



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

JULIANA MATOS VIEIRA

**FATORES FÍSICOS E AGENTES QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA GÊNESE DE
SOLOS COM CARÁTER COESO**

FORTALEZA

2019

JULIANA MATOS VIEIRA

FATORES FÍSICOS E AGENTES QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA GÊNESE DE SOLOS COM CARÁTER COESO

Tese 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 Doutor. Área de Concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

V715f Vieira, Juliana Matos.
 FATORES FÍSICOS E AGENTES QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA GÊNESE DE SOLOS COM
 CARÁTER COESO / Juliana Matos Vieira. – 2019.
 101 f. : il. color.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
 Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2019.

 Orientação: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero.

 Coorientação: Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira.

 1. Coesão. 2. Análise de imagens. 3. Ciclos de umedecimento e secagem. 4. Compostos cimentantes. I.
 Título.

CDD 631.4

JULIANA MATOS VIEIRA

FATORES FÍSICOS E AGENTES QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA GÊNESE DE SOLOS COM CARÁTER COESO

Tese 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 Doutor.
Área de Concentração: Pedologia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

Aprovado em: 21/06/2019

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira (Co-orientador)
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ) – USP

Profa. Dra. Antônia Gislaíne Brito Marques Albuquerque
Instituto Federal do Ceará- IFCE

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

Prof. Dr. Raul Shiso Toma
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais José Vieira e Raimunda Matos pelo amor, dedicação, educação e por tudo que me proporcionaram para que eu pudesse chegar até aqui.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela força e coragem durante toda esta caminhada e por me proporcionar tantas oportunidades.

Ao meu esposo Emanuel Dias, pela amizade, amor, paciência, apoio e incentivo que tenho recebido durante todos esses anos juntos.

Aos meus queridos avós Terezinha Vieira, Luiz Vieira (in memoriam), Estela Matos (in memoriam) e Juvêncio Sales (in memoriam) pelo amor e por tantos ensinamentos.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo pelo conhecimento e qualificação que tanto contribuiu para minha formação profissional e pessoal.

À CAPES, instituição que fomentou minha bolsa de Doutorado.

Ao Professor Dr. Ricardo Espíndola Romero pela orientação, amizade, paciência, conselhos e ensinamentos a mim direcionados durante todos esses anos que me orientou.

Ao professor Dr. Tiago Osório Ferreira pelas sugestões, amizade, paciência, constante incentivo e confiança depositada em mim desde a graduação.

Ao professor Dr. Jaedson Mota pela grande ajuda no desenvolvimento desse trabalho, sugestões e ensinamentos.

A professora Dra. Gislaine, pela atenção, amizade e por ter aceitado prontamente o convite de participar da banca examinadora.

Ao Professor Dr. Raul Shiso pela ajuda, sugestões e por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora.

Aos Professores Dr. Brivaldo e Dr. Luciano pela atenção e disponibilização de amostras de solos.

A professora Dra. Miriam Costa pela paciência, compreensão e todos os ensinamentos que me foram passados durante essa jornada.

Ao professor Dr. Miguel Cooper por ter ajudado no desenvolvimento desse trabalho, pela ajuda essencial durante as análises micromorfológicas e por ter disponibilizado o Laboratório de Micromorfologia do departamento de Ciências do solo da ESALQ.

Ao Dr. Carlos Vaz da Embrapa Instrumentação pela atenção, ajuda e disponibilização do uso do Laboratório de Técnicas Nucleares, em São Carlos. Agradeço também o Dr. Paulo Lasso pela grande ajuda durante as análises na Embrapa, pelas sugestões e atenção.

Ao Joel e Leal do Laboratório de Microscopia Eletrônica – LME da geologia (UFC), pela disponibilização do laboratório.

Aos meus amigos Júnior, Virgínia, Régis, Suza e Gleysdon por sempre confiarem em mim, pela amizade e por estarem comigo em todos os momentos me ajudando e apoiando sempre. Agradeço também aos meus amigos Elton, Deivielison, Viviane, Nellzenir e Carlinhos, pela atenção, amizade e momentos de descontração.

Aos amigos que fiz no departamento Tiago Costa, Nathiely, Izabel Maria, Isabel Cristina, Ronaldo, Bruna, Gabriel, Aldênia, Daniel Oliveira, Priscilla, Rafinha, Lilian Rafaelly, Rodrigo, Leônia, Leo e Camila pela amizade e palavras de conforto dirigidas a minha pessoa. Agradeço em especial aos meus amigos Dimitri e Hermano pela ajuda e apoio que tive durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas e amigos da salinha: Luís, Cillas, Rafinha, Arilene, Márcio, Edilaine, Juarez, Carlinha, Alcione, Thiago, Denise, Júlia, Kaio, Ademir, Nayara, Gleiciane e Vanessa pela convivência e momentos de descontração.

Aos funcionários do Departamento de solos, em especial, ao Franzé, Antônio José, Tavares, Geórgia, Edilson, Marilena, Deyse, Vilalba e Helena.

Aos meus filhos de quatro patas Snoopy, Lola e Bruce pela companhia, amor e alegria que trazem a minha casa.

Obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para a pessoa que sou hoje.

RESUMO GERAL

A gênese desses horizontes ainda é muito questionada, porém sabe-se que sua natureza é pedogenética, podendo estar associada a diferentes processos de ordem física e química. Dessa forma, objetivou-se com o presente trabalho identificar e relacionar os fatores físicos e agentes químicos que podem ser atuantes na gênese de horizontes com caráter coeso em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil. No capítulo I, foi realizada uma avaliação das mudanças físicas em solos com caráter coeso submetidos a ciclos de umedecimento e secagem por meio de análises micromorfológica e micromorfométrica e testes de resistência do solo à penetração. Foi avaliada também a influência do grau de seleção da fração areia no adensamento dos horizontes com caráter coeso. No capítulo II, buscou-se avaliar a contribuição dos compostos de Si e Al de baixa cristalinidade na gênese desses horizontes, para tanto foram realizadas análises físicas nos solos com caráter coeso na presença e na ausência desses compostos. Os dados obtidos no capítulo I demonstram que a gênese dos horizontes com caráter coeso está relacionada a um mecanismo de “empacotamento” das partículas, facilitado pelo baixo grau de seleção da areia nos horizontes coesos. Esse mecanismo ocorre naturalmente com os ciclos de umedecimento e secagem do solo, os quais, à medida que são incrementados, proporcionam uma redução significativa da porosidade do solo. Com essa redução na porosidade, o solo fica mais sujeito a uma “cimentação” química e ao entupimento dos poros com argila. O aumento na quantidade dos ciclos de umedecimento e secagem favoreceu também o processo de translocação e iluviação de argila em alguns solos, sugerindo assim, que a argila iluvial está relacionada à gênese dos solos com caráter coeso. No capítulo II, os acréscimos de silício e alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes com caráter coeso evidenciam que esses compostos contribuem conjuntamente na gênese destes horizontes, onde a sílica parece ter maior ação cimentante em relação ao alumínio. As amostras que passaram pelo processo de extração de sílica e alumínio de baixa cristalinidade apresentaram uma significativa melhoria física do solo, constatadas por meio de análises físicas e de imagem. Desse modo, ratifica-se a contribuição desses compostos no endurecimento dos solos coesos. Os dados do presente estudo reforçam que a gênese do horizonte coeso é multicausal e que a influência dos fatores físicos e agentes químicos no processo da coesão ocorrem de maneira conjunta.

Palavras-chave: Coesão. Análise de imagens. Ciclos de umedecimento e secagem. Compostos cimentantes.

GENERAL ABSTRACT

The genesis of horizons with cohesive character is still very questioned, but it is known that their nature is pedogenetic, and may be associated with different processes of physical and chemical order. Thus, the objective of the present work was to identify and relate the physical factors and chemical agents that may be active in the genesis of horizons with cohesive character in soils of the Coastal Trays of Northeast Brazil. In chapter I, an evaluation of the physical changes in cohesive soils submitted to wetting and drying cycles through micromorphological and micromorphometric analysis and soil resistance to penetration tests. It was also evaluated the influence of the degree of selection of the sand fraction in the densification of these horizons by means of a fractionation of this fraction to evaluate the granulometric distribution of the sands in the horizons with cohesive character. In Chapter II, the contribution of low-crystallinity Si and Al compounds was investigated in the genesis of these horizons. Physical analyzes were carried out in soils with a cohesive character in the presence and absence of these compounds. The data obtained in Chapter I show that the genesis of cohesive horizons is related to a particle “packing” mechanism, facilitated by the low degree of sand selection in cohesive horizons. This mechanism occurs naturally with soil wetting and drying cycles, which, as they are increased, provide a significant reduction in soil porosity. With this reduction in porosity, the soil is more subject to chemical “cementation” and clogging of the pores with clay. The increase in the amount of wetting and drying cycles also favored the process of translocation and deletion of clay in some soils, thus suggesting that the iluvial clay is related to the genesis of cohesive soils. In Chapter II, the additions of low crystallinity silicon and aluminum to the cohesive horizons show that these compounds contribute together in the genesis of these horizons, where silica seems to have a greater cementing action than aluminum. The samples that underwent the extraction process of silica and aluminum of low crystallinity showed a significant physical improvement of the soil, verified by physical and image analysis. Thus, the contribution of these compounds in the hardening of cohesive soils is ratified. The data from the present study reinforce that the cohesive horizon genesis is multicausal and that the influence of physical factors and chemical agents in the cohesion process occur together.

Keywords: Cohesion. Image analysis. Wetting and drying cycles. Cementing compounds

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
CAPÍTULO I - MICROMORFOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA O ESTUDO DA GÊNESE DE SOLOS COM CARÁTER COESO SUBMETIDOS A CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM.....	
15	15
1 INTRODUÇÃO	18
2 MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1 Seleção dos perfis e caracterização geral dos solos	21
2.2 Análise micromorfológica e análise micromorfométrica	22
2.3 Fracionamento da Areia	24
2.4 Resistência do solo à penetração e densidade do solo	24
2.5 Análise estatística	25
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
3.1 Análise micromorfológica	26
3.2 Distribuição da fração areia e resistência do solo à penetração	34
3.3 Análise Micromorfométrica	39
4 CONCLUSÕES	48
5 REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA SÍLICA E ALUMÍNIO DE BAIXA CRISTALINIDADE NO ADENSAMENTO E NO COMPORTAMENTO FÍSICO DE SOLOS COM CARÁTER COESO DOS TABULEIROS COSTEIROS DO BRASIL	
53	53
1 INTRODUÇÃO	57
2 MATERIAL E MÉTODOS	61
2.1 Seleção dos perfis e caracterização geral dos solos	61
2.2 Características gerais das áreas de estudo	63
2.3 Avaliação dos agentes químicos envolvidos na coesão	64

2.4 Ensaio experimental para avaliação do comportamento físico dos solos com caráter coeso após a extração de compostos de baixa cristalinidade (Si e Al “amorfo”)	65
2.5 Análise Estatística	68
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
3.1 Sílica e alumínio extraídos pelo oxalato de amônio	69
3.2 Resistência do solo à penetração e Densidade do solo	75
3.3 Porosidade do solo obtidas por meio de tomografia de raios -X	82
4 CONCLUSÕES	94
5 REFERÊNCIAS	95
CONCLUSÕES GERAIS	101

INTRODUÇÃO GERAL

O atributo coeso, é a designação atribuída pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos- SiBCS (EMBRAPA,2018) para distinguir solos com horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração da faca e muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Uma amostra úmida desse horizonte, quando submetida à compressão, deforma-se lentamente, ao contrário do fragipã, que apresenta quebradicidade (desintegração em fragmentos menores).

Os horizontes coesos são de textura média, argilosa ou muito argilosa e em condições naturais, são geralmente maciços ou com tendência a formação de blocos. O caráter coeso é comumente observado nos horizontes transicionais AB e/ou, BA, entre 30 cm e 70 cm da superfície do solo, podendo prolongar-se até o Bw ou coincidir com o Bt, no todo ou em parte. Estudos realizados por Lima *et al.* (2004) e corroborados por Vieira *et al.* (2012), mostram que os horizontes coesos encontrados no estado do Ceará, ocorrem geralmente em maiores profundidades, comumente associados ao horizonte Bt de Argissolos.

Solos com caráter coeso são comumente associados aos Tabuleiros Costeiros (LIMA *et al.*, 2004; MOREAU *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2008), que ocupam extensas áreas do litoral brasileiro, chegando à ordem de 200.000 km² (DANTAS *et al.*, 2014). Estas áreas apresentam elevadas densidades demográficas, bem como intensa atividade agrícola (SOUZA *et al.*, 2008). Na região Nordeste, a fruticultura é uma das principais atividades agrícolas praticadas nos solos dos Tabuleiros, contribuindo de forma significativa na economia regional e nacional. Entretanto, os solos desta região podem apresentar sérias limitações físicas devido à presença do caráter coeso.

A origem dos horizontes coesos não está bem esclarecida, podendo estar associada a diferentes processos, tais como: de iluviação de argila, pontes interpartículas, adensamento pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem, cimentação temporária por compostos de baixa cristalinidade e má seleção da fração areia (MOREAU *et al.*, 2006; LIMA NETO *et al.*, 2009; GIAROLA *et al.*,2002; VIEIRA *et al.*, 2012; BEZERRA *et al.*, 2015).

Embora estudos realizados em solos dos Tabuleiros Costeiros da Bahia (MOREAU 2001; CORREA *et al.*, 2008) indiquem que os compostos sílico-aluminosos não são atuantes na gênese do caráter coeso, Vieira *et al.* (2012) ,estudando a influência

de compostos de Si e Al de baixa cristalinidade (compostos amorfos) na gênese de horizontes coesos no estado do Ceará, observaram que após a extração desses compostos, os horizontes com caráter coeso mostraram uma significativa redução da resistência à penetração (RP) e na densidade, indicando que a sílica e alumínio pouco cristalinos podem estar atuando como agente cimentante nesses horizontes.

Anjos (1985) propôs que os horizontes adensados dos horizontes AB e/ou BA de Latossolos e Argissolos Amarelos dos Tabuleiros Costeiros do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia, são herança do próprio sedimento que os originou. A razão do endurecimento seria a compressão causada pelo estático da camada superior. Para Silva (2002), o adensamento observado em solos dos Tabuleiros pode ser derivado de processos geológicos (sedimentológicos) e/ou pedogenéticos. No entanto, pouco se sabe sobre o ambiente de deposição dos sedimentos da Formação Barreiras da costa brasileira (Arai et al., 1988). Com isso, estudos têm sido intensificados e contribuíram para o entendimento dos diversos processos e ambientes sedimentares, mas muito ainda deve ser feito para identificar e caracterizar estas variações (BEZERRA, 2009).

Duarte (2015) e Bezerra *et al.* (2015), ao estudarem a gênese de solos com caráter coeso do Estado do Ceará, afirmaram que a formação de horizontes coesos pode estar relacionada a atributos físicos dos solos, como a má seleção da areia, que permite um melhor arranjo dessas partículas tornando o perfil mais adensado e sujeito a cimentação. Ainda no aspecto físico, outro possível processo responsável pela gênese dos horizontes coesos seria a alternância de ciclos de umedecimento e secagem, resultando alteração da estrutura do solo (GIAROLA e SILVA, 2002; VIEIRA, 2013).

Apesar dos recentes estudos visando entender a origem dos solos com caráter coeso, muitos aspectos envolvendo a gênese desse caráter ainda não foram completamente esclarecidos. A determinação dos possíveis agentes causadores da coesão dos solos é muito importante, uma vez que o conhecimento mais detalhado das características e dos processos de formação desses horizontes pode contribuir na definição de práticas de manejo mais adequadas para exploração desses solos, uma vez que os solos de Tabuleiros Costeiros são bastante utilizados para a produção agrícola, principalmente no Nordeste brasileiro.

Diante disso, este trabalho pretende testar as seguintes hipóteses: (1) O adensamento em solos com caráter coeso é influenciado pelo grau de seleção das areias (partículas grosseiras) (2) Ciclos de umedecimento e secagem facilitam o processo de adensamento dos solos com caráter coeso. (3) Nos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros,

os compostos de baixa cristalinidade (principalmente sílica e alumínio) contribuem na gênese do caráter coeso. Desse modo, objetivou-se com esta pesquisa identificar e relacionar fatores físicos e agentes químicos que podem ser atuantes na gênese de horizontes com caráter coeso em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil.

**CAPÍTULO I - MICROMORFOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA O
ESTUDO DA GÊNESE DE SOLOS COM CARÁTER COESO SUBMETIDOS A
CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM**

RESUMO

A gênese de solos com horizontes coesos tem sido estudada por vários pesquisadores, contudo, ainda não se atribui um fator dominante sobre a gênese desses horizontes. Diante disso, aventou-se a hipótese que o adensamento em solos com caráter coeso é influenciado pelo baixo grau de seleção das areias (partículas grosseiras), bem como por processos físicos relacionados aos ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, objetivou-se com este trabalho, avaliar as mudanças físicas em solos com caráter coeso submetidos a ciclos de umedecimento e secagem por meio de análises micromorfológica e micromorfométrica e testes de resistência do solo à penetração. Objetivou-se também, analisar a influência do grau de seleção da areia no adensamento de horizontes com caráter coeso. No presente estudo, foram utilizadas amostras de solos com caráter coeso (amostras de TFSA) de quatro perfis de solo dos Tabuleiros Costeiros, localizados nos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará. Para avaliar a influência dos ciclos de umedecimento e secagem no adensamento do solo, foram aplicados três tratamentos, correspondendo a diferentes quantidades de ciclos de umedecimento e secagem (6, 9, 12 ciclos). Após esses ciclos, as amostras foram submetidas às análises micromorfológica e micromorfométrica. A resistência do solo à penetração e densidade também foram determinadas nas amostras dos três tratamentos. Os dados do presente estudo demonstram que a gênese dos horizontes com caráter coeso está relacionada a um mecanismo de “empacotamento” das partículas, facilitado pelo baixo grau de seleção da fração areia nos horizontes estudados. Esse mecanismo ocorre naturalmente com os ciclos de umedecimento e secagem do solo, os quais, à medida que são incrementados, proporcionam uma redução significativa da porosidade do solo. O aumento na quantidade dos ciclos de umedecimento e secagem também favoreceu o processo de translocação e iluviação de argila, provocando o entupimento dos poros, e, conseqüentemente, um aumento na coesão do solo. A presença de feições de iluviação de argila em dois dos perfis estudados (P2 e P4), sugerem que a argila iluvial está relacionada à gênese dos solos com caráter coeso. A ausência de feições de iluviação de argila no material de dois perfis (P1 e P3) indicam que, nesses solos, elementos químicos, como o silício e alumínio, podem ser mais atuantes na gênese do caráter coeso, em detrimento aos fatores físicos.

