturação por alumínio nos tratamentos com solução percolante

Tratamento	Al³⁺ -----cmolc kg ⁻¹ -----	Valor S	Saturação por Alumínio ----- (m%) -----
FSC	0,20	1,89	9,62
FCC	0,13	1,69	7,14
PSC	0,47	0,44	51,65
PCC	0,20	0,91	18,02

Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora.

Entre os tratamentos submetidos às soluções percolante, é possível observar o comportamento da capacidade de troca de cátions (CTC) em função das soluções ácidas entre os locais.

Verifica-se indício de que a CTC no solo de Fortaleza, com a solução mais ácida (pH 4,25), foi ligeiramente inferior à dos outros tratamentos. Nos solos de Pacajus, essa CTC foi influenciada nos tratamentos com pH 4,25; 4,75 e 5,25, tanto nos horizontes coesos quanto nos não coeso. Os resultados da análise química mostram que esses solos (FSC; FCC; PSC e PCC) têm baixos valores de CTC (Tabela 18) em todas as soluções.

Considerando a mineralogia, solos altamente intemperizados apresentam propriedades indesejáveis do ponto de vista agrônomo, como a alta acidez, baixa CTC e alta capacidade de troca aniônica (Fontes, Camargo e Sposito, 2001).

A CTC é um atributo diretamente relacionado a matéria orgânica ou à mineralogia do solo, dependendo da profundidade. Como foram utilizados horizontes

B, subsuperficiais, subsuperficiais e mais profundos, a CTC está associada principalmente à mineralogia. É característico dos solos cauliniticos dos Tabuleiros Costeiros apresentarem baixa CTC.

Giarola *et al.* (2009), Sena (2016) e Miranda *et al.* (2019) observaram que solos com baixa capacidade de troca de cátions ($< 5 \text{ cmolc kg}^{-1}$), associados à baixa atividade da argila, refletem a pobreza do material de origem e a mineralogia da caulinitica da fração argila.

Segundo Alleoni, Mello e Rocha (2019), a variação do pH em KCL define o predomínio de cargas elétricas no solo, indicando o deslocamento de íons determinantes de (H^+ e OH^-). Quando o pH em KCL é maior que o pH em H_2O , significa que o Cl^- desloca maior quantidade de OH^- em relação ao H^+ deslocado pelo K^+ , tomando o solo eletropositivo, com predomínio de cargas positivas.

Os resultados obtidos (Tabela 18) mostram que o valor do pH em KCL foram inferiores aos de pH em H_2O , indicando que o predomínio de cargas do solo é eletronegativo, com maior deslocamento do H^+ . O pH em KCL foi avaliado com o objetivo de identificar a geração de cargas que poderiam influenciar nos processos de floculação e dispersão, como essa variável permaneceu eletronegativa, todas as citações de valores de pH nesta pesquisa referem-se ao pH do solo em H_2O .

diversos autores, como Giarola *et al.* (2001), Corrêa (2005), Lima Neto *et al.* (2009) e Dantas *et al.* (2014), em estudos com solos coesos da Formação Barreiras, observaram esses solos apresentam comportamento eletronegativos, com $\text{pH em H}_2\text{O} > \text{pH em KCL}$.

Pode-se afirmar, portanto, que os solos em estudo são intemperizados, porém não são extremamente intemperizados, pois não apresentam caráter eletropositivo, característicos de solos oxidicos. Segundo Baldotto e Velloso (2014), ao estudarem a eletroquímica de solos tropicais, como Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo, concluíram que solos mais intemperizados apresentam maiores valores de PCZ, com tendencia ao caráter eletropositivo.

4.7. Análises multivariadas

Para as análises multivariadas, foram consideradas 24 observações e 18 variáveis (Apêndice IV).

Na Figura 23, observa-se a análise de componentes principais (ACP), que caracteriza as variáveis considerando cada valor pH por solução em cada tratamento. A ACP é uma técnica estatística multivariada cujo objetivo é identificar variações em um conjunto de dados e encontrar combinações de variáveis não correlacionadas, ordenadas por importância, descrevendo variações de dados (Manly e Alberto, 2019).

Nota-se que os atributos pH em H₂O e em KCL, K⁺, Ca²⁺ e argila dispersa apresentaram maior influência no tratamento FSC (quadrante I). Os atributos porosidade total (PT) e Al³⁺ mostraram maior influência no tratamento PSC (quadrante III). O tratamento PCC (quadrante II) apresentou maior correlação com os atributos areia, GF, Ds e Dp, enquanto o tratamento FCC (quadrante IV) correlacionou-se mais fortemente com Rp, CTC, Mg²⁺, Na⁺, H⁺ e argila.

Quanto mais próximo as variáveis estiverem ao centro do gráfico, menor será a variância entre os atributos. Da mesma forma, o ângulo de inclinação formado entre os quadrantes opostos, indica o grau de correlação: quanto menor o ângulo, maior a correlação entre as variáveis. Observa-se que todos os tratamentos estão próximos ao ponto zero do gráfico, indicando contribuição equilibrada dos tratamentos na ACP.