Palavras-chave: Pedogênese. Argiluviação. Fração areia.

ABSTRACT

The genesis of soils with cohesive horizon has been studied by many researchers, however, have not attributed a dominant factor on the genesis of these horizons. Therefore, it was hypothesized that the densification in cohesive soils is influenced by the degree of selection of the sands (coarse particles), as well as by physical processes related to the wetting and drying cycles. Therefore, the objective of this work was to evaluate the physical changes in cohesive soils submitted to wetting and drying cycles by micromorphological and micromorphometric analysis and soil penetration resistance tests. The objective was also to analyze the influence of the degree of sand selection on the thickening of cohesive horizons. In the present study we used cohesive soil samples (TFSA samples) from four soil profiles of Coastal Tablelands, located in the states of Bahia, Pernambuco and Ceará. To evaluate the influence of the moistening and drying cycles on soil densification, three treatments were applied, corresponding to different amounts of moistening and drying cycles (6, 9, 12 cycles). After these cycles, the samples were submitted to micromorphological and micromorphometric analyzes. Soil penetration resistance and density were also determined in the samples of the three treatments. The genesis of the horizons with cohesive character is related to a mechanism of "packing" of the particles, facilitated by the low degree of selection of the sand fraction in the studied horizons. This mechanism occurs naturally with soil wetting and drying cycles, which, as they are increased, provide a significant reduction in soil porosity. The increase in the amount of moistening and drying cycles also favored the process of translocation and iluviation of clay, causing obstruction of the pores and, consequently, an increase in soil cohesion. The presence of clay iluviation pedofeatures in two of the studied profiles (P2 and P4) suggests that iluvial clay is related to the genesis of cohesive soils. The absence of clay iluviation pedofeatures in the two-profile material (P1 and P3) indicates that in these soils, chemical elements such as silicon and aluminum may be more active in the genesis of cohesive character, to the detriment of physical factors.

Keywords: Pedogenesis. Argilluviation. Sand Fraction.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS, os horizontes com caráter coeso são definidos como horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração da faca e muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Estes horizontes podem apresentar uma estrutura maciça com tendência a formação de blocos (EMBRAPA, 2018).

A formação dos horizontes com caráter coeso não está completamente esclarecida, contudo, sabe-se que esse adensamento tem origem pedogenética, podendo estar associado a múltiplos fatores de ordem química e física inter-relacionados pedogenética (RIBEIRO, 2001). A gênese dos solos com caráter coeso pode estar relacionada à obstrução dos poros por argila iluvial (CORRÊA *et al.*, 2008;) e, ainda, presença de areia pobremente selecionada (BEZERRA *et al.*, 2015), presença de compostos de baixa cristalinidade (VIEIRA *et al.*, 2012), acúmulo de sílica secundária e adensamento por dessecação resultante da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclo de umedecimento e secagem (RIBEIRO, 2001). Esta última hipótese se baseia no pressuposto de que, durante o período seco, os agentes cimentantes seriam desidratados e a matriz argilosa consolidada a ponto de promover o adensamento, e que, durante o período úmido, os agregados seriam destruídos devido ao aumento da pressão de ar no seu interior.

Ciclos de umedecimento e secagem (U-S) representam um exemplo de processo natural que pode causar modificações da estrutura do solo, uma vez que eles afetam a distribuição das partículas e, conseqüentemente, dos poros do solo (PIRES e BACHI, 2010). O processo de umedecimento e secagem, em geral, resulta em pequenas alterações no volume total da amostra causadas por estresses em razão de interfaces água-ar, originadas de forças capilares, as quais aumentam com a drenagem do solo. Como conseqüência, após cada processo de reumedecimento, a estrutura do solo sofrerá novas modificações, e atingirá um novo estado de energia, o qual é provavelmente diferente do estado anterior, ocorrido antes do primeiro ciclo de umedecimento e secagem (BAUMGARTL e KÖCK, 2004)

Essa nova estrutura do solo não consegue retornar ao estado de energia original, com reflexos e mudanças no sistema poroso do solo (BRESSON e MORAN, 2003). Oliveira (1992) e Oliveira (1994)) avaliaram a estabilidade de agregados

submetidos a ciclos de umedecimento e secagem e relataram a fragmentação dos agregados expostos a estes ciclos com modificações sem suas propriedades, atribuídas à exposição de matéria orgânica e cátions de seu interior.

Pesquisas envolvendo o estudo dos processos atuantes no endurecimento natural de horizontes mostram que a condição hidráulica do ambiente é considerada um fator determinante no desenvolvimento da cimentação (LAMOTTE *et al.*, 1997). Para estes pesquisadores, a presença de lençol freático na fase úmida seguida de grande processo de secagem na estação seca, pode causar condições favoráveis para a dispersão das argilas e posterior formação de pontes de argila.

Vieira (2013) estudando a influência de ciclos de dureza do solo (quando seco) observada em horizontes cimentados (*fragipãs*), pode resultar no adensamento provocado por pontes de argila com o material grosseiro. O desenvolvimento de revestimentos e pontes de argila ao redor do material grosseiro, aumentam significativamente com o aumento da frequência de ciclos de umedecimento e secagem (ATTOU; BRUAND, 1998; SINGER *et al.*, 1992). De acordo com os mesmos autores, os ciclos causam a dispersão (umedecimento) e reorganização de partículas de argila no solo (secagem). umedecimento e secagem no adensamento de solos com caráter coeso, relatou que o aumento na quantidade de ciclos de U-S pode ter originado revestimentos e pontes de argila ao redor do material grosseiro, o que aumentaria a resistência à penetração e densidade do solo do solo e, conseqüentemente, a coesão.

Em solos *hardsetting* (similares aos coesos), a gênese está relacionada com o umedecimento e secagem cíclicos do solo, contudo, a cimentação também pode ocorrer como resultado da liberação de sílica solúvel durante o umedecimento e reprecipitação com o solo seco (CHARTRES e NORTON, 1994).

Outro fator parece contribuir para gênese de horizontes com caráter coeso é a presença do maior teor de areia fina e mal selecionada encontrada nesses horizontes (ABRAHÃO *et al.*, 1998). Isso facilitaria o arrançamento das partículas tornando-as mais compactadas em horizontes subsuperficiais. Corroborando esta hipótese, Bezerra *et al.* (2015) constataram que a gênese dos horizontes coesos está relacionada com a presença de material grosseiro mal selecionado, o que acarretaria em uma redução significativa no volume de poros, visto que os grãos menores de material grosseiro são acomodados nos espaços entre os grãos maiores, juntamente com o material fino, preenchendo os poros antes existentes.

Segundo Giarola e Silva (2002) a presença de material mal selecionado presentes nos horizontes coesos, composto por duas ou mais classes granulométricas resulta em empacotamento mais fechado que, juntamente com o acúmulo de materiais mais finos, acarreta redução significativa no volume de macroporos e incrementa o volume de microporos, fato que restringe a permeabilidade à água e ao ar e favorece a precipitação de agentes cimentantes temporários que facilitam a coesão.

Para Souza (1996) a menor quantidade da fração da areia total associada ao elevado teor de argila pode vir a colaborar para o surgimento do caráter coeso em algumas áreas. Em estudo mais recente, Corrêa *et al.* (2008) atribuíram a maior coesão dos horizontes ao maior conteúdo de argila muito fina translocada, dentro ou entre os horizontes, na forma de argila dispersa.

Diante do exposto, aventou-se a hipótese que o adensamento em solos com caráter coeso é influenciado pelo baixo grau de seleção das areias (partículas grosseiras), bem como por processos físicos relacionados aos ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, objetivou-se com este trabalho, avaliar as mudanças físicas em solos com caráter coeso submetidos a ciclos de umedecimento e secagem por meio de análises micromorfológica e micromorfométrica e testes de resistência do solo à penetração. Objetivou-se também, analisar a influência do grau de seleção da areia no adensamento de horizontes com caráter coeso, por meio de um fracionamento dessa fração nesses horizontes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção dos perfis e caracterização geral dos solos

O trabalho foi desenvolvido com amostras de solos de diferentes áreas dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil, utilizando-se solos desenvolvidos dos sedimentos da Formação Barreiras, onde as características típicas do caráter coeso foram previamente identificadas (Tabelas 1 e 2); (Figura 1). Para o presente estudo, foram coletadas amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) dos horizontes com caráter coeso de cada perfil de solo selecionado.

Tabela 1- Informações sobre os perfis dos solos com horizontes com caráter coeso

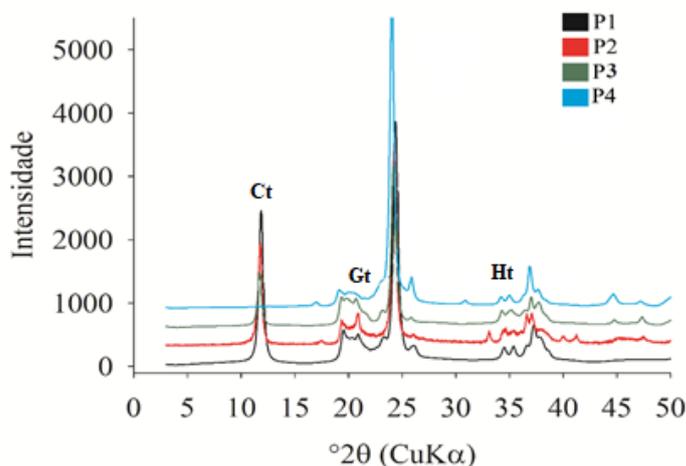
PERFIL	ESTADO	LOCAL	CLIMA*	AUTOR	CLASSE DE SOLO	HORIZ COESO/ PROF
Perfil 1	Ceará	Aquiraz	Aw -Tropical quente sub- úmido	Menezes, 2016	ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico típico	Bt1: 81-129 cm
Perfil 2	Bahia	Cruz das Almas	Af -Tropical úmido	Souza, 2002	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico	BA: 42-60 cm
Perfil 3	Pernambuco	Goiana	Aw -Tropical quente sub- úmido	Andrade, 2014	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirredóxico	Bt1 : 48-70 cm
Perfil 4	Ceará	Trairi	BSw'h'- Tropical quente semiárido brando	Vieira et al. 2012	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abruptico	Bt1: 142-170 cm

* Segundo a Classificação de Koppen

Tabela 2- Atributos físicos e químicos dos horizontes com caráter coeso selecionados

PERFIL	ATRIBUTOS FÍSICOS				ARIBUTOS QUÍMICOS				
	Areia	Silte	Argila	Argila dispersa em água	Classe Textural	Densidade do solo	pH em água	CTC	V
	-----g Kg ⁻¹ -----					(g cm ⁻³)		(cmol _c kg ⁻¹)	(%)
Perfil 1	656	91	253	6	Franco argilo arenosa	1,74	5,2	2,9	45,6
Perfil 2	644	71	285	45	Franco argilo arenosa	1,70	4,1	5,9	23,4
Perfil 3	650	27	323	15	Franco argilo arenosa	1,68	4,9	4,7	17,7
Perfil 4	794	76	130	20	Franco arenosa	1,73	5,0	3,2	54,0

Figura 1- Espectros de difratometria de raios x da fração argila natural dos solos estudados. Ct: caulinita; Gt: goethita; Ht: Hematita.



2.2 Análise micromorfológica e análise micromorfométrica

Para avaliar as mudanças físicas nos solos com caráter coeso submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, foi montado um experimento em laboratório, no qual foram utilizadas amostras de TFSA dos perfis selecionados para o estudo. As amostras dos horizontes com caráter coeso foram submetidas a três tratamentos com diferentes números de ciclos de umedecimento e secagem (Tabela 3). O tratamento 1 (T1), consistiu na aplicação de 6 ciclos de umedecimento e secagem. O tratamento 2 (T2), consistiu na aplicação de 9 ciclos de umedecimento e secagem e, por fim, no tratamento 3 (T3) foram aplicados 12 ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, os materiais dos três tratamentos foram colocados em tubos de PVC com 7 cm de altura e 5 cm de diâmetro,

com tecido em uma das extremidades para evitar a perda de solo. Em seguida, os tubos com as amostras foram colocados em bandejas e foram submetidos aos ciclos umedecimento e secagem.

Tabela 3- Siglas dos tratamentos

PERFIL	TRATAMENTOS		
	6 CICLOS	9 CICLOS	12 CICLOS
P1 - Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico	P1T1	P1T2	P1T3
P2 - Argissolo Amarelo Distrocoeso típico	P2T1	P2T2	P2T3
P3 - Argissolo Amarelo Distrocoeso epirodóxico	P3T1	P3T2	P3T3
P4 - Argissolo Acinzentado Eutrófico abruptico	P4T1	P4T2	P4T3

Para o umedecimento foi adicionada água destilada na base da bandeja, a fim de saturar a amostra via ascensão capilar, durante 24 horas. Após o umedecimento (até a porção superficial), o excesso de água da bandeja foi descartado e o material foi seco em estufa (45°C) durante 48 horas para, posteriormente, se realizar um novo ciclo de umedecimento (VIEIRA *et al.*, 2012). Depois dos últimos ciclos 6°, 9° e 12°, o material foi mantido em casa de vegetação para secagem ao ar durante 5 dias. Aplicados os diferentes tratamentos, as amostras foram levadas para estufa a 40 °C por 48h. Posteriormente, os solos foram impregnados com resina de poliéster, não saturada (Polydyne 5061 - Cristal) misturada com monômero de estireno (para a redução da viscosidade da resina), adicionada a um pigmento fluorescente (Ciba-Geigy Uvitex OB -), que permite a distinção dos poros sob luz polarizada.

Após o endurecimento da resina, foi efetuado o corte das amostras com o auxílio de uma máquina de corte. As lâminas delgadas foram preparadas a partir de cortes efetuados verticalmente no setor mediano dos canos de PVC e o polimento realizado manualmente. Para a descrição micromorfológica das lâminas delgadas, foram adotados os critérios propostos por Brewer (1976), Stoops e Jongerius (1975) e Bullock *et al.* (1985). Fotomicrografias foram captadas com o auxílio de uma lupa com câmera acoplada a um microscópio petrográfico. As Imagens digitalizadas foram adquiridas a partir das lâminas delgadas utilizando uma câmera CCD. As imagens foram processadas utilizando o programa Visilog 5.4 (Noesis). A quantificação da área ocupada por poros nas lâminas delgadas foi obtida por meio de análise de imagens, utilizando o programa Visilog 5.4 (Noesis).

A porosidade total foi calculada considerando a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total da imagem, em porcentagem. A classificação e a quantidade dos poros foram determinadas seguindo os critérios definidos por Cooper e Vidal-Torrado (2005). Os poros foram divididos em três grupos, de acordo com sua forma: arredondados, alongados e complexos. Para isso, foram calculados dois índices conforme sugestão de Juhász (2006) e Souza *et al.* (2006).

2.3 Fracionamento da Areia

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando como dispersante químico o Hexametáfosfato de sódio e agitação rápida durante 10 minutos (EMBRAPA, 1997). Após a separação da fração areia dos horizontes com caráter coeso (separação realizada por meio da análise granulométrica), as amostras foram secas e pesadas para obtenção do teor de areia total, e posteriormente fracionadas em cinco tamanhos, utilizando-se um jogo de peneiras com 12,5 cm de diâmetro contendo as peneira com malha de 1,00 mm (areia muito grossa), 0,50 mm (areia grossa), 0,25 mm (areia média), 0,106 mm (areia fina) e 0,053 (areia muito fina) (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008). A partir dos resultados do fracionamento da areia os diferentes diâmetros de partícula definidos de acordo com a escala de Atterberg (mm) foram transformados para a escala phi (ϕ), cuja unidade é determinada pela seguinte equação: $\phi = [-\log_2 D \text{ (mm)}]$ em que D é o diâmetro do grão (mm) (KRUMBEIN, 1934). Assim a conversão ficará da seguinte forma: $\phi = -1$ a 0 (areia muito grossa), $\phi = 0$ a 1 (areia grossa), $\phi = 1$ a 2 (areia média), $\phi = 2$ a 3,32 (areia fina), $\phi = 3,32$ a 4,24 (areia muito fina).

2.4 Resistência do solo à penetração e Densidade

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada nas amostras dos três tratamentos (T1, T2, T3). Para cada tratamento, foram realizadas 4 repetições por amostra. Para tanto, os materiais foram colocados em tubos de PVC de 5 cm de altura e 2 cm de diâmetro e, conforme citado no item anterior, e, posteriormente, foram submetidos aos diferentes tratamentos.

Depois dos últimos ciclos (6°, 9° e 12°) foi aplicada uma tensão de 5 atm, visando controle da umidade nas amostras (VIEIRA *et al.*, 2012). Após esse processo, a resistência à penetração foi determinada nas amostras utilizando-se penetrômetro

eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m.min}^{-1}$, equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998). Após a determinação da resistência do solo à penetração, a densidade do solo foi determinada nas amostras pela metodologia descrita em Blake e Hartge (1986).

2.5 Análise estatística

Os valores obtidos no fracionamento das areias foram tratados estatisticamente de acordo com os critérios de Folk e Ward (1957). Os dados de ϕ foram analisados estatisticamente pelo programa de microcomputador para análise estatística da granulometria (PHI; JONG VAN LIER; VIDAL-TORRADO, 1992), o qual calcula diferentes parâmetros estatísticos (frequência relativa; frequência acumulada, média, e desvio padrão) de acordo Folk e Ward (1957). Na sequência foram elaborados histogramas com as frações percentuais de cada classe granulométrica da fração areia com o objetivo de se avaliar a distribuição granulométrica das areias nos horizontes coesos. O grau de seleção das areias em cada um destes horizontes foi obtido através do desvio padrão (σ) dos valores de ϕ com base nos seguintes intervalos: muito bem selecionado ($\sigma < 0,35$), bem selecionado ($0,35 < \sigma < 0,50$), moderadamente selecionado ($0,50 < \sigma < 1,00$), pobremente selecionado ($1,00 < \sigma < 2,00$), muito pobremente selecionado ($2,00 \leq \sigma < 4,00$) e extremamente mal selecionado ($\sigma > 4,00$).

O delineamento experimental utilizado no experimento foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4×3 , com quatro repetições. O primeiro fator corresponde aos diferentes tipos de solos (Perfis). O segundo fator corresponde aos diferentes níveis de ciclos de U-S (tratamentos). Visando uma comparação entre os tratamentos, os dados de resistência do solo à penetração, densidade e da porosidade das lâminas da análise de imagens foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e posteriormente, quando significativos, submetidos ao teste de comparação de médias de Tukey (5%) utilizando software ASSISTAT versão 7.7 beta (pt)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise micromorfológica

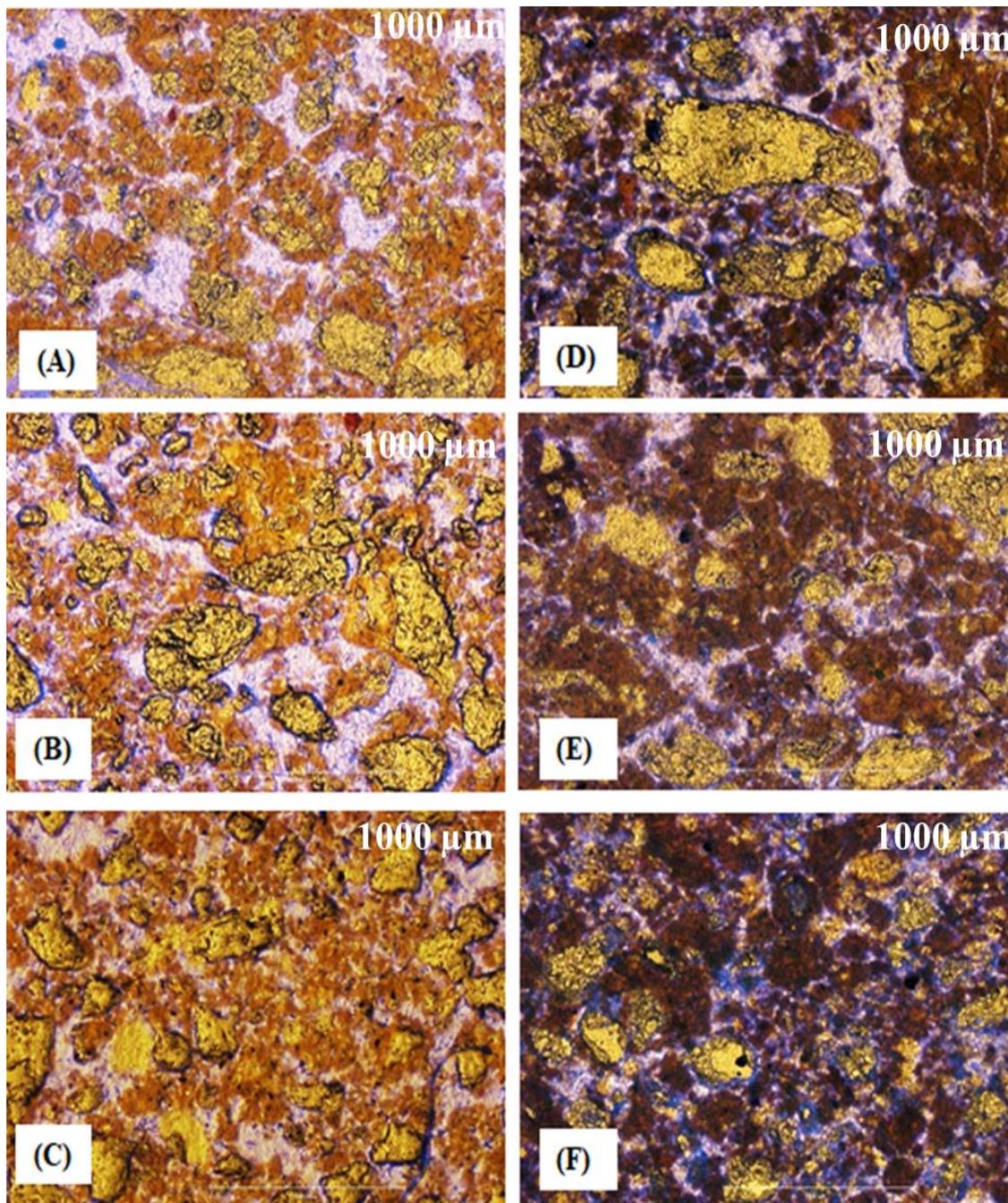
Observou-se nas amostras, de todos os horizontes estudados, uma microestrutura modificada* do tipo microgranular adensada após 6 ciclos de umedecimento e secagem (U-S), com algumas áreas bem porosas nas lâminas, apresentando uma distribuição relativa (STOOPS; JONGERIUS, 1975) do tipo enáulica-porfírica (mais porosa) (Figuras 2A, 2D, 3A, 3D). Nos tratamentos com mais ciclos (T2 e T3), a distribuição relativa foi do tipo pórfiro-enáulica (menos porosa) (Figuras 2B a 2F, 3B a 3F). O perfil P4 apresentou uma distribuição relativa distinta dos demais perfis, nesse solo foi observada uma distribuição relativa do tipo pórfiro-enáulica-quitônica, na qual observa-se o material grosseiro (quartzo) envolvido por películas de argila; e algumas áreas, essas películas unem os grãos (Figura 4A).

Nos tratamentos T2 (9 ciclos) e T3 (12 ciclos), a microestrutura modificada originada foi do tipo microgranular muito coalescida, havendo, porém, alguns blocos subangulares com pedalidade moderada (Tabelas 4 e 5). Essa transformação na estrutura (microgranular → blocos) parece ter sido originada do coalescimento dos microgrânulos após os sucessivos ciclos de U-S.

O mecanismo que explicaria a ocorrência deste processo de adensamento pela coalescência de microagregados seria as mudanças energéticas que ocorrem no solo devido aos ciclos alternados de umedecimento e secagem (COOPER, 1999). A atração entre os agregados durante o processo de secagem pode ser explicada pelo surgimento de forças de atração relacionados ao filme capilar existente entre as partículas (VIANA *et al.*, 2004). No material saturado, o espaço entre os agregados encontra-se completamente preenchido por água e a força de atração é zero. Com a perda de água, ocorre a formação do menisco com raio negativo, que causa o surgimento de uma força capilar de atração (SCHUKIN *et al.*, 1988). A diminuição e transformação da porosidade (empilhamento → policôncava) (Figuras 2 e 3), evidencia uma reorganização das partículas de argila e uma maior aglomeração dos microagregados.

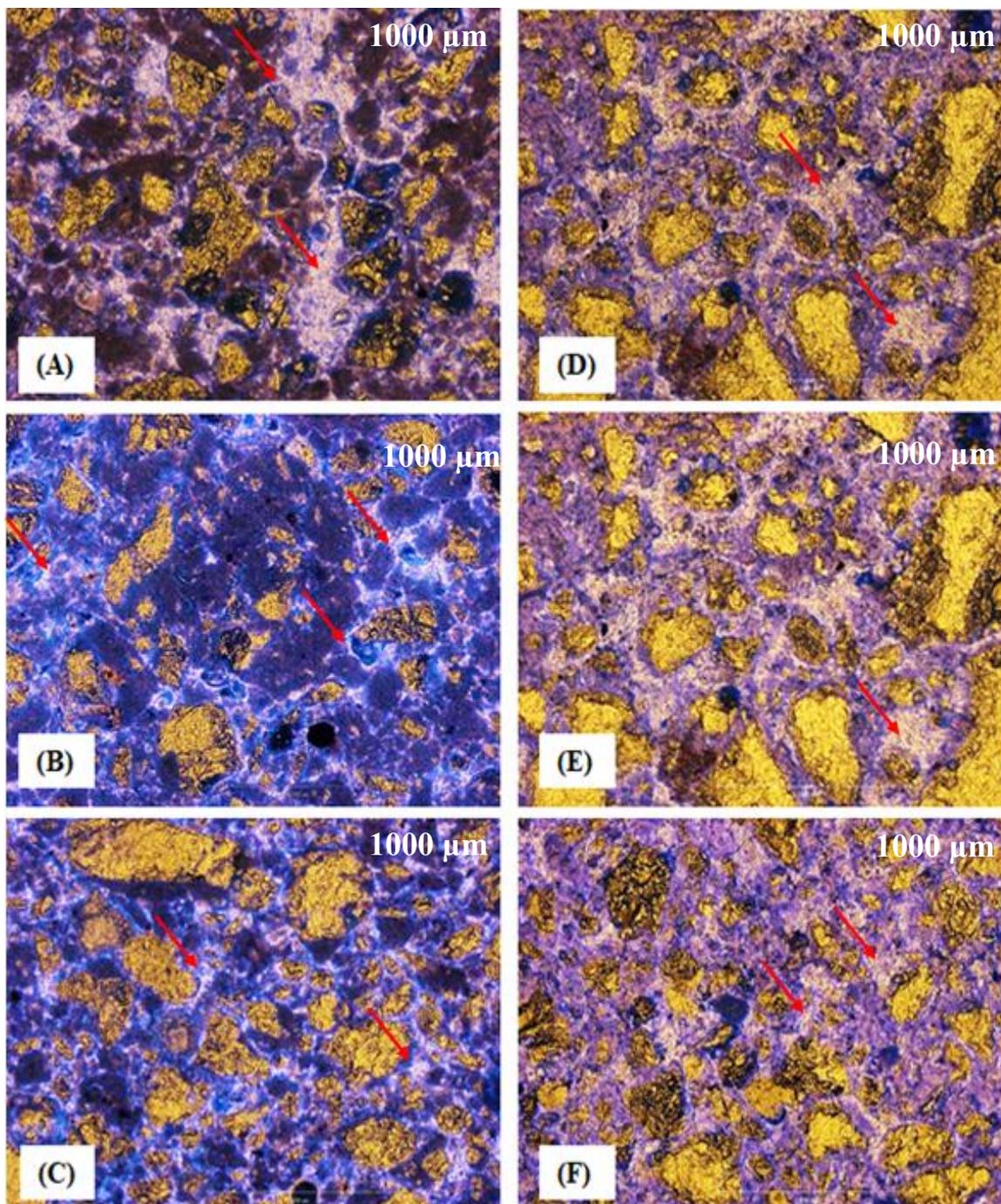
*Microestrutura Modificada pois trata-se de uma estrutura desenvolvida após os ciclos de U-S

Figura 2- Fotomicrografias de lâminas dos perfis P1 e P2, obtidas sob luz ultravioleta. Perfil P1 submetido aos tratamentos: (A) P1T1 - 6 ciclos, (B) P1T2 - 9 ciclos e (C) P1T3 - 12 ciclos. Perfil P2 submetido aos tratamentos: (D) P2T1 - 6 ciclos, (E) P2T2 - 9 ciclos e (F) P2T3 - 12 ciclos.



A porosidade aparece em rosa, o quartzo em amarelo e o plasma (argila) na cor brunada/ marrom.

Figura 3 - Fotomicrografias de lâminas dos perfis P3 e P4, obtidas sob luz ultravioleta. Perfil P3 submetido aos tratamentos: (A) P3T1 - 6 ciclos, (B) P3T2 - 9 ciclos e (C) P3T3 - 12 ciclos. Perfil P4 submetido aos tratamentos: (D) P4T1 - 6 ciclos, (E) P4T2 - 9 ciclos e (F) P4T3 - 12 ciclos.



A porosidade aparece em rosa, o quartzo em amarelo e o plasma (argila) na cor brunada no perfil P3 e lilás (ao redor dos grãos de quartzo) no perfil P4. As setas indicam alguns poros.

Tabela 4- Características micromorfológicas dos perfis P1 e P2

PERFIL 1 - ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico típico			
ATRIBUTOS GERAIS	TRATAMENTOS		
	6 ciclos - PIT1	9 ciclos - PIT2	12 ciclos - PIT3
MATERIAL GROSSO (%)	30	30	30
MATERIAL FINO(%)	50	40	55
ESQUELETO	Quartzo subangular, subarredondado mal selecionado	Quartzo subangular, subarredondado mal selecionado	Quartzo subangular, subarredondado mal selecionado
MICROESTRUTURA MODIFICADA	Microgranular adensada com grau de pedalidade moderada	Microgranular adensada com grau de pedalidade forte; microgranular coalescida com grau de pedalidade moderada; Blocos subangulares com pedalidade moderada	Microgranular coalescida com grau de pedalidade moderado; Blocos subangulares (muito pequenos, quase de tamanho granular) com grau de pedalidade moderado
POROS(%)*	20	30	15
TIPOS DE POROS	Empilhamento simples (dominante); Cavidades policôncavas irregulares;	Empilhamento complexo (dominante); cavidades policôncavas irregulares	Cavidades policôncavas (dominante); Empilhamento complexo fechado; Canais
DISTRIBUIÇÃO RELATIVA	Pórfiro-enáulica	Enáulica - porfírica na zona dos blocos; Enáulica na zona microgranular	Pórfiro-enáulica
FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	Preenchimento de argila em poro com frequência ocasional	Preenchimento de argila em poro pouco frequente ; Revestimento de argila em poro pouco frequente	Preenchimento de argila em poro pouco frequente ; Revestimento de argila em poro pouco frequente
FÁBRICAS BIRREFRINGENTES	Salpicada: Ao acaso; Estriada: reticulada, paralelo estriada, granoestriada pouco frequente e grau de desenvolvimento fraco a moderado	Salpicada: Ao acaso, granoestriada, poroestriada; Estriada: Reticulada, paralelo estriada com frequência moderada a abundante e grau de desenvolvimento moderado	Salpicada: Granida, em mosaico, ao acaso, granoestriada, poroestriada com frequência abundante e grau de desenvolvimento moderado a forte

PERFIL 2 - ARGISSOLO AMARELO Distrocioso típico			
ATRIBUTOS GERAIS	TRATAMENTOS		
	6 ciclos - P2T1	9 ciclos - P2T2	12 ciclos - P2T3
MATERIAL GROSSO (%)	30	30	30
MATERIAL FINO(%)	40	50	60
ESQUELETO	Quartzo arredondado, subarredondado, subangular mal selecionado	Quartzo arredondado, subarredondado, subangular mal selecionado	Quartzo arredondado, subarredondado, subangular mal selecionado
MICROESTRUTURA MODIFICADA	Microgranular com grau de pedalidade moderado a forte	Microgranular coalescida adensada com grau de pedalidade moderada; blocos subangulares com grau de pedalidade moderado	Microgranular adensada com grau de pedalidade moderado; granular com pedalidade moderada; blocos subangulares com grau de pedalidade moderado
POROS(%)*	30	20	10
TIPOS DE POROS	Empilhamento (dominante); Cavidades policôncavas irregulares	Cavidades policôncavas (dominante); Empilhamento complexo	Cavidades policôncavas (dominante); Empilhamento complexo fechado; Canais
DISTRIBUIÇÃO RELATIVA	Enáulica-porfírica	Pórfiro-enáulica	Pórfiro-enáulica
FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	Preenchimento de argila em poro com frequência ocasional; Revestimento de argila com segregação de ferro com frequência ocasional e orientação forte e contínua	Preenchimento de argila em poro com frequência comum a abundante; Revestimento de argila com segregação de ferro com frequência abundante e orientação forte e contínua	Preenchimento de argila em poro com frequência abundante; Revestimento de argila com segregação de ferro com frequência abundante e orientação forte e contínua
FÁBRICAS BIRREFRINGENTES	Salpicada: Ao acaso, granida ; Estriada: Paralelo estriada, poroestriada, granoestriada com frequência comum e grau de desenvolvimento fraco a moderado	Salpicada: Ao acaso, granoestriada, poroestriada; Estriada: Reticulada, paralelo estriada com frequência abundante e grau de desenvolvimento moderado a forte	Salpicada: Ao acaso, granoestriada; Estriada: Reticulada, paralelo estriada com frequência abundante e grau de desenvolvimento moderado

* Porcentagem de poros estimada na descrição visual da lâmina e não pela análise de imagens