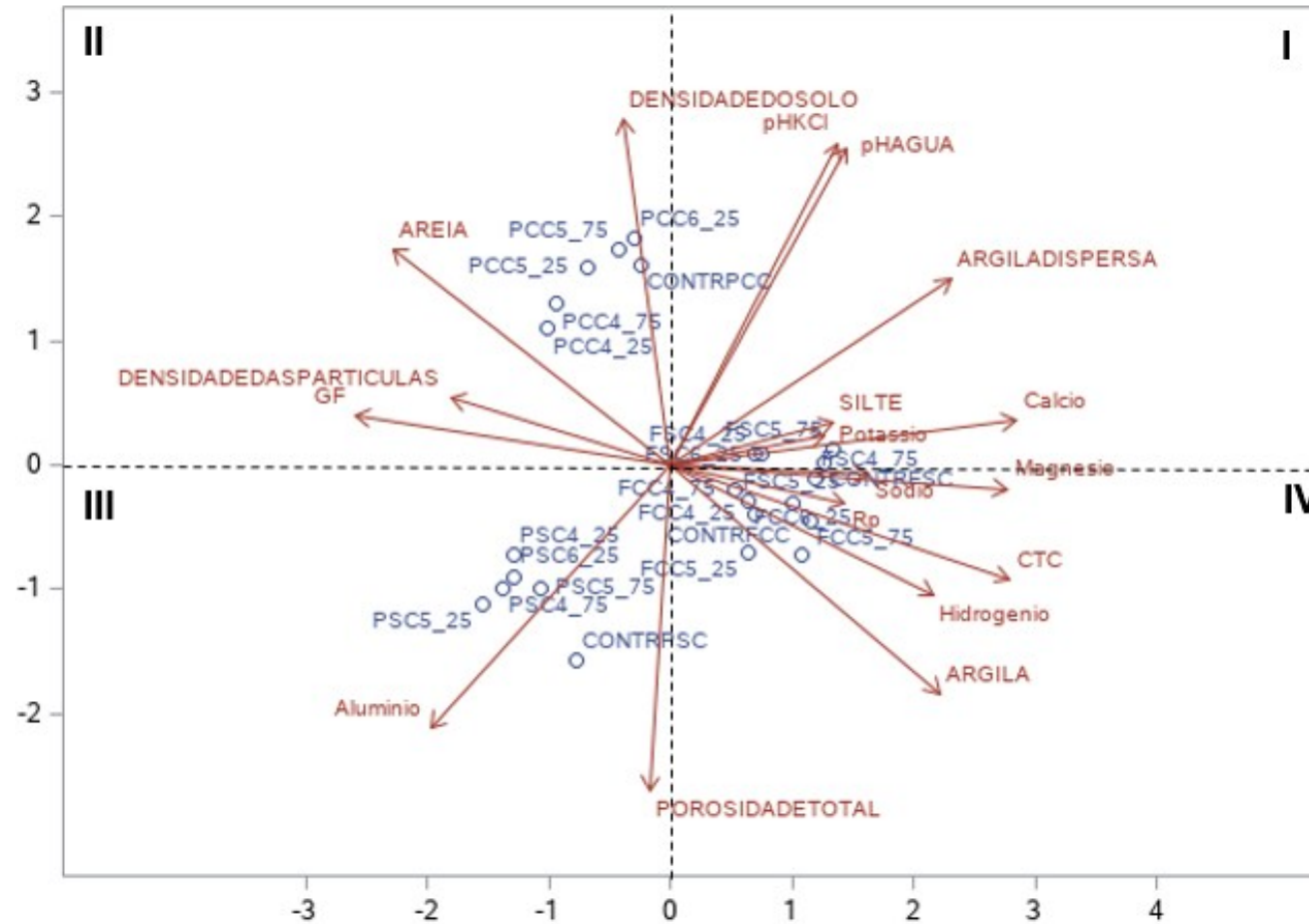
Ao relacionar os quadrantes e seus opostos, observa-se que cada tratamento ocupa um quadrante distinto, evidenciando correlação entre horizontes coesos e não coesos. No quadrante I, em todas as soluções de pH (com exceção do pH 5,25 localizado no quadrante IV), o tratamento FSC está próximo da origem e distantes das variáveis, indicando menor correlação com elas.

A variável argila dispersa apresentou maior correlação com os tratamentos FSC e menor com o PSC (quadrante oposto).

As variáveis pH em H₂O e em KCL, potássio e cálcio estão muito próximos entre si, praticamente sobrepostas, indicando representatividade semelhante no gráfico. Por estarem no mesmo quadrante, apresentam combinações homogêneas entre elas, e correlação diferentes ao quadrante oposto (III) com tratamento PSC, que é caracterizado pelo predomínio de alumínio e porosidade total.

Os vetores do pH em KCL e pH em H₂O estão paralelos e inversamente proporcionais ao Al³⁺, indicando que, à medida que o pH aumenta, o teor de Al³⁺ diminui.

Figura 23 - Análise de componentes principais correlacionando os atributos físicos e químicos em função dos tratamentos com diferentes soluções de pH



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à porosidade total, observa-se que a argila dispersa é inversamente proporcional: quanto maior o teor de argila dispersa, menor a PT, já que o material preenche os espaços porosos. Essa relação é observada nos valores do tratamento FSC (quadrante I) e PSC (quadrante III) (Tabela 11), sendo que o PSC apresenta maior teor de areia e menor de ADA.

No quadrante II, correspondente ao tratamento PCC, todas as soluções de pH estão afastadas da origem e distante das variáveis GF, areia e Dp, indicando homogeneidade interna, mas maior correlação com os atributos areia e Ds. Observa-se ainda que Ds foi o atributo com maior vetor, considerando o ângulo formado entre o quadrante e o oposto.

No quadrante IV, todas as soluções de pH estão próximas à origem e distantes das variáveis argila, CTC, Mg^{2+} , Na^+ e H^+ , apresentando menor correlação entre elas, com exceção do atributo Rp, que está mais próximo da origem, indicando maior correlação. Observa-se também a relação da CTC e teor de argila: como a CTC depende dos argilominerais do horizonte B, a atividade das cargas coloidais presente nesse horizonte resulta em maior correlação, sendo inversamente proporcional os teores de argila e areia, (quadrante II).

É notória a diferença da textura entre os horizontes, o que se reflete na correlação entre os atributos relacionados aos teores de areia, silte e argila. Nos tratamentos FSC e FCC, os teores de argila são superiores aos demais, de modo que os atributos dos quadrantes I e IV estão diretamente ligados às cargas elétricas do solo, uma vez que as partículas de argila são responsáveis pelas cargas superficiais e pela atividade dos sítios de troca.