Tabela 5 – Características micromorfológicas dos perfis P3 e P4

PERFIL 3 - ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirodóxico			
ATRIBUTOS GERAIS	TRATAMENTOS		
	6 ciclos - P3T1	9 ciclos - P3T2	12 ciclos - P3T3
MATERIAL GROSSO (%)	40	40	40
MATERIAL FINO(%)	30	40	45
ESQUELETO	Quartzo angular, subangular mal selecionado; Feldspato	Quartzo angular, subangular mal selecionado; Feldspato	Quartzo angular, subangular mal selecionado; Feldspato
MICROESTRUTURA MODIFICADA	Microgranular fracamente coalescida com grau de pedalidade moderada; blocos subangulares com grau de pedalidade fraco	Microgranular moderadamente coalescida a com grau de pedalidade moderada forte com subestrutura em blocos subangulares com grau de pedalidade fraco	Microgranular fortemente coalescida com grau de pedalidade moderado com subestrutura em blocos subangulares com grau de pedalidade fraco a moderado
POROS(%)*	30	20	15
TIPOS DE POROS	Empilhamento simples (dominante); Cavidades policôncavas irregulares	Cavidades policôncavas irregulares	Cavidades policôncavas irregulares (dominante); Empilhamento complexo
DISTRIBUIÇÃO RELATIVA	Enáulica-porfírica	Pórfiro-enáulica	Pórfiro-enáulica
FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	-	-	-
FÁBRICAS BIRREFRINGENTES	Salpicada: Ao acaso, granida; Estriada: Paralelo estriada, granoestriada pouco frequente e grau de desenvolvimento fraco	Salpicada: Ao acaso, granida; Estriada: Paralelo estriada, granoestriada pouco frequente com grau de desenvolvimento fraco	Salpicada: Ao acaso, granida; Estriada: Paralelo estriada, granoestriada com frequência comum e com grau de desenvolvimento fraco

PERFIL 4 - ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico típico			
ATRIBUTOS GERAIS	TRATAMENTOS		
	6 ciclos - P4T1	9 ciclos - P4T2	12 ciclos - P4T3
MATERIAL GROSSO (%)	50	50	50
MATERIAL FINO(%)	30	35	60
ESQUELETO	Quartzo angular, subangular mal selecionado;	Quartzo angular, subangular mal selecionado;	Quartzo angular, subangular mal selecionado;
MICROESTRUTURA MODIFICADA	Microgranular adensada com grau de pedalidade moderada; Granular adensada com pedalidade moderada	Microgranular adensada coalescida com grau de pedalidade moderada	Microgranular coalescida com grau de pedalidade moderado; Blocos subangulares (muito pequenos, quase de tamanho granular) com grau de pedalidade moderado
POROS(%)*	20	15	10
TIPOS DE POROS	Cavidades policôncavas (dominante) ; Empilhamento simples	Cavidades policôncavas (dominante); Empilhamento complexo	Cavidades policôncavas
DISTRIBUIÇÃO RELATIVA	Pórfiro-enáulica-quitônica	Pórfiro-enáulica-quitônica	Pórfiro-enáulica-quitônica
FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	Revestimento e preenchimento de argila em poro com frequência ocasional	Preenchimento e revestimento de argila em poro comum com orientação forte e contínua	Preenchimento e revestimento de argila em poro comum com orientação forte e contínua
FÁBRICAS BIRREFRINGENTES	Salpicada: Ao acaso, em mosaico; Estriada: Paralelo estriada, granoestriada pouco frequente com grau de desenvolvimento fraco	Salpicada: Ao acaso; Estriada: Paralelo estriada, poroestriada, granoestriada com frequência comum e com grau de desenvolvimento fraco a moderado	Salpicada: Granida, ao acaso; Estriada: Paralelo estriada, granoestriada, poroestriada pouco frequente a comum com grau de desenvolvimento moderado

* Porcentagem de poros estimada na descrição visual da lâmina e não pela análise de imagens

Segundo Cooper (2010), o processo de coalescência ocorreria durante a fase de reumectação, onde pela expansão do fundo matricial, os microagregados entrariam em contato uns com os outros formando pontos ou superfícies de contato. Além deste processo de expansão do fundo matricial, processos como a atividade biológica e/ou as pressões de confinamento que ocorrem dentro do solo podem provocar o contato entre os microagregados. A posterior passagem para um clima mais seco provocaria a cimentação praticamente definitiva destas superfícies de contato devido à contração do material e ao rearranjo das partículas de argila.

Em relação às feições pedológicas, feições de preenchimentos e revestimentos de argila em poro foram observadas nos perfis P2- ARGISSOLO AMARELO e P4- ARGISSOLO ACINZENTADO (Figura 4). Nas amostras desses perfis, notou-se que o aumento na quantidade dos ciclos de U-S favoreceu o processo de iluviação de argila, aumentando a frequência dessas feições (Figura 5; Tabelas 4 e 5), evidenciando uma redistribuição local de argila em resposta aos ciclos U-S. A translocação das partículas mais finas, entre ou dentro do mesmo horizonte, aumenta a superfície de contato entre os constituintes do solo (agregados) e, como consequência, o adensamento do solo (CORREA *et al.*,2008).

Figura 4- Fotomicrografias das lâminas dos P2 e P4. Perfil P4 : (A) Películas de argila ao redor dos grãos de quartzo no tratamento P4T3. (B) Detalhe de revestimento de argila no Tratamento P4T3. Perfil P2: (C): Revestimento de argila com segregação de ferro no tratamento P2T3. (D) Detalhe de preenchimento de argila em poro no tratamento P2T2 (luz polarizada).

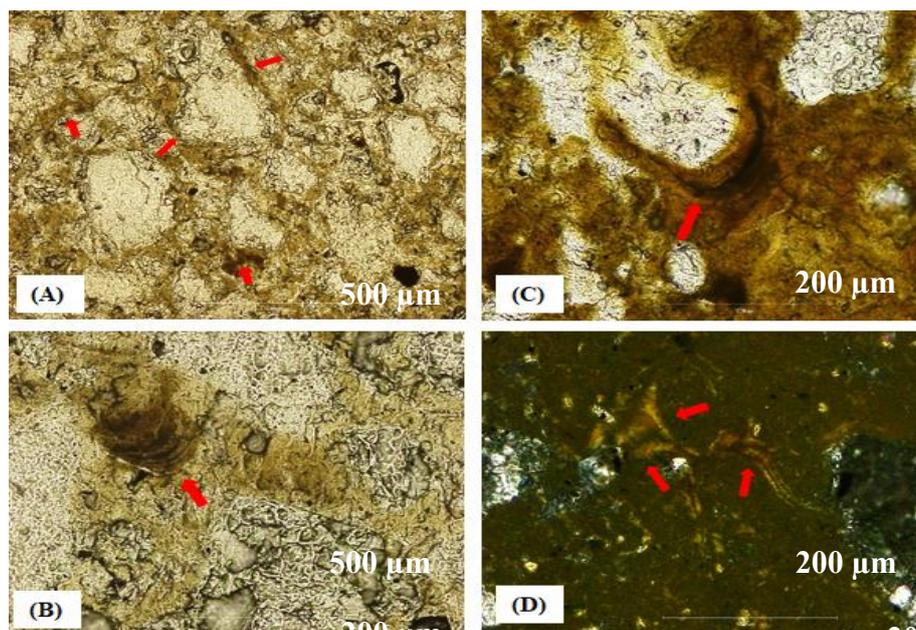
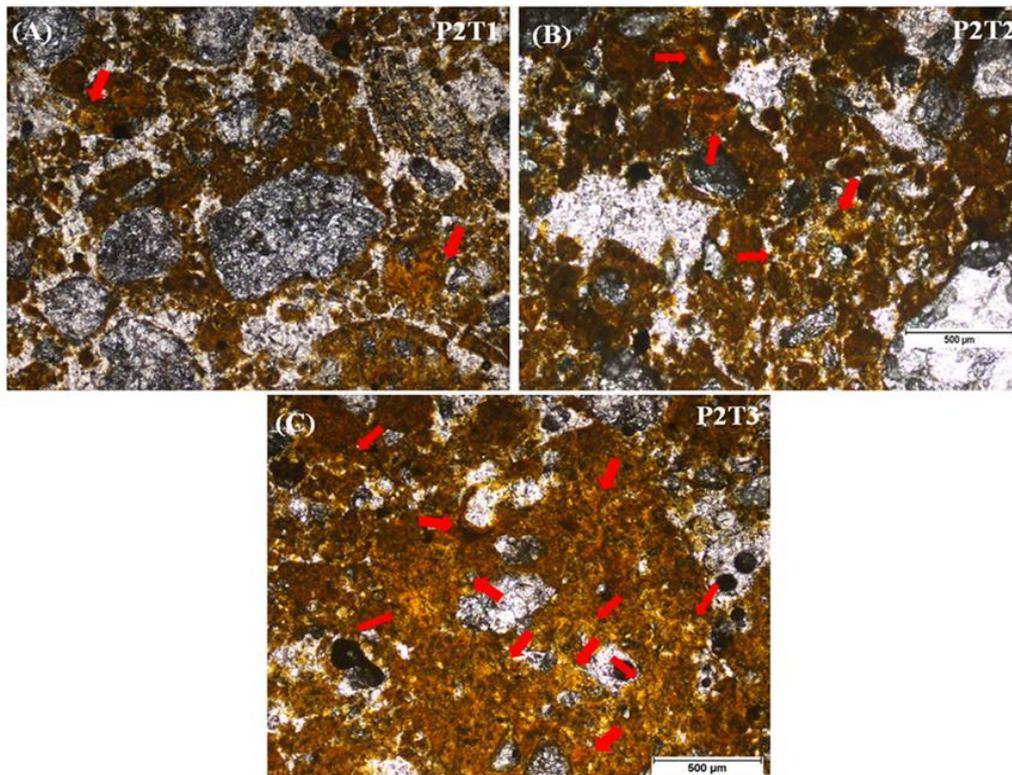


Figura 5- Fotomicrografias de lâminas do perfil P2 (ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico) destacando o aumento das feições pedológicas de revestimento e preenchimento de argila com o aumento dos ciclos de U-S. (A) Tratamento P2T1. (B) Tratamento P2T2. (C): Tratamento P2T3.



As Setas indicam as feições pedológicas

É válido destacar que as feições de iluviação foram mais frequentes na parte inferior das lâminas e que foram observados, em alguns pontos, cutãs de argila associados ao ferro, provocando a formação dos ferri-argilãs nos poros (Figuras 4B e 4C). De acordo com Cooper (1999), os cutãs de iluviação (ferriargilãs) teriam a sua origem nos processos de hidromorfia temporária, nos quais provocariam a desestabilização das ligações ferro-argila facilitando assim a mobilização e redistribuição da argila e ferro.

Lima Neto *et al.* (2009) sugerem que a gênese do caráter coeso é relacionada a duas fases distintas: iluviação de argila, obstruindo poros e posterior perda de Fe favorecendo o colapso da estrutura. Esse processo provoca adensamento do horizonte iluvial, acarretando também um ajuste face a face da caulinita, considerando que a predominância deste mineral na fração argila (Figura 1) pode contribuir para coesão dos solos nos Tabuleiros Costeiros (LIMA NETO *et al.*, 2010).

Esse fato reforça que o acúmulo de argila iluvial pode ser uma das causas relacionadas à gênese dos solos com caráter coeso (CORREA *et al.*, 2008). Segundo estes autores, a coesão é consequência de um processo físico, em que uma pequena quantidade de partículas finas poderia migrar e depositar-se nos poros, presentes entre os constituintes do solo, formando pontes de ligação que, conseqüentemente, aumentariam a coesão.

Cabe ressaltar que feições pedológicas texturais indicativas do processo de translocação/ redistribuição de argila não foram constatadas em todos os solos estudados. Os solos que apresentaram essas feições de forma mais expressiva (P2 e P4), são os que apresentaram maiores quantidades de argila dispersa em água (Tabela 2). Zarei e Stahr (2006) identificaram que a argila dispersa em água tinha relação com a ocorrência de características *hardsetting* (correlatos ao caráter coeso) e concluíram ser um fator relevante, encontrando também relação da argila dispersa em água com a densidade do solo, mostrando que quanto maior a dispersão de argila maior a densidade, explicando a tendência de *hardsetting* dos solos. Diante disso, infere-se que solos com caráter coeso que apresentam maiores quantidades de argila dispersa em água são mais susceptíveis ao processo de argiluviação.

Nos perfis P1 e P3, nos quais não foram encontradas feições pedológicas texturais de forma mais expressiva, agentes químicos (Al e Si de baixa cristalinidade) podem ser mais atuantes na coesão desses solos (Tabela 6), uma vez que esses compostos podem também atuar como agentes cimentantes temporários nos horizontes de baixa permeabilidade, como nos horizontes com caráter coeso (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001, VIEIRA, 2013). Em solos com comportamento *hardsettings*, a gênese da camada fortemente endurecida está relacionada aos processos de umedecimento e secagem cíclicos do solo, porém, a cimentação também pode ocorrer como resultado da liberação da sílica solúvel durante o umedecimento, e reprecipitação com o solo seco (CHARTRES *et al.*, 1990; CHARTRES; NORTON, 1994).

Tabela 6- Teores de Al₂O₃ e SiO₂ (expressos na forma de óxidos) nos horizontes coesos e não coesos obtidos por meio de extração com oxalato de amônio

PERFIL	HORIZONTE	SiO₂	Al₂O₃
		-----mg/kg-----'	
P1	BE	0,109	0,235
	Bt1 (Coeso)	0,266	0,382
	Bt2	0,208	0,366
P2	AB	0,067	0,338
	BA(Coeso)	0,109	0,521
	Bt1	0,117	0,457
P3	BE	0,122	0,391
	Bt(Coeso)	0,180	0,492
	Bt/Bw	0,178	0,601
P4	EB	0,060	0,103
	Bt1(Coeso)	0,173	0,160
	Bt2	0,140	0,120

3.2 Distribuição e grau de seleção da fração areia e resistência do solo à penetração

Os resultados do fracionamento da areia indicam um predomínio de areia pobremente selecionada ($1,00 < \sigma < 2,00$) em todos os horizontes com caráter coeso estudados (Tabela 7). Observou-se ainda que nessa fração, as areias dos tamanhos fina e média (Figura 6) foram predominantes nos solos estudados. Segundo Duarte (2015), esse fato reforça a ideia de que a área fonte para o aporte desses minerais, de elevada resistência, é o embasamento cristalino (sobretudo gnaisse e granitos) localizado no interior do continente.

Esses dados confirmam a hipótese levantada por alguns autores, os quais indicam que um dos fatores que promove o adensamento do solo é a má seleção das partículas da areia (FOLK; WARD, 1957; DUARTE, 2015). Abrahão *et al.* (1998) associam o caráter coeso a atributos da areia fina (teor e grau de seleção), que permitiriam um arranjo das partículas de forma mais adensada, visto que a formação de um arranjo mais compacto pode favorecer a deposição da argila nos poros. Segundo

este autor, solos arenosos quando contêm altas proporções de areia fina, são facilmente adensados. Esse adensamento pode ser mais agravado quando os tamanhos dos grãos de areia apresentam-se mais amplamente distribuídos, levando ao quadro de compactidade máxima.

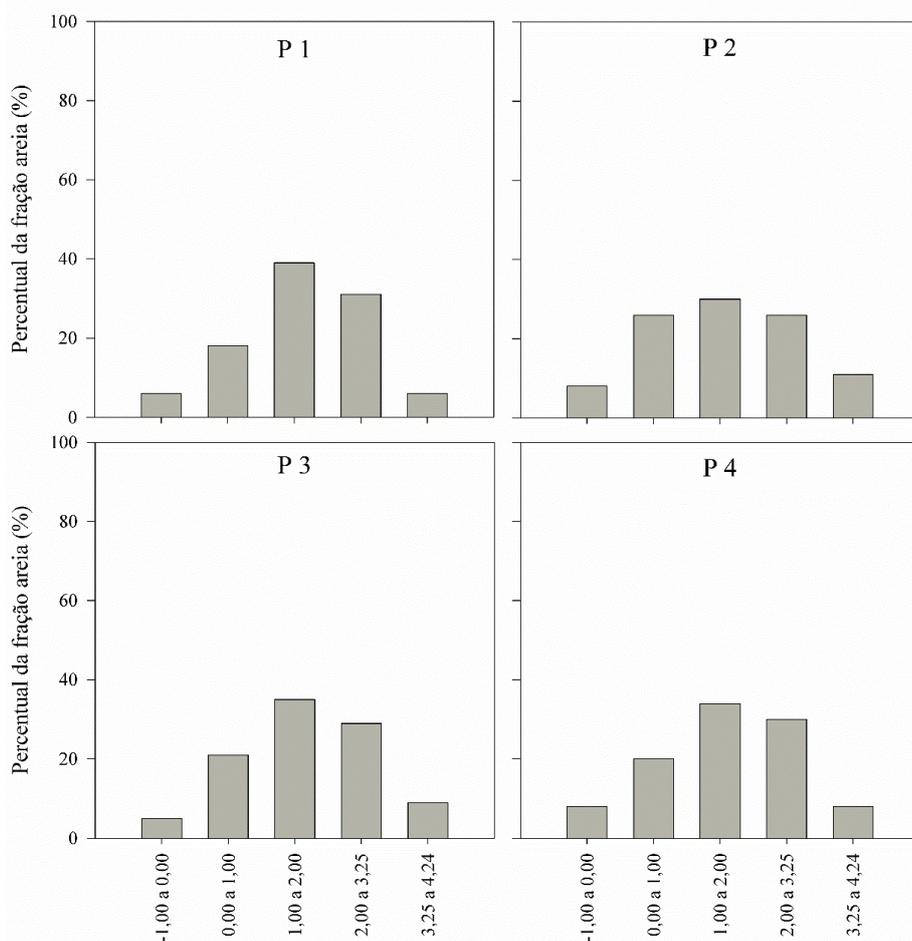
Para Bezerra *et al.* (2015), gênese dos horizontes coesos está relacionada com a presença de material grosseiro mal selecionado, o que acarretaria em uma redução significativa no volume de poros, visto que os grãos menores de material grosseiro são acomodados nos espaços entre os grãos maiores, juntamente com o material fino, preenchendo os poros antes existentes. Segundo Lima (2004), a falta de uniformidade da composição granulométrica do solo é um dos motivos da ocorrência dos horizontes Bt com caráter coeso no Ceará, pois nesse caso, a fração areia apresenta mais de 60% do valor total e, desta, 80% são formados por areia média e fina.