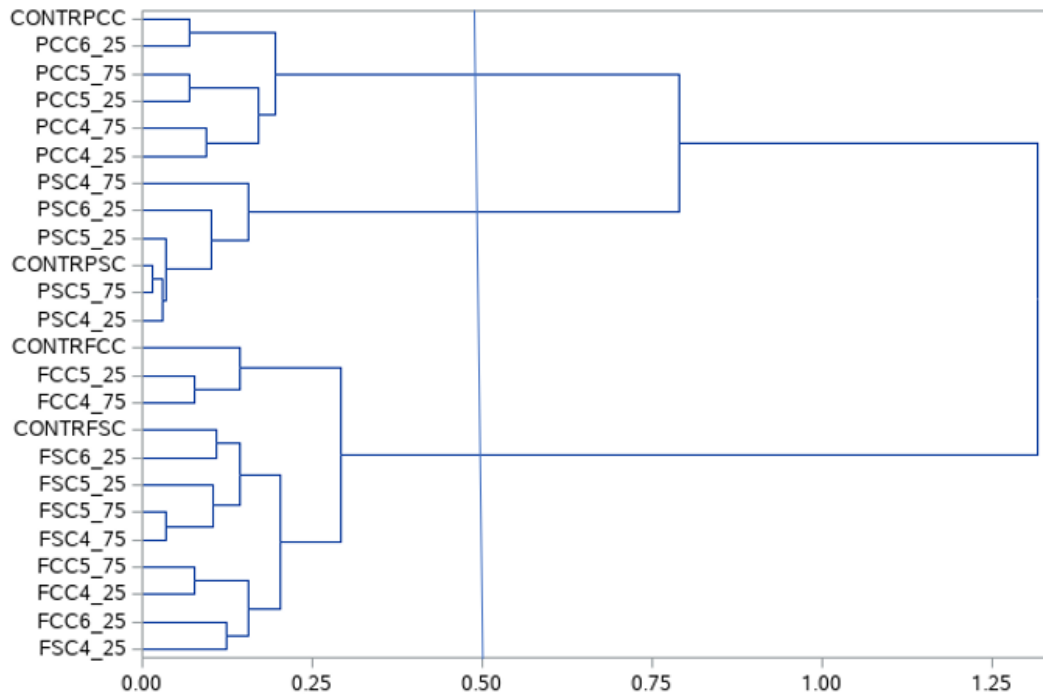
No quadrante III, o tratamento PSC foi o que apresentou menor correlação entre os atributos analisados, exceto para o Al^{3+} e porosidade. Ao considerar os valores da PT e Al (Tabela 16 e 18), observa-se que o PSC apresentou valores superiores aos demais tratamentos (FSC, FCC e PCC), o que explica a maior correlação dessas variáveis com esse tratamento.

No tratamento PCC, embora o teor de argila seja superior ao do PSC, deve-se considerar que houve perda de material fino por translocação, permitindo um reajuste das partículas de areia, silte, argila e argila dispersam, o que justifica a correlação dos atributos físicos ligados ao movimento das partículas no solo.

A análise de agrupamentos é um método que utiliza apenas os valores numéricos das variáveis para formar grupos de objetos similares entre (Manly e

Alberto, 2019). Assim, por meio do dendrograma, observa-se três grupos principais (Figura 23): o grupo I, formado pelos tratamentos FSC e FCC; o grupo II, composto pelo tratamento PSC; e o grupo III, formado pelo tratamento PCC.

Figura 24 - Dendrograma da análise de agrupamento indicando similaridade dos atributos físicos e químicos em função dos tratamentos com diferentes soluções de pH.



FCC: Fortaleza com coesão, FSC: Fortaleza sem coesão, PCC: Pacajus com coesão, PSC: Pacajus sem coesão.

Fonte: Elaborado pela autora.

É evidente a distinção entre os grupos quanto a influência das variáveis, em função das partículas granulométricas do solo. O grupo I apresenta a maior similaridade interna. Um ponto importante é que, embora os horizontes coesos e não coesos sejam distintos, os tratamentos possuem fração granulométrica semelhante. Isso indica que, mesmo após os tratamentos com soluções percolantes de diferentes pH, ainda que a classe textural tenha se alterado em algumas soluções (Tabela 11), o comportamento das variáveis manteve-se similar entre os valores médios por tratamento, coesos ou não.

O grupos II e III apresentam similaridade quando às soluções de pH, porém o agrupamento de dados médios das variáveis se comporta de forma distinta entre os tratamentos. Isso pode estar relacionado à textura desses horizontes, indicando que as variáveis atuam diferente entre os tratamentos, embora apresentem similaridade entre os valores de pH.

5 CONCLUSÕES

A hipótese de que os valores de pH poderiam corroborar a formação de horizontes com caráter coeso, por influenciarem a argila dispersa foi refutada para o tratamento de Pacajus sem coesão (PSC) e confirmada para o tratamento de Fortaleza sem coesão (FSC).

No horizonte PSC algumas variáveis indicadoras do caráter coeso foram mostraram sensibilidade ao tratamento com as soluções de pH, como a resistência à penetração (R_p) e a densidade do solo (D_s), porém não havendo translocação significativa da argila dispersa em água (ADA) em função do pH que caracterizasse o horizonte como coeso. No horizonte FSC, a dispersão de material entre as soluções de pH permitiu a translocação da fração argilosa.

No horizonte FCC, as soluções menos ácidas favoreceram o aumento do adensamento.

O tratamento PCC apresentou irregularidade na dispersão da argila em função do pH, permitindo afirmar a ocorrência de translocação da argila dispersa da posição superior para inferior dentro do horizonte. Destaca-se que, nesse tratamento, a perda de material fino entre as soluções percolantes com diferentes valores de pH indica que o pH pode influenciar o processo de dispersão e intensificar o adensamento característico do horizonte coeso.

Os parâmetros físicos influenciados pelo pH das soluções percolantes foram: resistência do solo à penetração (R_p), densidade do solo (D_s), teor de argila, argila dispersa (ADA), grau de floculação (GF) e porosidade total (PT), sendo esses efeitos observados com maior intensidade nos solos que apresentam caráter coeso.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 104 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Org.) **Química e mineralogia do solo: conceitos e aplicações**. 3. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. cap. XII, p. 766-803.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. *In*: MELO, V. F.; WYPYCH, F. (Org.) **Química e mineralogia do solo: conceitos e aplicações**. 3. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. cap. VII, p. 428–497.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Estrutura do solo. *In*: AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. (Org.) **Física do solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. cap. 5, p. 107–114.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Relações massa-volume. *In*: AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. (Org.) **Física do solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. cap. 6, p. 140–143, 147-150.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Revista do Instituto de Geociências** – USP, São Paulo, v. 6, n. 1–6, 2006.
- ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; ALENCAR, T. L.; SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, Amsterdam, v. 166, p. 290-297, 2018.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123–142.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337–345, 2004.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 459–504, 2004.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609–617, 2004.

BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Pontos de carga zero, potenciais da dupla camada elétrica e eletroquímica do húmus de solos tropicais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Santa Catarina. **Anais [...]**. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.