Tabela 7-Medidas estatísticas da distribuição de partículas da fração areia.

Perfil	Mz	Φ_1	SK_I	KG	Grau de seleção
P1	1,663	1,029	-0,012	1,098	Pobrememente selecionado
P2	1,631	1,217	0,08	0,9114	Pobrememente selecionado
P3	1,73	1,087	0,045	0,974	Pobrememente selecionado
P4	1,646	1,42	-0,015	1,01	Pobrememente selecionado

Mz- média gráfica; Φ_1 - desvio padrão; SK_I- grau de simetria; KG- curtose

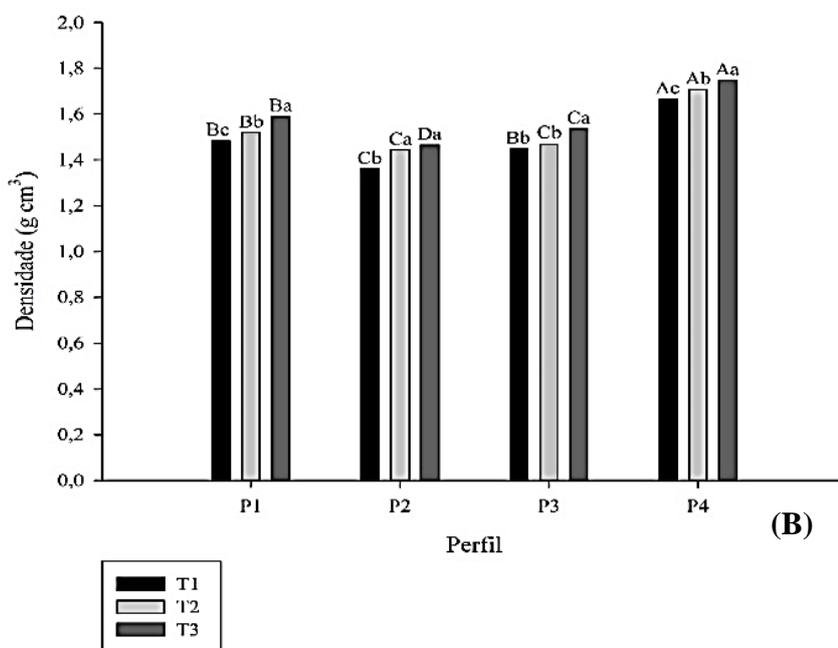
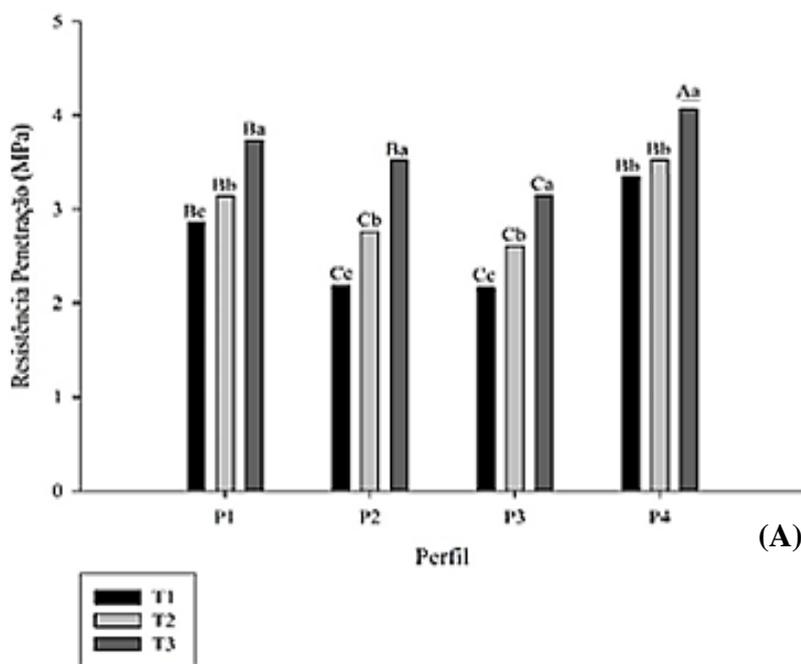
Figura 6- Histogramas do percentual da fração areia dos horizontes estudados.



Legenda: -1 a 0 (areia muito grossa); 0 a 1,00 (areia grossa); 1,00 a 2,00 (areia média); 2,00 a 3,25 (areia fina); 3,25 a 4,24 (areia muito fina).

Quanto às análises físicas, observou-se que os maiores valores de resistência do solo à penetração (RP) e densidade foram encontrados nas amostras do tratamento T3, demonstrando um ajuste mais compacto das partículas do solo nas amostras dos tratamentos com mais ciclos de U-S (12 ciclos). De um modo geral, as amostras do tratamento T3 apresentaram médias de RP e densidade significativamente superiores às médias de RP dos tratamentos T1 e T2 (Figura 7). Com exceção do perfil P4, onde os valores de RP não diferiram entre os tratamentos T2 e T3, notou-se um aumento significativo entre RP do tratamento T1 para o tratamento T3.

Figura 7- (A) Valores médios da resistência do solo à penetração nos solos nos diferentes tratamentos. (B) Valores médios de densidade nos diferentes tratamentos. Médias seguidas da mesma letra minúscula (entre tratamentos) e maiúscula (entre perfis) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Esses resultados evidenciam que a variação dos ciclos de umedecimento e secagem pode atuar continuamente nas frações areia e argila, proporcionando uma maior coesão e conseqüentemente adensamento das partículas quando o solo está seco. De acordo com Giarola *et al.* (2003), o aumento da área de contato entre as partículas, possibilita o aumento do stress efetivo que mantém as partículas do solo unidas, quando seco, bem como favorece a formação de pontes, feitas por materiais finos como argila e silte, conectando os grãos de areia (Conforme observado no perfil P4) aumentando a resistência do solo quando seco (MULLINS *et al.*, 1987).

Com o aumento da densidade do solo (figura 7B), é provável que a sílica e alumínio pouco cristalinos tenham maior participação na gênese desses horizontes, visto que estes já apresentam uma condição de baixa permeabilidade, o que favorece o acúmulo, retenção e precipitação da sílica e/ou de outros materiais silico-aluminosos no período de secagem do solo e conseqüentemente, o aumento da coesão (CHADWICK *et al.*, 1987).

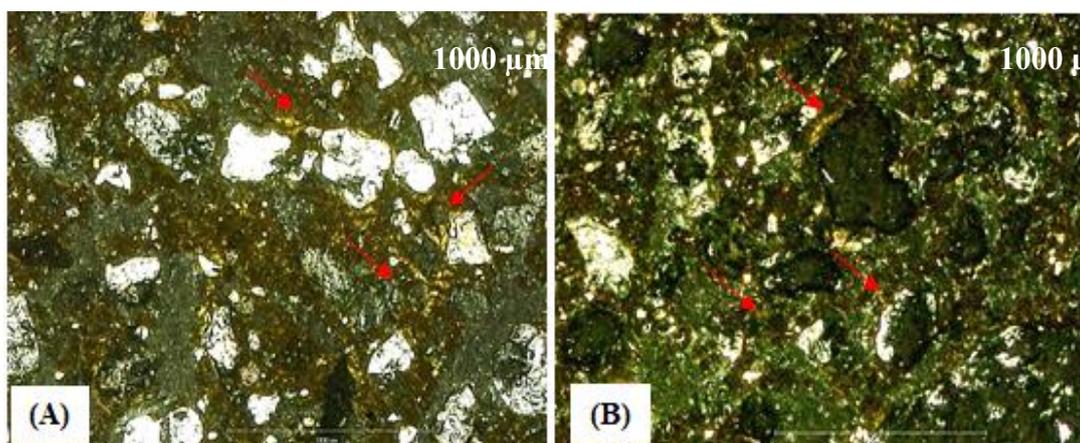
Desse modo, infere-se que o adensamento observado nos horizontes coesos estudados se deu, inicialmente, por um mecanismo de “empacotamento” das partículas (facilitado pelo baixo grau de seleção da fração areia), durante os ciclos de U-S. Com o aumento dos ciclos de U-S, observou-se um arranjo mais compacto das partículas e um maior grau de coesão do solo (Figura 7A e 7B). Com o aumento no adensamento do solo, ocorreria um acúmulo de compostos de baixa cristalinidade, como o alumínio e sílica (Tabela 6), que complementaria a “cimentação” temporária observada nesses solos. Dessa forma, os ciclos de umedecimento e secagem, são fundamentais para a gênese do caráter coeso, juntamente com a presença de aluminossilicatos de baixa cristalinidade e a areia mal selecionada.

Esses dados sugerem que variados processos relacionados à gênese dos horizontes coesos ocorram simultaneamente e, ainda, que a intensidade com que as camadas coesas são formadas esteja relacionada às variações climáticas e morfopedológicas existentes nas diferentes unidades geoambientais que compõem os Tabuleiros Costeiros (RIBEIRO, 1996).

É interessante ressaltar que em todos os solos foram observadas fábricas birrefringentes (Tabelas 4 e 5), embora mais frequentes e com maior grau de desenvolvimento nos tratamentos submetidos a mais ciclos de U-S (Figura 8). Essas fábricas birrefringentes estão relacionadas com uma reorganização da massa de solo em função de mudanças de umidade, não sendo feições originadas pela iluviação (GUNAL

e RANSON, 2006). A presença dessas fábricas birrefringentes corrobora a hipótese de um rearranjo das partículas do solo durante os ciclos de U-S, conforme abordado anteriormente. De acordo com Oliveira (1999), as fábricas grano e poroestriadas resultam da pressão exercida pela massa de solo em razão do aumento e redução da mesma durante ciclos de U-S, fazendo com que ocorra o rearranjo das partículas coloidais na superfície das unidades estruturais.

Figura 8- Fotomicrografias sob luz polarizada das lâminas do perfil P1 – Argissolo Vermelho- Amarelo. (A), (B)Fábricas birrefringentes nos tratamentos P1T2 e P1T3.



As setas indicas as fábricas birrefringentes

3.3 Análise Micromorfométrica

De acordo com a análise micromorfométrica, no tratamento P1T1 (6 ciclos), os poros correspondem a 17,9% da lâmina (Figura 9A), havendo um leve incremento na porosidade no tratamento P1T2 (Figuras 9B e 13). Já no tratamento P1T3, a porosidade foi de 12,7% (Figura 9C), havendo diferença estatística entre a porosidade desse tratamento e os demais tratamentos desse solo (Figura 12). No tratamento P1T1 e P1T2, pode-se observar a dominância de poros arredondados médios. Contudo, foram observados em áreas mais porosas destes tratamentos, poros complexos grandes e alongados médios e grandes (Figura 8 A, 8B). Já no tratamento P1T3, mais de 80% dos poros são arredondados, dentre eles, observou-se a predominância de poros médios, apresentando 7% dos poros totais da lâmina (Figura 9C).

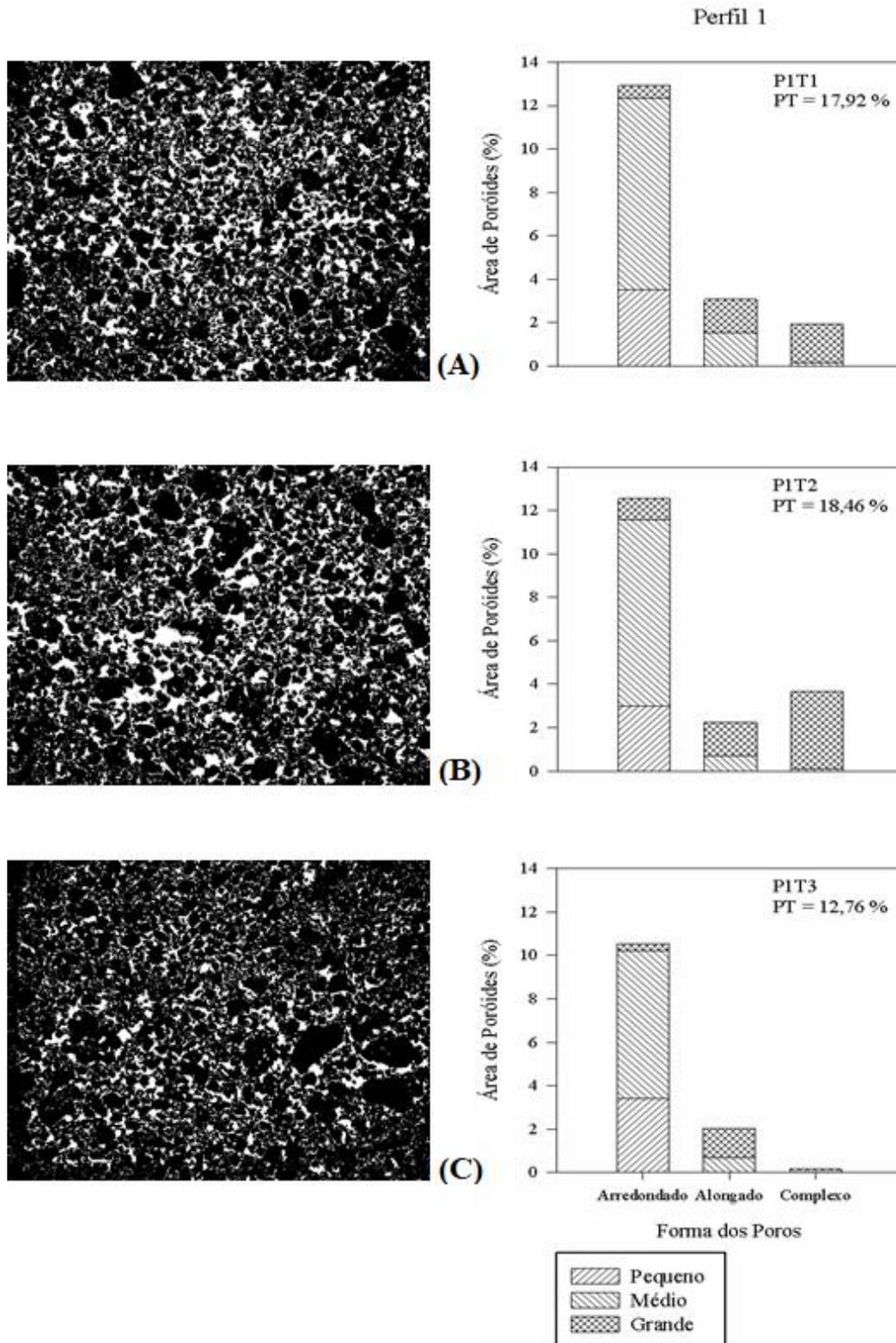
O tratamento P2T1 apresentou uma porosidade de 17,2% (Figura 10A) com a predominância de poros arredondados médios (7%) e de poros complexos grandes

(4,8%). No tratamento onde as amostras passaram por 9 ciclos de U-S (P2T2), houve uma redução da porosidade para 10,8% (Figura 10B) com predomínio de poros arredondados médios e no tratamento P2T3 (12 ciclos), houve uma redução significativa da porosidade, apresentado apenas 5% de poros, compostos predominantemente por poros arredondados pequenos (Figura 10C). Dentre os solos estudados, esse perfil foi o que apresentou uma maior diferença na porosidade entre os tratamentos, com uma redução de 3 vezes do espaço poroso após o 12º ciclo de U-S (P2T3), comparando com a porosidade do tratamento P2T1 (Figura 10A).

Esse fato pode estar associado a maior frequência de revestimentos e preenchimento dos poros com argila, conforme observado na análise micromorfológica (Figura 4C, 4D, Figura 5). Nesse caso, a porosidade foi reduzida em virtude do entupimento dos poros por argila, ocorrendo assim, um aumento do adensamento do solo. Corroborando com essa hipótese, a RP desse solo também aumentou de forma significativa entre os tratamentos, apresentando uma maior RP na amostra do tratamento T3 (Figura 7A).