BATISTA, E. A. **Fontes de cálcio e magnésio e movimento de cátions em colunas de solo**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

BEZERRA, C. E. E.; FERREIRA, T.O.; ROMERO, R. E.; MOTA, J. C. A.; VIEIRA, J. M.; DUARTE, L. R. S.; COOPER, M. Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, Kingston, v. 53, p. 43-55, 2014

BRADY, N. C.; BUCKMAN, H. O. **Natureza e propriedades dos solos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. 594 p.

CARNEIRO, L. A. A.; SOUSA, L. R.; FRAGA, V. S.; SILVA, A. P.; UTUNI, V. H. S.; SANTOS, R. F.; VENDUSCOLO, J. Solos do brejo paraibano: Influências do clima, relevo e do material de origem. **Research Society and Development**, Campina Grande, v. 10, n. 7. 2021.

CINTRA, L. F. D.; RESENDE, R. S.; LEAL, M. L. S.; PORTELA, J. C. Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1041-1051, 2009.

CORADO NETO, F. C.; SAMPAIO, F. M. T.; VELOSO, M. E. C.; MARTINS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial da resistência em Neossolos litólicos degradados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1353-1361, 2015.

CORRÊA, M. M. **Óxido de ferro e tipificação de caulinitas na gênese de solos dos ambientes dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 194 f. Tese (Doctor Scientiae em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 297–313, jan. /fev. 2008.

CORRÊA, M. M.; KER, C. J.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CÂMELO, D. L. Formas de ferro, silício e, ou, alumínio na gênese de Fragipãs e horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 940-949, 2015.

COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. L.; SOARES JÚNIOR, A. V.; VILLEGAS, J. M. C. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 74, n. 3, p. 519-531, 2002.

CUNHA, J. C.; FREIRE, M. B. G. S.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; ALVAREZ V, V. H. Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 783-789, 2014.

DANTAS, J. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos com caráter coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1039-1050, 2014.

DOMPIERI, M. H. G. *et al.* Delimitação da área foco de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros e principais aspectos fisiográficos. Aracaju: **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2015. 41 p. (Documentos, 194).

DUARTE, L. R. S. **Pedogênese de horizontes com caráter coeso em duas topossequências nos Tabuleiros Costeiros**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DUARTE, L. R. S.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O. Determinação de atributos físicos de solos com caráter coeso em uma topossequência nos Tabuleiros Costeiros de Trairi-CE. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais** [...]. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

DUARTE, M. N.; CURI, N.; PÉREZ, D. V.; KAMPF, N.; CLAESSEN, M. E. C. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1237-1250. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

FELTRE, R. **Química: Físico-química**. 6 ed. São Paulo: Moderna, 2004. 417p.

FELIX, C. J. L.; ARRUDA, J. A.; VENDRUSCOLO, J.; VOGADO, R. F.; GOMES, V. S.; LIMA, B. J. S. Índice de qualidade química em solos dos tabuleiros costeiros da Paraíba. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **Anais** [...]. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

FONSÊCA, M. H. P.; GUERRA, H. O. C.; LACERDA, R. D.; BARRETO, A. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos tabuleiros costeiros, Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 368-373, 2007.

FONTANA, A. C.; SILVEIRA, H. MARCATTO, F. S.; NÓBRESA, M. T. Caracterização e Comportamento Físico-hídricos do Sistema Pedológico da Topossequência de Solos Dourados, Cambira, PR, Brasil. **Revista RA'EGA**, Curitiba, v. 53, p. 182-201, 2022.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 627-646. 2001.

FREIRE, A. G. **Índices de qualidade física para um Cambissolo em sistemas de manejo**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

FREITAS, E. D. **Gênese de Solos de uma Topossequência dos Tabuleiros Costeiros (CE): Ênfase na Dinâmica do Ferro**. 2010. 60 f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, L. P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento HARDSETTING: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 239-247, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e HARDSETTING. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 613-620, 2002.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A. R. Contribution of natural soil compaction on hasdsetting behavior. **Geoderma**, Amsterdam, v. 113, p. 95-108, 2003.

GIAROLA, N. F. B.; LIMA, H. V.; ROMERO, R. E.; BRINATTI, A. M.; SILVA, A. P. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 33-40, 2009.

GIRÃO, R. O. **Pedogênese em um ambiente cárstico no clima semiárido em Limoeiro do Norte – Ceará**. 2011. 54 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição

de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

GUIMARÃES, T. L. B.; LEÃO, T. P.; FIGUEREDO, C. C.; BUSATO, G. B.; BREYER, H. S. Efeito da concentração e valência do cátion da solução na dispersão/coagulação de um latossolo vermelho. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Santa Catarina. **Anais [...]**. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

HORA, R. A. C. **Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo Amarelo distrocoeso submetido a uso intensivo do solo**. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia**. 3. ed. – Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Municipal de Pacajus-CE 2017**. Pacajus, jan. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Municipal de Fortaleza-CE 2017**. Fortaleza, jan. 2018.

JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. *In*: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 1996, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa, 1996. 80 p.

KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. *In*: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Org.). **Pedologia: fundamentos**. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. cap. IV, p. 82-90.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIMA H. V.; SILVA, A. P.; JACOMINE, P. T. K.; ROMERO, R. E.; LIBARTI, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; SANTOS, M. C.; COOPER, M.; ROMERO, R. E. Micromorphology and image analysis of a gerdsetting Ultisol (Argissolo) in the State of Ceará (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, 416-426 p. 2006.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, J. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S. S.; LIMA, J. F. W. F.; ABREU, R. F.; FERREIRA, L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolo dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, J. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, J. F. W. F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos horizontes coesos de latossolos e argissolo dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1001-1011, 2010.

LOPES, A. S. **Solos: fatos e conceitos**. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

MABESOONE, J. M.; CAMPOS E SILVA, A.; BEURLIN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.2, n. 3, p. 173-188, 1972.

MACEDO, J. R.; DONAGEMMA, G. K.; SCHULER, A.; PRADO, R. B.; POLI, R.; SILVA, N. T.; JUSTIN, R. Caracterização da adequação de usos em solos coesos na microbacia do Brejo da Cobiça – Município de São Francisco de Itabapoana – RJ. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBCS; Embrapa Solos, 2008. (Documentos 101).