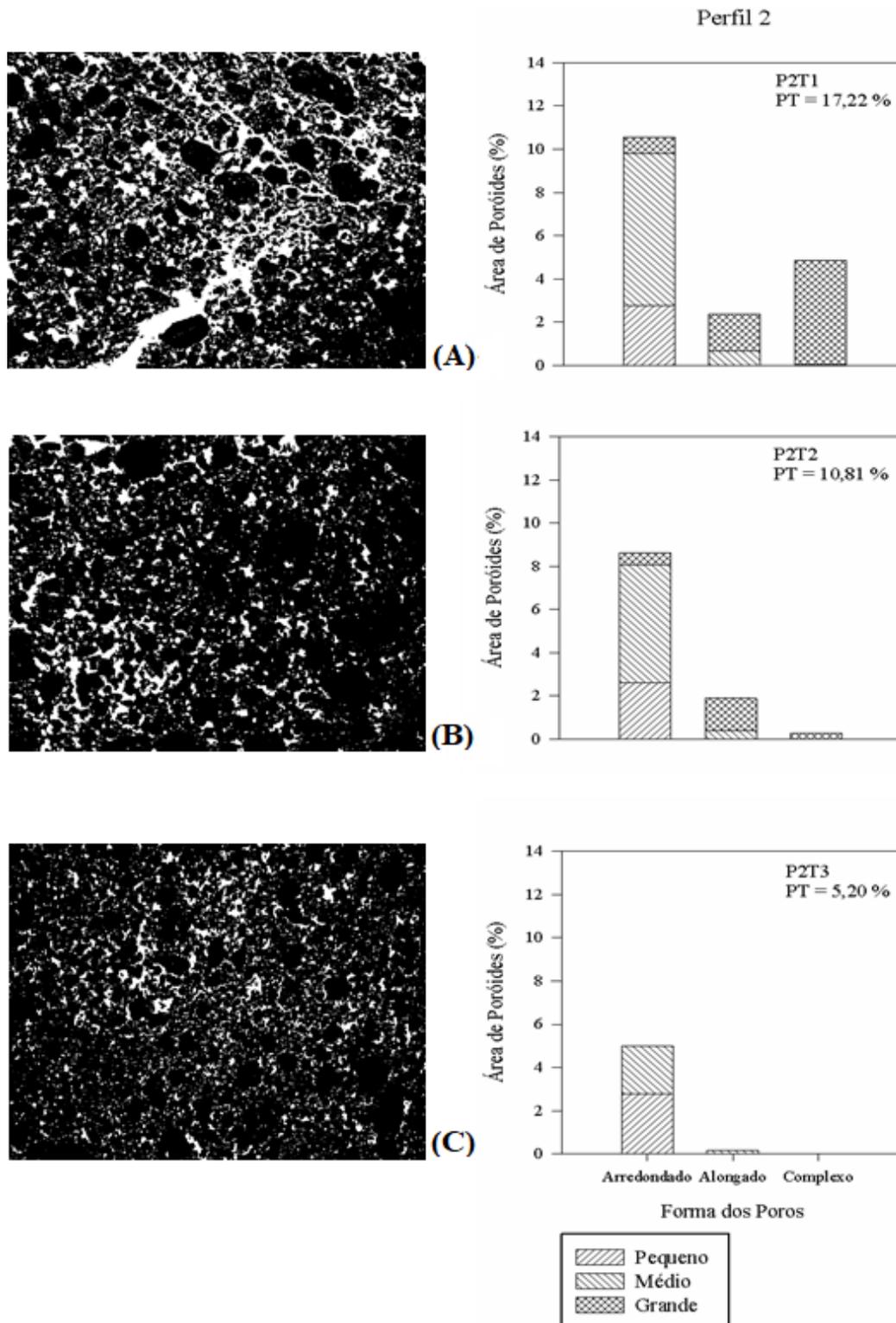
Nos perfis P1 e P2, os quais apresentam nos tratamentos P1T1, P1T2 e P2T1 áreas mais porosas, foram observadas maiores proporções de poros complexos grandes em detrimento dos tratamentos P1T3 e P2T3. Nesses últimos tratamentos, foram observadas maiores porcentagens de poros arredondados médios e pequenos, do tipo cavidades policôncavas (poros não comunicantes). A porosidade do tipo cavidades policôncavas é uma característica de solos adensados que possivelmente apresentavam maior volume de poros intercomunicantes e sofreram adensamento, tornando os poros mais individualizados e menos interconectados (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005; COOPER *et al.* 2010; BEZERRA *et al.*, 2015;). Como mencionado anteriormente, o aumento dos ciclos provocou um maior adensamento, em que os poros de empilhamento, dominantes nas amostras que foram submetidas por 6 e 9 ciclos de U-S, evoluíram a poros do tipo cavidades policôncavas após 12 ciclos de U-S. Esse tipo de porosidade tem sido frequentemente encontrado em solos com caráter coeso (LIMA *et al.*, 2005; CORREA, *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2015).

Figura 9- Imagens binarizadas e histogramas com a distribuição dos tipos e tamanho de poros nas lâminas do perfil P1 – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico. Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos com: (A) 6 ciclos de U-S (P1T1), (B) 9 ciclos de U-S (P1T2) e (C) 12 ciclos de U-S (P1T3).



A porosidade aparece em branco e a fase sólida em preto

Figura 10- Imagens binarizadas e histogramas com a distribuição dos tipos e tamanho de poros nas lâminas do perfil P2 – ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico. Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos com:(A) 6 ciclos de U-S (P2T1). (B) 9 ciclos de U-S (P2T2). (C) em 12 ciclos de U-S (P2T3).



A porosidade aparece em branco e a fase sólida em preto

Os solos dos perfis P3 e P4 apresentarem menos porosos desde o início do experimento (Tratamento T1). Cabe ressaltar mais uma vez que não se pode negligenciar a contribuição de agentes cimentantes na gênese desses horizontes, sendo provável que a sílica e alumínio amorfos presentes nas amostras (Tabela 6) provocariam um aumento no adensamento dos solos logo nos primeiros ciclos de U-S. É possível que durante o período de secagem por desidratação, novas camadas de sílica e ou aluminossilicatos iriam sendo adicionados na superfície dos silicatos e/ ou sesquióxidos dando origem a formação de “coatings de sílica (processo de polimerização) (ARAÚJO FILHO *et al.*,2001). Dessa forma, é provável que o aumento dos ciclos de U-S favoreceu a formação dessas pontes de sílica, aumentando a coesão do solo quando seco.

Nos tratamentos P3T1 e P3T2 há a dominância de poros arredondados médios que correspondem, respectivamente a 3,0% e 2,7% da área total ocupada por poros (Figura 11A, 11B), não havendo diferença estatística entre a porosidade entre os dois tratamentos. No tratamento P3T3, a porosidade foi significativamente inferior aos demais tratamentos desse solo, apresentando 3,7% de poros arredondados, com predominância dos arredondados pequenos (Figura 11C). Os tipos de poros encontrados em todos os tratamentos desse solo foram do tipo cavidades policôncavas irregulares (Figura 11). Esses dados corroboram com os dados encontrados por Lima *et al.* (2004), onde os autores observaram que o principal efeito do adensamento observado nos solos coesos é a criação de poros arredondados médios, em decorrência da redução de poros alongados e desaparecimento de poros complexos. Segundo Menezes *et al.* (2018) a coesão associada ao arranjo das partículas ocasionada pelo adensamento natural das mesmas resulta na dominância de poros arredondados médios, implicando menor área disponível para o fluxo de ar em relação ao horizonte não coeso.

Os dados obtidos de RP e porosidade (Figuras 7, 12 e 13) mostram que o perfil P4, foi o solo que apresentou maior adensamento dentre os solos estudados. Vieira *et al.* (2012), estudando Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará, verificaram que a paisagem foi determinante para a distinção dos solos coesos. Segundo os autores, o solo mais coeso foi aquele que se encontrava na posição mais baixa da paisagem (ARGISSOLO ACINZENTADO), local que favorecia o processo de acumulação de alguns constituintes, como argila e/ou Sílica pouco cristalina. Corroborando com essa hipótese, Dantas *et al.* (2014) estudando solos com caráter coeso no Maranhão observaram que a posição da paisagem foi determinante para a distinção dos solos coesos,

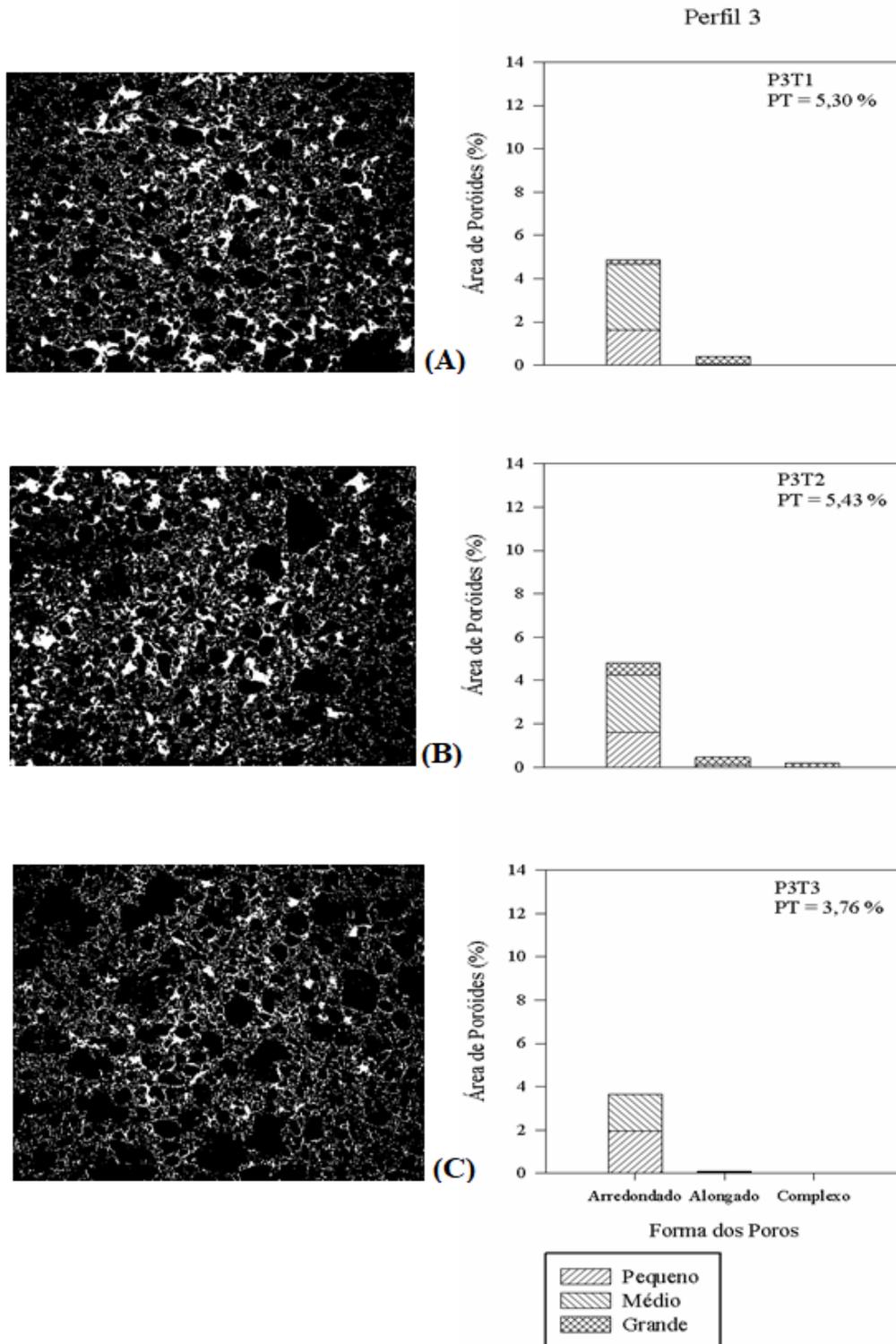
sendo aqueles desenvolvidos em pedoforma côncava os que apresentaram a maior expressão do caráter coeso.

Semelhante ao perfil P3, foram observados nos tratamentos do perfil P4, o domínio de poros arredondados médios e pequenos. O tratamento P4T1(6 ciclos) apresentou apenas 3,2% de espaço poroso na lâmina (Figura 12A), ocorrendo uma elevação da porosidade no tratamento P4T2 para 5% (Figura 12B) e uma redução novamente no tratamento P4T3 (Figura 12C) para 3,5%. Apesar de não ter sido constatada diferença estatística entre a porosidade dos diferentes tratamentos desse perfil (Figura 13), observou-se, por meio da análise micromorfológica (Tabela 5) e pelos testes de RP (Figura 7A), um aumento no adensamento desse solo e da frequência de feições de iluviação de argila nos tratamentos com maiores quantidades de ciclos de U-S (P4T2 e P4T3).

Os dados de RP mostram uma elevada coesão nesse solo, principalmente no tratamento P4T3, onde houve um aumento significativo na RP em relação aos tratamentos P4T1 e P4T2, apresentando um valor de 3,9 Mpa (Figura 7). Segundo Silva e Cabeda (2005), o processo de deposição de argila nas paredes dos poros e sobre grãos de quartzo ocasiona um arranjo mais compacto de partículas, e aumenta o adensamento do solo.

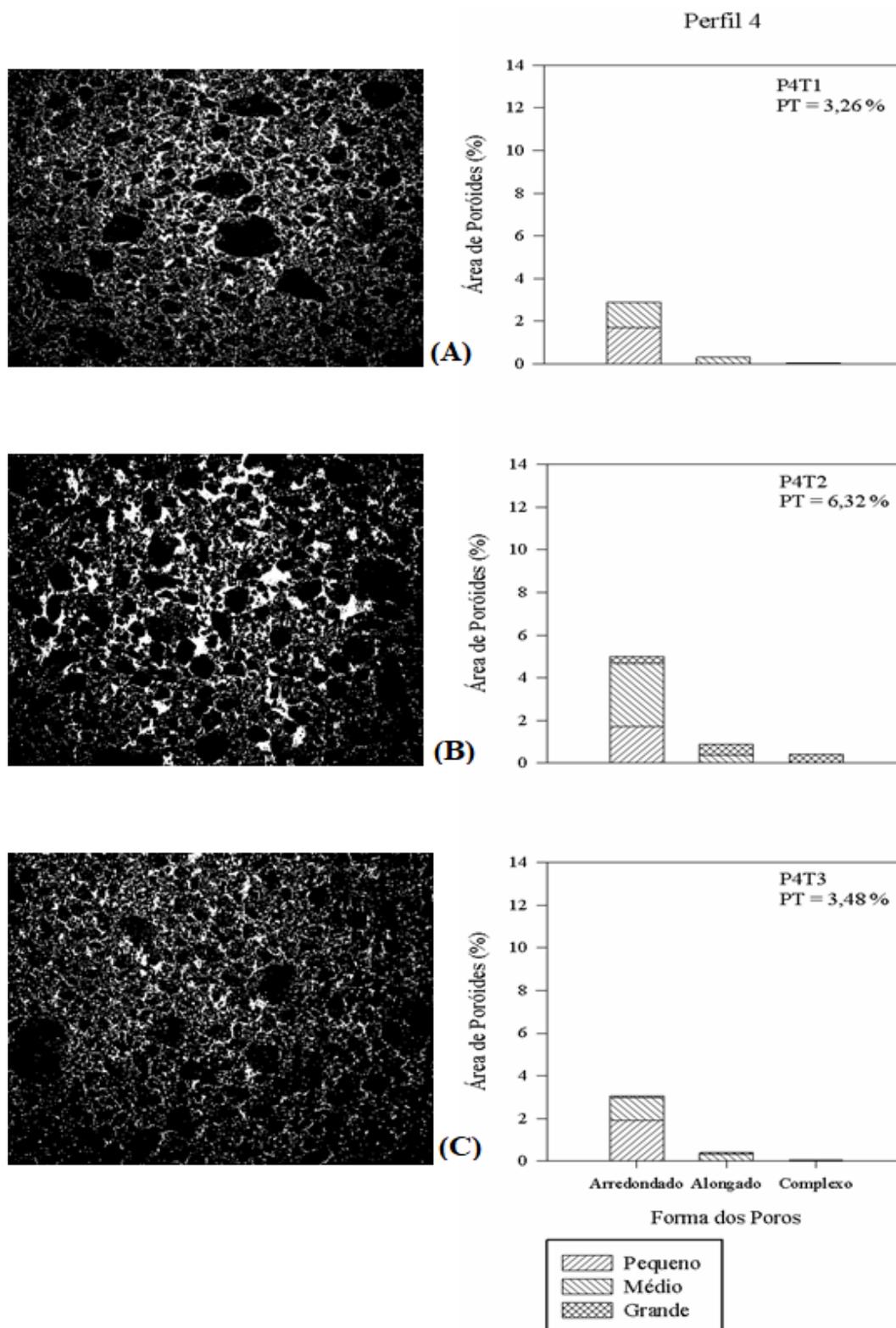
Ressalta-se que nesse solo, observou-se na análise micromorfológica, o material grosseiro (quartzo) envolvido por películas de argila; e algumas áreas, essas películas unem os grãos (Figura 4A). Segundo Attou e Bruand (1998), a dureza do solo (quando seco) observada em horizontes cimentados, como no caso dos fragipãs, também pode ser resultante do adensamento provocado por pontes de ligação da argila com o material grosseiro. De acordo com os mesmos autores, os revestimentos e as pontes de argila que se desenvolvem ao redor do material grosseiro aumentam significativamente com o aumento dos ciclos de U-S. O elevado valor de RP e densidade do solo observado no tratamento P4T3 (Figura 7A, 7B), sugerem que essas pontes de argila podem também aumentar a dureza observada em solos arenosos com caráter coeso.

Figura 11- Imagens binarizadas e histogramas com a distribuição dos tipos e tamanho de poros nas lâminas do perfil P3 – ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirodóxico. Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos com:(A) 6 ciclos de U-S (P3T1). (B) 9 ciclos de U-S (P3T2). (C) 12 ciclos de U-S (P3T3).



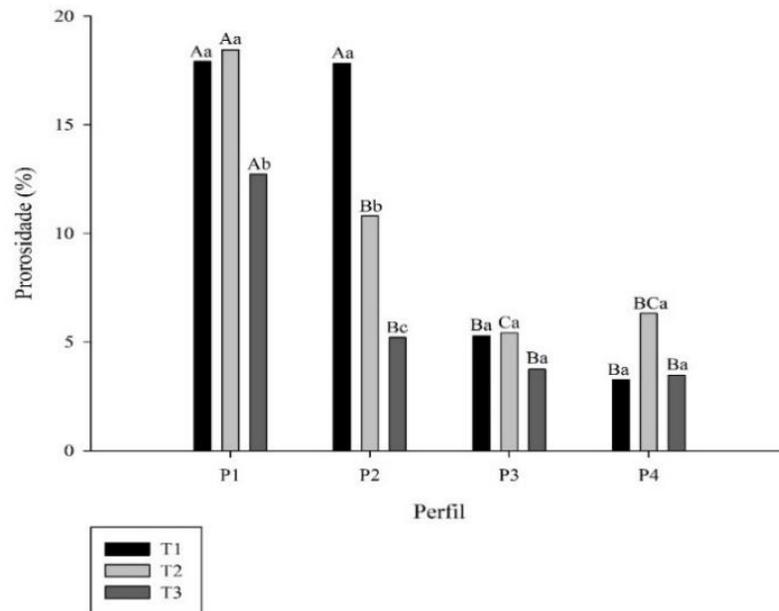
A porosidade aparece em branco e a fase sólida em preto

Figura 12- Imagens binarizadas e histogramas com a distribuição dos tipos e tamanho de poros nas lâminas do perfil P4 – ARGISSOLO ACINCENTADO Eutrófico abruptico. Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos com:(A) 6 ciclos de U-S (P4T1). (B) 9 ciclos de U-S (P4T2). (C) 12 ciclos de U-S (P4T3).



A porosidade aparece em branco e a fase sólida em preto

Figura 13- Valores médios da porosidade do solo após diferentes números de ciclos de umedecimento e secagem. Médias seguidas da mesma letra minúscula (entre tratamentos) e maiúscula (entre perfis) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



4 CONCLUSÕES

1- A gênese dos horizontes com caráter coeso está relacionada a um mecanismo de “empacotamento” das partículas, facilitado pelo baixo grau de seleção da fração areia nos horizontes estudados. Esse mecanismo ocorre naturalmente com os ciclos de umedecimento e secagem do solo, os quais, à medida que são incrementados, proporcionam uma redução significativa da porosidade do solo.

2- O aumento na quantidade dos ciclos de umedecimento e secagem também favoreceu o processo de translocação e iluviação de argila, provocando o entupimento dos poros, e, conseqüentemente, um aumento na coesão do solo. A presença de feições de iluviação de argila em dois dos perfis estudados (P2 e P4), sugerem que a argila iluvial está relacionada à gênese dos solos com caráter coeso.

3- A ausência de feições de iluviação de argila no material de dois perfis (P1 e P3) indicam que, nesses solos, elementos químicos, como o silício e alumínio, podem ser mais atuantes na gênese do caráter coeso, em detrimento aos fatores físicos.

4- A coesão dos solos nos Tabuleiros Costeiros está associada a má seleção da areia, que permite um arranjo melhor dessas partículas, tornando o solo mais adensado e sujeito a uma “cimentação” química e deposição de argila nos poros.

5 REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, W. A. P.; COSTA, L. M.; MELLO, J. W. V.; NEVES, J. C. L. Distribuição de Frequência de Tamanho da Fração Areia e Compacidade Relativa de Solos Desenvolvidos de Sedimentos do Grupo Geológico Barreiras. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 22, p. 1-9, 1998.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do Solo - Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290p.

ANDRADE, K. R. **Atributos físico-hídricos de solos coesos da zona da mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2014. 116p.

ATTOU, F; BRUAND, A. Experimental study of fragipans formation in soils. Role of Clay dispersion and wetting-drying cycles. **Earth Planet.Sci.**, v.326, p. 545-552, 1998.

ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. e. 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, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.

ARAÚJO, Q.R. et al. Soil carbon and physical property changes in Brazilian Coastal tableland soils with land use following deforestation. *Agroforestry systems*, v. 63, p. 193-198, 2004.

BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.57-65, 2004.

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**, v. 53, p. 43, 2015.

BRESSON , L.M.; Moran , C.J. Role of compaction versus aggregate disruption on slumping and shrinking of repacked hardsetting seedbeds. **Soil Science**, v.168, p.585-594, 2003

BREWER, R. **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington, New York, 1976. 482p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Woverhampton, Waine Research Publishers, 1985. 152p.

CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M. ;RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, p.1060–1067, 1990.

CHARTRES, C.J.; NORTON, L.D. Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons. In: INTERNATIONAL WORKING.1994.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e b textural sobre diabásio.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 130p. (Tese de Doutorado)

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralitic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1685-1669, 2010.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 581-595, 2005.

CORRÊA, M.M. *et al.* 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**, v. 32, p. 297-313, 2008.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. Parte 1.

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

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013, 353p.

FOLK, R.L. e WARD, W.C. Brazos river bar: A study on the significance of grain-size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, 27:3-26, 1957.

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

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 Ciência do Solo**, v.33, p. 33-40, 2009.

GUNAL, H.; M. D. RANSOM. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. **Catena** v.68, p.59–69,2006.

IPECE. **Divisão Política do estado do Ceará**. Ceará. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/11>> acesso em: 08 janeiro de 2018.

JACOMINE, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.19-46.

JUHÁSZ, C. E. P. **Relação solo-água-vegetação em uma topossequência localizada na Estação Ecológica de Assis, SP**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006

LAMOTTE, M.; BRAUND, A.; HUMBEL, F.X.; HERBILLON, A.J.; RIEU, M. A hard sandy-loam soil from semi-arid northern Cameroon: Fabric of the groundmass. **Eur. J. Soil Sci.**, 48:213-225, 1997a

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. Observations of pores and aggregates during aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. **Geoderma**, v.118, p.191-207, 2004.

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

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; ARAÚJO FILHO, J.C, Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos Tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.473-486, 2010.

LIMA, H.V. **Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no Estado do Ceará**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2004. 85p. (Tese de Doutorado).

LIMA, H.V.; SILVA, H.P.; ROMERO, R.E.; JACOMINE, P. T. K. Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n.1, p. 33-40, 2005.

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

MENEZES, A.S. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de Tabuleiro Costeiro**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. 75p.

MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; ASSIS JUNIOR, R.N.; TOMA, R.S.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; COOPER, M.; MOTA, J.C.A **Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil**. **Geoderma**, v. 15, 2018.

OLIVEIRA, C.V. **Atributos mineralógicos e micromorfológicos, gênese e uso de solos do projeto jaíba, Norte de Minas Gerais.** Universidade Federal de Viçosa, 1999. 161p. (Tese de doutorado)

PIRES, L.F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.4, p.391-400, abr. 2010.

RIBEIRO, L.P. Evolução da cobertura pedológica dos tabuleiros costeiros e a gênese dos horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.93-121.

SOUZA, L.S. Aspectos sobre o uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. B. Inf. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.34-39, 1996.

STOOPS, G.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification in soil materials. I. A classification of the related distributions of coarse and fine particles. **Geoderma**, v. 13, p. 189-200, 1975.

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**, v.22, p. 573-581, 1998.

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

VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará.** Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. 113p.

WITTHIG, L.D. ; ALLARDICE, W.R. X - Ray diffraction techniques. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods.* **Madison, American Society of Agronomy**, 1986. p.331-362.

**CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA SÍLICA E ALUMÍNIO DE BAIXA
CRISTALINIDADE NO ADENSAMENTO E NO COMPORTAMENTO FÍSICO
DE SOLOS COM CARÁTER COESO DOS TABULEIROS COSTEIROS**

RESUMO

Os Tabuleiros Costeiros constituem uma unidade geomorfológica associada aos sedimentos da Formação Barreiras, sendo comum nessas áreas, a presença de solos com caráter coeso. A gênese dos horizontes com caráter coeso ainda é pouco conhecida, porém, estudos indicam que a formação desses horizontes pode ter influência de compostos de baixa cristalinidade (silício e o alumínio), onde esses elementos podem agir como cimentantes temporários no solo. Desse modo, partiu-se da hipótese que os compostos de baixa cristalinidade (principalmente sílica e alumínio de baixa cristalinidade) influenciam na gênese do caráter coeso, podendo ser um fator primário ou secundário na pedogênese, promovendo um maior adensamento e coesão desses solos. Com isso, o objetivo do presente estudo foi avaliar a contribuição dos compostos de baixa cristalinidade (Si e Al) na gênese e no comportamento físico dos horizontes com caráter coeso por meio de análises físicas (Porosidade do solo, obtida por meio tomografia computadorizada de raios-x; Resistência do solo à penetração e Densidade) em amostras de solos na presença e na ausência desses compostos. Para avaliação do efeito dos compostos de baixa cristalinidade no adensamento dos solos, foram utilizadas amostras de TFSA de horizontes com caráter coeso de quatro perfis de solo dos Tabuleiros Costeiros, localizados nos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará. Essas amostras foram submetidas a dois tratamentos: tratamento “CE” (com extração de compostos amorfos) e tratamento “SE” (sem extração de compostos amorfos). Após a retirada dos compostos amorfos do tratamento CE, as amostras dos dois tratamentos foram submetidas a 6 ciclos de umedecimento e secagem. Após o último ciclo, as amostras foram submetidas ao escaneamento em Microtomógrafo Computadorizado de Raios – X e testes de resistência do solo à penetração (RP). Após a avaliação da RP, a densidade do solo foi determinada. Os acréscimos de silício e alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes com caráter coeso evidenciam que esses compostos contribuem conjuntamente na gênese destes horizontes, onde a sílica parece ter maior ação cimentante em relação ao alumínio. Todas as amostras que passaram pelo processo de extração de sílica e alumínio de baixa cristalinidade apresentaram uma melhoria física do solo, apresentando um menor adensamento em relação as amostras que não passaram pela extração desses compostos. As imagens da porosidade, obtidas por meio da técnica de tomografia de raios- X, evidenciaram um aumento do espaço poroso do solo nas amostras dos tratamentos que foram submetidos a extração, onde observa-se solos menos adensados, com poros

maiores, mais alongados e mais conectados. Desse modo, ratifica-se a contribuição de compostos de sílica e alumínio no endurecimento dos solos coesos.

Palavras – Chave: Coesão. Tomografia de Raios- X. Compostos amorfos.

ABSTRACT

The Coastal Tablelands constitute a geomorphological unit associated to the sediments of the Barreiras Formation, being common in these areas, the presence of soils with cohesive character. The genesis of cohesive horizons with nature is still unknown, but studies indicate that the formation of these horizons can influence low crystalline compounds (silica and aluminum), where these elements can act as temporary cements in the soil. Thus, it was hypothesized that low crystallinity compounds (mainly silica and aluminum) influence the genesis of the cohesive character, and may be a primary or secondary factor in the pedogenesis, promoting a higher density and cohesion of these soils. The aim of the present study was to evaluate the contribution of low crystallinity compounds (Si and Al) to the genesis and physical behavior of these horizons by means of soil physical analyzes (soil porosity, X-ray tomography, soil resistance to penetration and soil density) in the presence and absence of these compounds. In the present study, air-dried soil samples of cohesive horizons were used of four soil profiles of the Coastal Tabuleiros, located in the states of Bahia, Pernambuco and Ceará. These samples were submitted to two treatments: "WE" treatment (with extraction of amorphous compounds) and "NE" treatment (non-extraction of amorphous compounds). After the removal of the amorphous compounds from the WE treatment, the samples of the two treatments were submitted to 6 cycles of wetting and drying. After the last cycle, the samples were submitted to computerized X - ray Microtomograph and soil penetration resistance (PR) tests. After the PR evaluation, the soil density was determined. The addition of silicon and aluminum of low crystallinity in the horizons with cohesive character evidences that these compounds contribute together in the genesis of these horizons, where silica seems to have a greater cementing action in relation to the aluminum. All samples that underwent the extraction process of silica and aluminum of low crystallinity showed a physical improvement of the soil, presenting a smaller density in relation to the samples that did not have the extraction of these compounds. The porosity images, obtained by the technique X-ray tomography showed an increase in the porous space of the soil in the samples of the treatments that were submitted to extraction, where less densified soils with larger, longer and more connected pores are observed. In this way, the contribution of silica and aluminum compounds in the hardening of cohesive soils is ratified.

Keywords: Cohesion. Tomography of X-rays. Amorphous compound

1 INTRODUÇÃO

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (28,8%), sendo inferior somente ao oxigênio (SOMMER *et al.*, 2006). Esse destaque deve-se à sua representatividade significativa nas rochas e solos da superfície da terra (FRAYSSE *et al.* 2006). Esse elemento nos solos consiste em três fases principais, que são: (1) minerais primários herdados do material original; (2) minerais secundários (fases cristalinas) desenvolvidos através da formação do solo, principalmente minerais argilosos e (3) microcristalinos secundários (Opala CT) para fases mal ordenadas (Opala A, imogolita, alofano), que também são resultado da formação do solo (CHADWICK *et al.*, 1987b; DREES *et al.*, 1989; MATICHENKOV E BOCHARNIKOVA, 2001; MONGER E KELLY, 2002).

O silício pode ser encontrado no solo na forma cristalina, amorfa (de baixa cristalinidade) e em solução. Trabalhos envolvendo a dissolução de minerais dão ênfase a sílica monomérica (H_4SiO_4), ou ácido monossilícico, sendo este, a forma predominante encontrada na solução do solo (DIETZEL, 2000). O teor de sílica no solo depende de muitos fatores, como por exemplo, de sua concentração na solução, processos de adsorção, precipitação e dissolução na fase sólida do solo (SOMMER *et al.*, 2006).

Pesquisas que buscaram a compreensão sobre a gênese de horizontes endurecidos e/ou cimentados, apontam a sílica como principal atuante na manifestação deste fenômeno. Estas pesquisas mostraram correlações positivas entre resistência do solo e sílica extraível (DUCAN; FRANZMEIER, 1999; FRANZMEIER *et al.*, 1996; McBURNET; FRANZMEIER, 1997). Os horizontes cimentados por sílica recebem diversas denominações. Os que apresentam cimentação forte são conhecidos por termos como silcretos, *hardpans*, *duripans* (“duripãs” em português) e tepetates (ROBERTSON; BUTT, 1997; THIRY, 1993; CHARTRES, 1985; CHARTRES; NORTON, 1994). Por outro lado, os horizontes com cimentação fraca ou aparente são denominados fragipãs (NORTON; 1994, FAO 1994; EMBRAPA, 2013).

Na cimentação de fragipãs, soluções ricas em Si podem causar precipitação de sílica e aluminossilicatos de baixa cristalinidade (amorfos), que após o período de secagem ficam endurecidos (KARATHANASIS, 1987). Já é constatada também a influência do silício na gênese de duripãs, onde este constituinte funciona como agente químico na cimentação desses horizontes. Segundo Drees *et al.* (1989), pequenas

quantidades de sílica já são suficientes para que efeitos negativos nas propriedades físicas do solo sejam manifestados, deixando-os duros a extremamente duros quando secos. Em estudo mais recente, Duarte (2015) mostrou que, mesmo em pequena quantidade, o silício extraído de horizontes com caráter coeso em relação a um horizonte sem o caráter coeso é aproximadamente o dobro, ou seja, mesmo em pequenas quantidades a sílica de baixa cristalinidade pode estar contribuindo para a formação do caráter coeso.

A sílica e outros aluminossilicatos podem também atuar como agentes cimentantes temporários nos horizontes de baixa permeabilidade, como nos horizontes com caráter coeso (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001). Nessa condição, o movimento das soluções torna-se lento, favorecendo a retenção e precipitação da sílica e/ou de outros materiais silico-aluminosos no período de secagem do solo (CHADWICK *et al.*, 1987).

De acordo com Chadwick *et al.* (1987), os processos de cimentação causados por sílica são influenciados pelo balanço entre o teor de sílica em solução e a quantidade de superfícies disponíveis para a deposição de sílica. Na forma de H_4SiO_4 , o silício presente na solução do solo está sujeito a processos de precipitação e adsorção na fase sólida, sendo os óxidos de Fe e Al os principais constituintes com capacidade significativa para adsorção (CORNELIS *et al.*, 2011). Em pH próximo da neutralidade, este constituinte tem solubilidade de 2 mM. Acima desta concentração, ocorre policondensação (polimerização), produzindo partículas coloidais de sílica (BIRCHALL, 1995).

O período seco favorece o processo de polimerização e precipitação da sílica, no qual as moléculas de H_4SiO_4 adsorvidas precipitam na forma de SiO_2 pouco cristalina ou outros constituintes silico-aluminosos amorfos. Quando o fenômeno ocorre entre duas superfícies próximas, a sílica polimeriza-se formando “pontes” ligando partículas (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001). Nesse período, observa-se a máxima expressão da coesão. No período úmido, por outro lado, a despolimerização da sílica e de outros aluminossilicatos deve contribuir para condição de friabilidade do material.

Vieira *et al.* (2012) estudando a influência de compostos amorfos na gênese de horizontes com caráter coeso no estado do Ceará, constataram que após a extração de compostos amorfos (Fe, Al e Si), os materiais dos horizontes com caráter coeso mostraram uma significativa redução da resistência à penetração (RP) e na densidade, indicando que estes compostos podem estar atuando como agente cimentante nesses horizontes.

Estudos realizados em solos da Austrália (CHARTRES *et al.*,1990; FRANZMEIER *et al.*,1996) também destacam a sílica de baixa cristalinidade como o principal agente cimentante em solos com comportamento *hardsetting*, correlato ao caráter coeso (GIAROLA; SILVA, 2002). A gênese desses solos está relacionada com o umedecimento e secagem cíclicos do solo, onde a cimentação pode ocorrer também como resultado da liberação da sílica solúvel durante o umedecimento e reprecipitação com o solo seco.

Destaca-se que, além da sílica, o alumínio também pode contribuir nos mecanismos de endurecimento no solo, visto que este elemento se encontra associado à sílica em condições ambientais e pela sua interação com este elemento na adsorção (MOREAU, 2001; DUARTE 2015). Franzmeier *et al.* (1989) constataram que a interação do silício com o alumínio é grande e que a sílica em solução (H_4SiO_4) é adsorvida em diversas formas de óxidos e hidróxidos de Alumínio. Doucet *et al.* (2001) corroboram esta afirmação e destacam que a sílica em solução pode combinar-se com o alumínio ao longo de todo o solo, formando polímeros coloidais (Al-Si), como também citado por Araújo Filho *et al.* (2001).

Além disso, o alumínio influencia na solubilidade da sílica (JONES e HANDRECK, 1963). Na faixa ácida, que é a reação do domínio de solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, mesmo em quantidades muito baixas (traços), o alumínio favorece a precipitação da sílica coloidal. Entretanto, em meio alcalino, são necessárias quantidades muito maiores para promover a precipitação da sílica monomérica (OKAMOTO *et al.*,1957 *apud* ARAÚJO FILHO *et al.*,2001)

Contudo, alguns autores não atribuem a participação de compostos de sílica e alumínio de baixa cristalinidade na gênese de horizontes coesos. Moreau *et al.* (2006b), estudando a gênese de solos com horizontes coesos no estado da Bahia, não constataram a ação de agentes cimentantes nos horizontes estudados, indicando que a formação destes horizontes não estaria relacionada à presença de componentes pouco cristalinos. Resultados semelhantes foram encontrados por Correa *et al.* (2008). Estes autores reforçam que, nesses solos, a gênese do caráter coeso está relacionada com a iluviação de argila.