MANLY, B. F. J.; ALBERTO, J. A. N. **Métodos Estatístico Multivariados: uma introdução**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2019.

MARCELO, V. F. **Manejo da qualidade física de solos coesos em tabuleiros costeiros de Pernambuco**. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

MARQUES, E. S. **Solos com caráter coeso: limitações do espaço poroso livre de água no desenvolvimento vegetativo do milho**. 2019. 84 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo: Pedologia) – Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MELO, D. V. M.; ALMEIDA, B. G.; SOUZA, E. R.; SILVA, L. S.; JACOMINE, P. K. T. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 476-485, 2014.

MENEZES, A. S. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de tabuleiro costeiro**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção dos solos. *In*: MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6. ed. Porto Alegre, 2015. cap. 5, p. 113-146.

MILLER, W. O.; MILLER, D. M. A micro-pipette method for soil mechanical analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 18, p. 1-15, 1987.

MIRANDA, M. C.; COSTA, O. D. A. V.; LIMA, A. V.; SOUZA, L. S. (org.). Solos coesos com diferentes cores no litoral norte da Bahia. *In*: SEABRA, G. **Terra – Habitats Urbanos e Rurais**. Ituiutaba: Barlavento, 2019. p. 158-169.

MORAIS, R. M. O.; MELLO, C. L.; COSTA, F. O.; SANTOS, P. F. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos depósitos da Formação no Estado do Rio de Janeiro. **Geologia USP: Série Cientista**, São Paulo, v. 6, p. 19 – 30, 2006.

MOREAU, A. M. S. S.; KER, J. C.; COSTA, L. M. C.; GMES, F. H. Caracterização de solos de duas toposequências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1007-1019, 2006.

MOTA, J. C. A.; FEITOSA, C. E. L.; PINHEIRO, J. J.; SOUSA, A. M.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; QUEIROZ, A. S.; NASCIMENTO, I. V. Pipette method: erros resulting from alíquota collection depth in soil clay quantification. **Journal of Agricultural Science**, Toronto v. 11, p. 244-250, 2019.

MOURA-FÉ, M. M. Barreiras: Série, Grupo ou Formação? **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 6, p. 1055-1061. 2014.

MULLINS, C. E.; YOUNG, I. M.; BENGOUGH, A. G.; LEY, G. J. Hard-setting soils. **Soil Use and Management**, New Jersey, v. 3, n. 2. p. 79-83 1987.

NUNES, F. C.; SILVA, E. F.; VILAS BOAS, G. S. Grupo Barreiras: característica, gênese e evidências de neotectonismo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 31 p. (**Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** / Embrapa Solos, 194).

OLIVEIRA, V. S. **Compactação em solos coesos dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas**. 2008. 76 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

PAULA, N. H. **Contribuição de silício e alumínio na gênese do caráter coeso**. 2018. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

PEREIRA, V. H. C.; CESTARO, L. A. Unidade geoambiental tabuleiro costeiro e o planejamento municipal: o caso de Senador Georgino Avelino/ RN. **Revista Geonorte**, Manaus, ed. Especial, v 3, n. 4, p. 390-401, 2012.

PORTELA, J. C.; SILVA, A. C.; SILVA, S. Y. M.; OLIVEIRA, M. A. S.; SILVA, F. W. A. Argila dispersa em água e grau de floculação em classes de solos. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS – COINTER PDVAGRO, 3., 2018. Maceió. **Anais** [...]. Maceió: Alagoas, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.IIICOINTERPDVAGRO.2018.00288>. Acesso em: 13 nov. 2025.

QUEIROZ, A. S. NASCIMENTO JÚNIOR, F. R. P.; OLIVEIRA, S. L.; LOPES, A. S.; NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Elementary mass for the particle-size analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 53, n. 6, p. 752-758, 2022.

RAMOS, M. R.; CURCIO, G. R.; DEDECEK, R. A.; MELO, V. F.; UHLMANN, A. Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos de formação macacu no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 837-845, 2013.

RÊGO, L. G. S.; SILVA, J. J. A.; SOUZA, C. M. M.; PORTELA, J. C.; MOURA, I. N. B. M.; SILVA, A. C. R.; MIRANDA, N. O. Pedogenesis in the Barreiras Formation Under Climates of Rio Grande do Norte, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 11, n. 16, 2019.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos no leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1077-1090, 2014.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e Sustentabilidade de Sistemas Agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29,43, 2003.

RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M.; CURI, N. OLIVEIRA, G. C.; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. International year of Chemistry. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 1,5-10, 2011.

ROMERO, R. E.; LIMA, H. V. Solos de Tabuleiros Costeiros, compostos amorfos e parâmetros de ordem estrutural da caulinita em um horizonte coeso. *In*: Oliveira, T. S.; Eduardo de Sá Mendonça, E. S.; XAVIER, F. A. S.; LIBARTI, P. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N. (Org.). **Solo e Água: aspecto de uso e manejo – com ênfase no semi-árido nordestino**. 1 ed. Fortaleza: UFC-UFV-ESALQ/USP-CAPES, 2004, p. 218-241.

SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros no Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1-12, 2006.

SANTOS, H. G. *et al.* Atributos diagnósticos e outros atributos. *In*: SANTOS, H. G. *et al.* (Org.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 5. ed. rev. amp. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. cap. 1, p. 36-61.

SANTOS, M. M. M.; PEREIRA, F. A. C.; SOUZA, L. S. S.; SANTOS, E. B.; SILVEIRA, F. G. F. Hidrodinâmica em solos típicos dos Tabuleiros Costeiros no Recôncavo da Bahia. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 4, p. 770-780, out. /dez., 2019.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMUZI, S. H. Horizontes do solo. *In*: SANTOS, R. D. *et al.* (org.). **Manual de descrição e coleta**

de solo no campo. Viçosa: 7. ed. rev. ampl. MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, cap. 2, p. 41.

SENA, N. C. **Solos coesos desenvolvidos sobre sedimentos da formação Barreiras no estado do Amapá.** 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R.; MERMUT, A. R.; BENKE, M. B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do Estado de Alagoas: Propriedades Micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 515-525, 1998.

SILVA, C. P. **Gênese do caráter coeso: relação da resistência tênsil com atributos físicos e químicos do solo.** 2019. 65 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo: Pedologia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SILVA, C. P.; ALMEIDA, B. G.; ROMERO, R. E.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, L. S.; COSTA, M. C. G.; MOTA, J. C. A. Cohesive character in Alfissols, Ultisol and Oxsols in northeast of Brazil: Relationship with tensile strength and particle size. **Geoderma Regional**, Amsterdam v. 23, p. e00341, 2020.

SILVA, D. M. **O papel de compostos de baixa cristalinidade em atributos físicos de horizontes com caráter coeso.** 2016. 36 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SOUSA, D. M. G; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (org.). **Fertilidade do Solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. V, p. 206-268.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROSA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2613-2613, 2008.

SUGUIO, K.; NOGUEIRA, A. C. R. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. **Geociências**, São Paulo. v. 18, p. 461-476, 1999.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 6, p. 1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22. p. 573 – 581, 1998.

VIEIRA, J. M. **Fatores físicos e agentes químicos envolvidos na gênese de solos com caráter coeso**. 2019. 101 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo: Pedologia) – Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JÚNIOR. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, p. 623-632, 2012.

VILAS BÔAS, G. S.; SAMPAIO, F. J.; PEREIRA, A. M. S. The Barreiras Group in the Northeastern coast of State on Bahia, Brazil: depositional mechanisms and processes. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 73, n. 3, 2001.

APÊNDICE A - CÁLCULOS REALIZADOS NO PREPARO DAS SOLUÇÕES DE PH

$$\text{pH} = -\text{Log} [\text{H}^+] \longrightarrow [\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

- pH = 4,25 → $[\text{H}^+] = 10^{-4,25} = [\text{H}^+] = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$
- pH = 4,75 → $[\text{H}^+] = 10^{-4,75} = [\text{H}^+] = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$
- pH = 5,25 → $[\text{H}^+] = 10^{-5,25} = [\text{H}^+] = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}$
- pH = 5,75 → $[\text{H}^+] = 10^{-5,75} = [\text{H}^+] = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}$
- pH = 6,25 → $[\text{H}^+] = 10^{-6,25} = [\text{H}^+] = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ mol/L}$

$$V1 \times C1 = V2 \times C2$$

Para uma solução com Ácido Molaridade a 0,1

Para um volume de solução de 2 litros

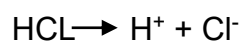
- pH = 4,25 → $V1 \times 0,1 = 2000 \times 5,6 \cdot 10^{-5} = 1,12 \text{ mL}$
- pH = 4,75 → $V1 \times 0,1 = 2000 \times 1,7 \cdot 10^{-5} = 0,34 \text{ mL}$
- pH = 5,25 → $V1 \times 0,1 = 2000 \times 5,6 \cdot 10^{-6} = 0,112 \text{ mL}$
- pH = 5,75 → $V1 \times 0,1 = 2000 \times 1,7 \cdot 10^{-6} = 0,034 \text{ mL}$
- pH = 6,25 → $V1 \times 0,1 = 2000 \times 5,6 \cdot 10^{-7} = 0,0112 \text{ mL}$

Para uma solução de Ácido com a Molaridade a 0,5

Para um volume de solução de 5 litros

- pH = 4,25 → $V1 \times 0,5 = 5000 \times 5,6 \cdot 10^{-5} = 0,56 \text{ mL}$
- pH = 4,75 → $V1 \times 0,5 = 5000 \times 1,7 \cdot 10^{-5} = 0,085 \text{ mL}$
- pH = 5,25 → $V1 \times 0,5 = 5000 \times 5,6 \cdot 10^{-6} = 0,056 \text{ mL}$
- pH = 5,75 → $V1 \times 0,5 = 5000 \times 1,7 \cdot 10^{-6} = 0,017 \text{ mL}$
- pH = 6,25 → $V1 \times 0,5 = 5000 \times 5,6 \cdot 10^{-7} = 0,0056 \text{ mL}$

Foram usados Ácido Clorídrico e Hidróxido de Sódio (NaOH) a 0,025 N



APÊNDICE B - FOTOS DE MANCHAS NA COR DE ALGUNS TRATAMENTOS
FSC - FCC



APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS ANÁLISES QUÍMICAS

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Cálcio	Local (F1)	1	11,004	11,004	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,0004	0,0004	0,8545 NS
	pH (F3)	5	0,779	0,1558	0,0001*
	Interação F1xF2	1	2,552	2,552	0,0001*
	Interação F1xF3	5	0,088	0,0177	0,2021 NS
	Interação F2xF3	5	0,049	0,0099	0,5266 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,078	0,0156	0,2641 NS
	Tratamentos	23	14,553	0,632	0,0001*
	Resíduo	96	1,1472	0,0119	
	Total	119	15,6991	0,6439	
Magnésio	Local (F1)	1	7,2914	7,2914	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,6780	0,6780	0,0001*
	pH (F3)	5	0,0841	0,01683	0,0167 NS
	Interação F1xF2	1	0,00008	0,00008	0,9044 NS
	Interação F1xF3	5	0,06880	0,01376	0,0431 NS
	Interação F2xF3	5	0,0242	0,004849	0,5221 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,03376	0,006753	0,3272 NS
	Tratamentos	23	8,18053	0,35675	0,0001*
	Resíduo	96	0,55180	0,00574	
	Total	119	8,73233	0,41415	
Sódio	Local (F1)	1	0,003413	0,003413	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,000120	0,000120	0,2249 NS
	pH (F3)	5	0,021810	0,004362	0,0001*
	Interação F1xF2	1	0,00012	0,00012	0,2249 NS
	Interação F1xF3	5	0,001676	0,0003353	0,0018 NS
	Interação F2xF3	5	0,001130	0,000226	0,0206 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,00089	0,000178	0,0591 NS
	Tratamentos	23	0,029160	0,001267	0,0001*
	Resíduo	96	0,007720	0,0000842	
	Total	119	0,036880	0,0013512	
Potássio	Local (F1)	1	0,000853	0,00085	0,0063 NS
	Horizonte (F2)	1	0,000053	0,000053	0,4871 NS
	pH (F3)	5	0,003580	0,0007160	0,0001*
	Interação F1xF2	1	0,0005633	0,0005633	0,0589 NS
	Interação F1xF3	5	0,001916	0,000383	0,0060 NS
	Interação F2xF3	5	0,001096	0,0002193	0,0853 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,0007466	0,0001493	0,2452
	Tratamentos	23	0,008810	0,000383	0,0001*
	Resíduo	96	0,010520	0,0001095	
	Total	119	0,01933000	0,000925	

(Continuação)

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Alumínio	Local (F1)	1	0,81345	0,81345	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,873813	0,873813	0,0001*
	pH (F3)	5	0,181986	0,036397	0,0001*
	Interação F1xF2	1	2,425363	2,425363	0,0001*
	Interação F1xF3	5	0,018096	0,003619	0,3677 NS
	Interação F2xF3	5	0,013896	0,002779	0,5234 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,1513667	0,3027733	0,0001*
	Tratamentos	23	4,47799667	0,19469551	0,0001*
	Resíduo	96	0,317000	0,003302	
	Total	119	4,79499667	0,19799751	
Hidrogênio	Local (F1)	1	5,40600750	5,40600750	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,13940083	0,13940083	0,0016 NS
	pH (F3)	5	5,45169750	1,09033950	0,0001*
	Interação F1xF2	1	0,039240	0,039240	0,0885 NS
	Interação F1xF3	5	0,37315750	0,07463150	0,0001*
	Interação F2xF3	5	0,19856417	0,03971283	0,0148 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,55112417	0,11022483	0,0001*
	Tratamentos	23	12,15919	0,5286605	0,0001*
	Resíduo	96	1,272040	0,01325042	
	Total	119	13,43123250	0,541910	
CTC Total	Local (F1)	1	56,842567	56,842567	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,224467	0,224467	0,0374 NS
	pH (F3)	5	7,517834	1,503566	0,0001*
	Interação F1xF2	1	0,01950750	0,01750750	0,5354 NS
	Interação F1xF3	5	0,7443275	0,148865	0,0160 NS
	Interação F2xF3	5	0,28880750	0,0577615	0,3417 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,976685	0,1953375	0,0031 NS
	Tratamentos	23	66,61419917	2,89626953	0,0001*
	Resíduo	96	4,839600	0,0514125	
	Total	119	71,45379917	2,94768203	
pH H ₂ O	Local (F1)	1	0,759340	1,79340	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	5,8036008	5,80360083	0,0001*
	pH (F3)	5	0,83041417	0,166082	0,0001*
	Interação F1xF2	1	17,12340750	17,12340750	0,0001*
	Interação F1xF3	5	0,13027417	0,0260548	0,3230 NS
	Interação F2xF3	5	0,2862141	0,072428	0,0299 NS
	Interação F1xF2xF3	5	0,0565675	0,013135	0,7652 NS
	Tratamentos	23	25,98981917	1,12999214	0,0001*
	Resíduo	96	2,113560	0,02201625	
	Total	119	28,103379	1,15200839	

(Continuação)

Variáveis	Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
pH KCL	Local (F1)	1	0,56444083	0,5644083	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	2,81826750	2,1826750	0,0001*
	pH (F3)	5	0,57913417	0,11582683	0,0001*
	Interação F1xF2	1	7,53504083	7,53504083	0,0001*
	Interação F1xF3	5	0,0126341	0,02043350	0,2176 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	0,1021675	0,020433	0,2176 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	0,04243417	0,00848683	0,7021 ^{NS}
	Tratamentos	23	11,65411917	0,50670083	0,0001*
Resíduo	96	1,364040	0,01420875		
Total	119	13,01815917	0,52090958		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% ^{NS} não significativo.

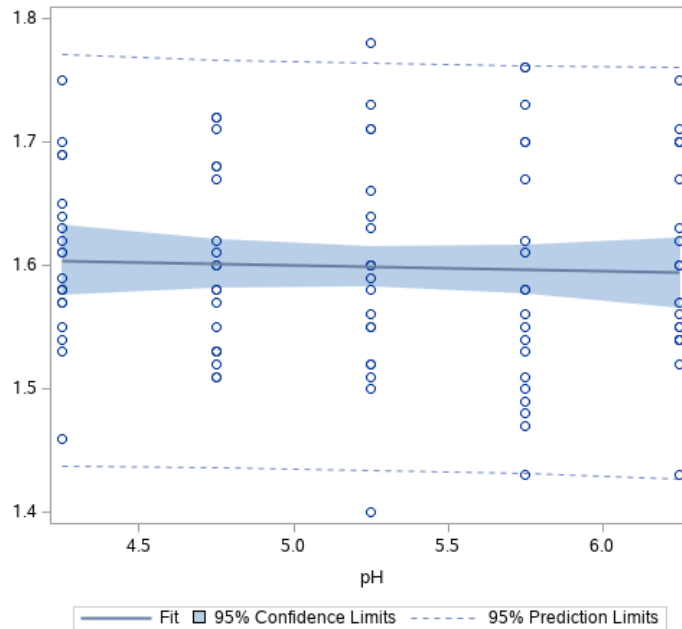
**APÊNDICE D – ATRIBUTOS CONSIDERADOS PARA ANÁLISES
MULTIVARIADAS**

Tratamentos	Variáveis	Controle dos tratamentos
FSC 4,25	Resistência a penetração	CONTROLE FCC
FSC 4,75	Densidade do solo	CONTROLE FSC
FSC 5,25	Densidade das partículas	CONTROLE PSC
FSC 5,75	Areia	CONTROLE PCC
FSC 6,25	Silte	
FCC 4,25	Argila	
FCC 4,75	Argila dispersa em água	
FCC 5,25	Porosidade total	
FCC 5,75	Grau de floculação	
FCC 6,25	pH KCL	
PSC 4,25	pH Água	
PSC 4,75	Hidrogênio	
PSC 5,25	Alumínio	
PSC 5,75	Magnésio	
PSC 6,25	Cálcio	
PCC 4,25	Sódio	
PCC 4,75	Potássio	
PCC 5,25	Capacidade de troca de cátions	
PCC 5,75		
PCC 6,25		

FCC - Fortaleza com coesão, FSC - Fortaleza sem coesão, PCC - Pacajus com coesão, PSC - Pacajus sem coesão.

APÊNDICE E – DADOS ESTATÍSTICOS DA DENSIDADE

Figura 25 - Análise de regressão da densidade do solo



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 20 - Análise de variância da densidade das partículas

Variáveis	Fontes de Variação	GF	SQ	QM	F
Densidade das Partículas	Local (F1)	1	0,04	0,041	0,0001*
	Horizonte (F2)	1	0,002	0,002	0,3123 ^{NS}
	pH (F3)	5	0,016	0,003	0,2589 ^{NS}
	Interação F1xF2	1	0,0001	0,0001	0,8395 ^{NS}
	Interação F1xF3	5	0,004	0,0008	0,8946 ^{NS}
	Interação F2xF3	5	0,034	0,0069	0,0188 ^{NS}
	Interação F1xF2xF3	5	0,054	0,010	0,0011 ^{NS}
	Tratamentos	23	0,1537	0,0066	0,0003*
Resíduo	96	0,2346	0,0024		
Total	119	0,3881	0,0090		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios: * significativo a 5% ^{NS} não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora.

ANEXO
ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DOS PERFIS DE FORTALEZA E
PACAJUS

- Ap** 0-10cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), bruno acinzentado escuro (10YR 5/2, seca); fraca média granular e fracas pequenos blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
- Ap2** 10-17 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), bruno claro acinzentado (10YR 6/2 seca); moderada média a grandes blocos subangulares; dura a muito dura; friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada.
- E** 17-39 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/3, úmida), bruno-amarelado (10YR 5/4, seca); maciça; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BE** 39-63 cm; bruno (7,5 YR 5/4 úmida), bruno forte (7,5YR 5/6 seca); moderada média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual
- Bt1** 63-79 cm, bruno (7,5 YR 5/4 úmida), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6); moderada média a grandes blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.
- Bt2** 79- 112 cm; bruno forte (7,5 YR 5/6 úmida), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6 seca); maciça com tendência a formação de blocos subangulares; extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Bt3** 112-152cm+; bruno forte (7,5 YR 5/6 úmida), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6 seca), maciça com tendência a formação de blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa.
- Bt4** 152-187cm+; bruno forte (7,5 YR 5/6 úmida), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/8 seca), moderada a forte média a grandes blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES – Muitas finas no horizonte Ap1; comuns finas em Ap2; poucas médias em E e BE; raras finas, médias e grossas em BE e raras médias em Bt1, Bt2, Bt3 e Bt4

OBSERVAÇÕES – Horizontes Bt2 e Bt3 apresentam o carácter coeso
P1: CLASSIFICAÇÃO – **ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico**

P2: CLASSIFICAÇÃO – ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto
DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0 – 7 cm, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), cinzento (7,5YR 5/1 seca); areia; solta a macia, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.
- A2** 7 – 18 cm, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), cinzento (10YR 5/1 seca); areia; macia, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição gradual e plana.
- AE** 18 - 31 cm: bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2 úmida) cinzento (10YR 6/1 seca); areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.
- EA** 31 – 75 cm (72 – 78 cm), bruno (10YR 5/3 úmida), cinzento-claro (10YR 7/2 seca); areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição abrupta e ondulada.
- E1** 75 – 100 cm (96 – 112 cm), bruno (10YR 5/3 úmida), bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2 seca); areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição abrupta e irregular.
- E2** 100 – 125 cm, bruno claro-acinzentado (10YR 6/3 úmida), bruno muito claro acinzentado (10YR 8/2 seca); areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição abrupta ondulada.
- Bt** 125 – 156+ cm, cinzento-claro (10YR 7/2 úmida), branco (7,5YR 8/1 seca), mosqueado bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4), abundante, grande, distinto; franca arenosa; dura, firme, não plástico e não pegajoso.

RAÍZES – Comuns finas no horizonte A1, poucas finas no horizonte A2, poucas finas e raras média no horizonte AE, raras finas horizontes EA, E1, E2 e Bt.

OBSERVAÇÕES - Perfil úmido no momento da descrição. Corte de estrada com presença de cupim e formiga. Lamelas na base do horizonte EA e E1 e no topo do horizonte E2. Ocorrência de mosqueados no horizonte Bt.

P3: CLASSIFICAÇÃO – **ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico**
 DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A** 0 – 10 cm, cinzento-escuro (10YR 4/1 úmida), cinzento-claro (10YR 7/1 seca); areia; macia, muito friável, não plástico, não pegajoso; transição clara e plana.
- AE** 10 – 33 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4 úmida), bruno muito claro-acinzentado (10 YR 8/2 seca); areia a areia franca; ligeiramente dura, muito friável, não plástico, não pegajoso; transição difusa e plana.
- E1** 33 – 70 cm, bruno-amarelado-claro (10YR 6/4 úmida), bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3 seca); areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico, não pegajoso, transição gradual e ondulada.
- E2** 70 – 93 cm (87 – 96 cm), amarelo (10YR 7/6 úmida), bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/3 seca); areia franca a areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico, não pegajoso; transição clara e ondulada.
- EB** 93 – 110 cm (107 – 114 cm), amarelo (10YR 7/6 úmida), bruno muito claro acinzentado (10YR 8/4 seca); areia franca a areia; ligeiramente dura, muito friável, não plástico, não pegajoso; transição clara e ondulada.
- Bt1** 110 – 152 cm (110 – 152 cm), amarelo (10YR 7/6 úmida), bruno muito claro acinzentado (10YR 8/4 seca); franca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana.
- Bt2** 152 – 173 cm, amarelo (10YR 7/6 úmida), amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/4 seca); mosqueado amarelo-avermelhado (5YR 7/8) pouco médio a grande e proeminente; franca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.
- Bt3** 173 – 245+ cm, amarelo (10YR 8/8 úmida), amarelo (2,5Y 8/6 seca); mosqueado amarelo (10YR 8/8) comum, grande e proeminente; franco argiloso; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

RAÍZES - Muitas finas no horizonte A, poucas finas e raras médias no horizonte AE, poucas finas e raras médias no horizonte E1, raras finas nos horizontes E2, EB, Bt1 e Bt2.

OBSERVAÇÕES - Perfil úmido no momento da descrição, presença de linhas de formação de mosqueados aparecendo a 150 m de profundidade. Horizonte Bt1 com aproximadamente 1 % de mosqueados com tamanho menor que 5 mm. Horizonte Bt2 mosqueados de tamanho aproximadamente 5 mm. Presença de lamelas no topo do horizonte E2 até a parte inferior do horizonte EB com topografia ondulada e espessura de 5 mm