Desse modo, partiu-se da hipótese que os compostos de baixa cristalinidade (principalmente sílica e alumínio) influenciam a gênese do caráter coeso, podendo ser um fator primário ou secundário na pedogênese, promovendo um maior adensamento e coesão desses solos. Diante disso, o objetivo do presente estudo foi avaliar a contribuição

dos compostos de baixa cristalinidade na gênese e no comportamento físico dos horizontes com caráter coeso por meio de análises físicas (porosidade do solo, obtida por meio tomografia computadorizada de raios-X; resistência do solo à penetração e densidade do solo) em amostras desses solos na presença e na ausência desses compostos. Objetivou-se também verificar se ocorre um acúmulo de compostos de baixa cristalinidade nos horizontes com caráter coeso em relação aos horizontes sem o caráter coeso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção dos perfis e caracterização geral dos solos

O trabalho foi desenvolvido com amostras de solos de diferentes áreas dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil, utilizando-se solos desenvolvidos dos sedimentos da Formação Barreiras, onde as características típicas do caráter coeso foram previamente identificadas (Tabelas 1, 2 e 3); (Figura 1). No presente estudo, foram utilizadas amostras dos horizontes com caráter e dos horizontes não coesos subjacentes e subjacentes a estes.

Tabela 1 – Informações sobre os perfis dos solos com horizontes com caráter coeso

PERFIL	ESTADO	LOCAL	CLIMA*	AUTOR	CLASSE DE SOLO	HORIZ COESO/ PROF
Perfil 1	Ceará	Aquiraz	Aw -Tropical quente sub- úmido	Menezes, 2016	ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico típico	Bt1: 81-129 cm
Perfil 2	Bahia	Cruz das Almas	Af -Tropical úmido	Souza, 2002	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico	BA: 42-60 cm
Perfil 3	Pernambuco	Goiana	Aw -Tropical quente sub- úmido	Andrade, 2014	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirredóxico	Bt1 : 48-70 cm
Perfil 4	Ceará	Trairi	BSw'h'- Tropical quente semiárido brando	Vieira et al. 2012	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abruptico	Bt1: 142-170 cm

* Segundo a Classificação de Koppen

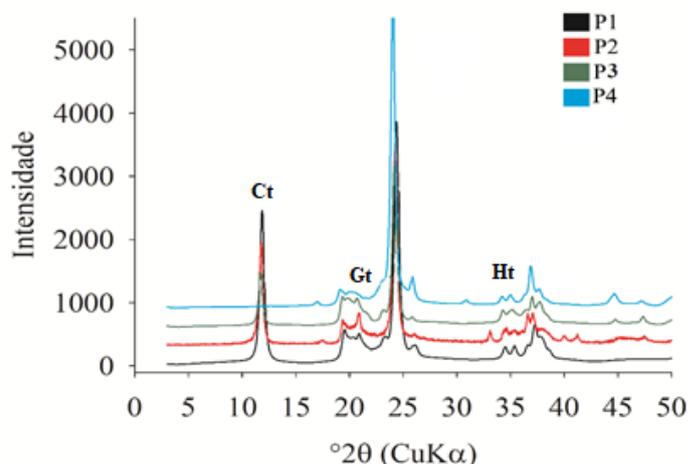
Tabela 2- Atributos físicos e químicos dos horizontes com caráter coeso

PERFIL	ATRIBUTOS FÍSICOS				ATRIBUTOS QUÍMICOS			
	Areia	Silte	Argila	Argila dispersa em água (ADA)	Classe Textural	pH em (H ₂ O)	CTC	V
	-----g Kg ⁻¹ -----						(cmol _c kg ⁻¹)	(%)
Perfil 1	656	91	253	6	Franco argilo arenosa	5,2	2,9	45,6
Perfil 2	644	71	285	35	Franco argilo arenosa	4,1	5,9	23,4
Perfil 3	650	27	323	15	Franco argilo arenosa	4,9	4,7	17,7
Perfil 4	794	76	130	20	Franco arenosa	5,0	3,2	54,0

Tabela 3- Descrição morfológica dos solos

PERFIL	LOCAL	CLASSE DE SOLO	HORIZONTE	DESCRIPTIVO MORFOLÓGICO
Perfil 1	Aquiraz- CE	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	BE	67-81 cm; bruno-forte (7,5YR 5/6); franco-arenosa; moderada média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
			Bt1 (coeso)	81-129 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/6); franco-argiloarenosa; maciça blocos subangulares; extremamente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
			Bt2	129-171 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/8); franco-argilo arenosa; moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
Perfil 2	Cruz das Almas - BA	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico	AB	21-42 cm; bruno amarelado (10YR 5/4 seco.) e bruno amarelado escuro (10YR 4/4 úmido); fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso, transição plana e difusa.
			BA(Coeso)	42-60 cm; bruno amarelado (10YR 5/4, seco) e bruno amarelado escuro (10YR 4/4 úmido); fraca pequena e média blocos subangulares; muito duro; friável, plástico e pegajoso, transição plana e difusa.
			Bt1	60-85 cm; bruno bruno amarelado (10YR 5/4, seco), e bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido); argilo-arenoso; fraca pequena e média em blocos subangulares; duro; friável, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
Perfil 3	Goiana -PE	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirodóxico	BE	30 – 43 cm, (10 YR 6/3, úmida); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; muitos poros pequenos e médios; muito friável, não plástica e não pegajosa, transição plana e clara.
			Bt1 (coeso)	43 – 70 cm, (10 YR 6/4); argilo-arenosa; maciça e partes, fraca pequena e média blocos subangulares; poros comuns pequenos e poucos médios; Muito dura; friável com partes firmes, plástica e pegajosa, transição plana e gradual.
			Bt/Btw	70 – 135 cm, (10 YR 7/6), mosqueado abundante, médio e distinto (5 YR 6/6); argilo-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares; muitos poros pequenos e poucos médios; muito friável com partes muito firmes (mosqueados), plástica e pegajosa, transição plana e difusa.
Perfil 4	Trairi -CE	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto	EB	105-142 cm, bruno (10YR 5/3, úmida) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seca); areia-franca; moderada médio blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástica e não pegajosa, transição plana e abrupta.
			Bt1 (coeso)	142-170 cm, cinzento-brunado-claro(10YR 6/2, úmida) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seca) mosqueado grande pouco proeminente de cor vermelho (2,5YR 5/6); franco-arenosa; maciça com tendência a formação de blocos subangulares; extremamente duro, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e gradual
			Bt2	170 cm+, cinzento-brunado-claro(10YR 6/2, úmida) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seca) mosqueado médio proeminente de cor vermelho (2,5YR 5/6); franco-arenosa; moderada médio blocos subangulares; duro a muito duro, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Figura 1- Espectros de difratometria de raios-X da fração argila natural dos solos estudados. Ct: caulinita; Gt: goethita. Ht: Hematita



2.2 Características gerais das áreas de estudo

2.2.1 Ceará- Aquiraz (Perfil P1)

O município de Aquiraz localiza-se na porção nordeste do estado do Ceará, pertencendo à Região Metropolitana de Fortaleza. O clima de Aquiraz é do tipo Aw (Tropical quente sub-úmido) com pluviometria média de 1.379,9 mm, com chuvas concentradas de janeiro a maio. A temperatura média da região varia entre 26° a 28°C. A vegetação é caracterizada como Complexo Vegetacional da Zona Litorânea (IPECE,2018).

2.2.2 Bahia - Cruz das Almas (Perfil P2)

O clima de Cruz das Almas, de acordo com a classificação de Köppen, enquadra-se no tipo Af (clima tropical úmido ou equatorial). A pluviosidade média anual é de 1.200 mm, sendo os meses de março a julho os mais chuvosos e outubro e janeiro os mais secos, com temperatura média anual de 24,2 °C. A vegetação é a floresta tropical subperinifólia subcaducifólia (INMET,2018).

2.2.3 Pernambuco – Goiana (*Perfil P3*)

O município de Goiana está localizado no extremo nordeste do estado de Pernambuco. O clima de Goiana é considerado tropical (do tipo Aw, segundo classificação de Köppen), e a média anual das temperaturas é de 24,9 °C, chegando aos 31 °C no verão e ficando abaixo dos 20 °C no inverno. A precipitação média anual é de 1.924 milímetros, concentrados principalmente no inverno, entre março e julho, com uma pequena estação seca entre outubro e dezembro. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e cerrado/ floresta (CPRM, 2005)

2.2.4 Trairi (*Perfil P4*)

O clima da região do município de Trairi é, segundo classificação de Köppen, BSw'h', caracterizado como tropical quente semiárido brando, com precipitação pluviométrica média de 1204 mm (FUNCEME, 2015), com chuvas concentradas de janeiro a abril, e temperaturas média anual de 24 °C a 28 °C. A vegetação natural é do tipo Mata de Tabuleiro (vegetação estacional subperenifólia) (IPECE, 2018).

2.3 Avaliação dos agentes químicos envolvidos na coesão

Para tal avaliação, foram utilizados os horizontes com caráter coeso e os horizontes sobrejacentes e subjacentes a estes.

2.3.1 *Potencial Hidrogeniônico (pH)*

Foram realizadas medições do pH em H₂O na proporção 1:2,5 no método do efeito do eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido.

2.3.2 *Quantificação de compostos de baixa cristalinidade ou amorfos (Fe, Si e Al).*

A determinação dos compostos de baixa cristalinidade foi realizada pelo método do oxalato de amônio. Esse método baseia-se na afinidade em meio ácido para formação de complexos coloidais após a dissolução dos óxidos e oxi-hidróxidos amorfos do solo (Fe, Al e Si), permanecendo inalterados os argilo-minerais cristalinos (EMBRAPA, 1997). Para a extração, foram misturados 700 ml de (NH₄)₂C₂O₄.H₂O 0,2 mol L⁻¹ e 530

ml de $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ para obtenção da solução usada, a qual teve o pH ajustado (com ácido oxálico) para o valor 3,0. A extração foi realizada no escuro, agitando-se 0,5g de terra fina seca ao ar (TFSA) e 20 ml da solução durante 4 horas (MCKEAGUE; DAY, 1966). Em seguida, o material foi centrifugado e o sobrenadante armazenado em frascos escuros para determinação dos teores de silício e alumínio, por espectrofotometria de emissão atômica.

2.4 Ensaio experimental para avaliação do comportamento físico dos solos com caráter coeso após a extração de compostos de baixa cristalinidade (Si e Al “amorfos”)

2.4.1 Tomografia Computadorizada de raios-X

Para avaliar as mudanças no espaço poroso dos solos, foi montado um experimento em laboratório, no qual foram utilizadas amostras de TFSA dos horizontes com caráter coeso dos perfis selecionados para o estudo. As amostras foram divididas em dois tratamentos: (i) Tratamento SE: sem extração de compostos de baixa cristalinidade e (ii) tratamento CE: com extração de compostos de baixa cristalinidade.

No tratamento CE foi realizada a extração dos compostos de baixa cristalinidade (Si e Al “amorfos”) com solução de oxalato ácido de amônio, conforme McKeague e Day (1996). Os solos contidos nos tubos da centrífuga foram lavados com água destilada, centrifugados novamente até que o sobrenadante se apresente límpido, posteriormente, foram colocados em béqueres e secos em estufa a 45°C . Os materiais dos dois tratamentos (SE e CE) foram colocados em tubos de PVC de 5 cm de altura e 2 cm de diâmetro, previamente forrados com tecido na extremidade inferior (Figura 2). Posteriormente, os tubos foram colocados em uma bandeja e as amostras submetidas a seis ciclos de umedecimento e secagem (VIEIRA *et al.*, 2012).

Após o último ciclo, as amostras dos dois tratamentos foram submetidas ao escaneamento em Microtomógrafo Computadorizado de Raios - X (Figura 3). Para cada amostra foram realizadas 3 repetições. O micromógrafo utilizado foi o modelo 1172 de fabricação da SkyScan, instalado no Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP. A partir do conjunto de imagens tomográficas de cada amostra foi selecionada uma região de interesse (ROI) circular, no centro das imagens para evitar efeitos de borda (Figura 4).

A porosidade foi obtida por meio do processo de segmentação entre as fases aérea e sólida no qual é selecionado um thresholding que corresponde ao valor médio entre os picos principais do ar e da fase sólida no histograma de coeficientes de atenuação linear da imagem total (3-D) (LASSO, 2011). Este processo produz uma imagem binária 3-D da ROI selecionada (VOI).

Figura 2- (A) Detalhe dos tubos com amostras de solo utilizadas no experimento. (B) Amostras durante o processo de umedecimento / saturação com água destilada. (C) Amostras em estufa para o processo de secagem.

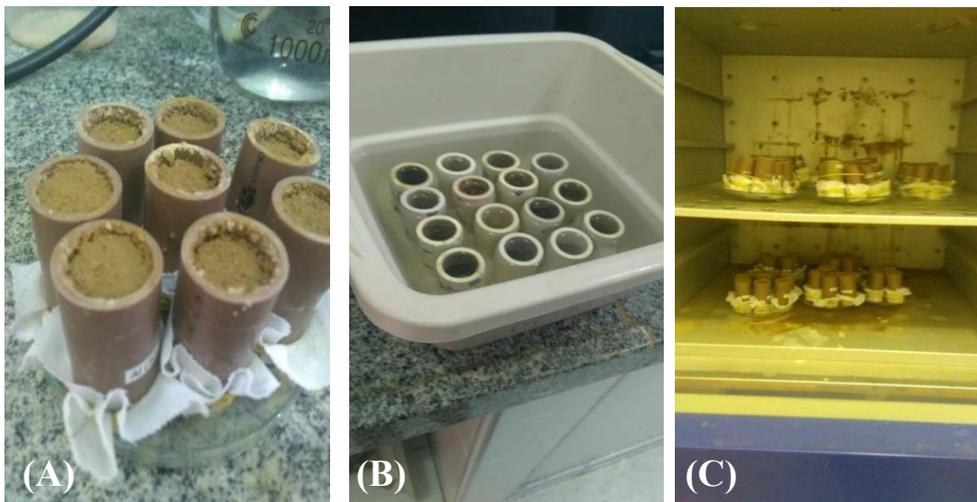
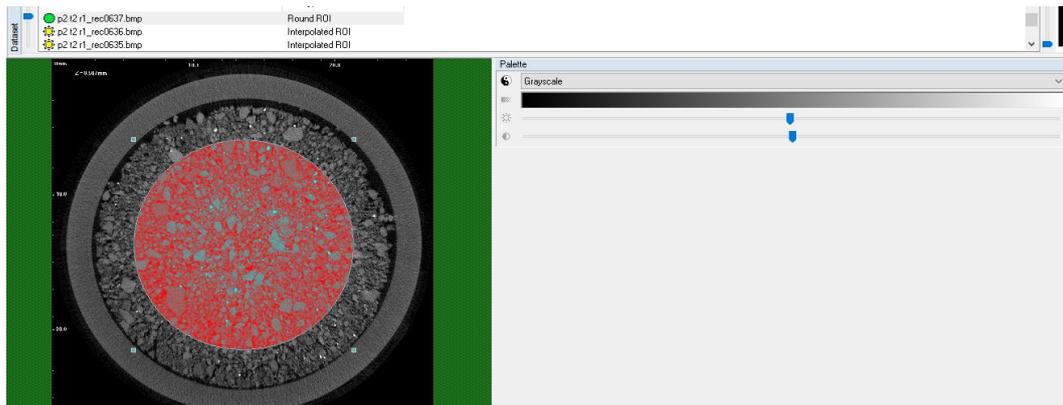


Figura 3- Amostras de solos prontas para serem escaneadas no Microtomógrafo



Figura 4- Tela do software CTAn da SkyScan com exemplo de região de interesse (ROI) selecionada para análise.



2.4.2 Resistência do solo à penetração

Para a determinação da resistência do solo à penetração, também foram utilizadas amostras de TFSA dos horizontes com caráter coeso. As amostras foram divididas em dois tratamentos (conforme item anterior): (i) Tratamento SE: sem extração de compostos de baixa cristalinidade e (ii) tratamento CE: com extração de compostos de baixa cristalinidade. Os materiais dos dois tratamentos foram colocados em tubos de PVC de 5 cm de altura e 2 cm de diâmetro, previamente forrados com pano em uma das extremidades. Para cada amostra foram realizadas 4 repetições. Posteriormente, os tubos foram colocados em uma bandeja e as amostras submetidas a seis ciclos de umedecimento e secagem (VIEIRA *et al.*, 2012). Após esse processo, a resistência à penetração foi determinada nas amostras utilizando-se penetrômetro eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m.min}^{-1}$ (Figura 5), equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena *et al.* (1998).

Figura 5 – Determinação da resistência do solo à penetração em amostra do experimento



2.4.3 Densidade do solo

Após a determinação da resistência do solo à penetração, a densidade do solo foi determinada nas amostras dos dois tratamentos, pela metodologia descrita em Blake e Hartge (1986). No laboratório, as amostras foram colocadas em estufa com temperatura de 105°C por aproximadamente 48 horas. Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa, colocadas em um dessecador e depois pesadas, sendo a densidade do solo obtida pela seguinte expressão:

$$\rho_s \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa do solo seco}}{\text{volume total do solo}}$$

2.5 Análise Estatística

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x2. O primeiro fator corresponde aos diferentes tipos de solos (Perfis). O segundo fator corresponde aos tratamentos: i) sem extração “SE”; ii) com extração “CE”. Os dados da quantificação do silício e alumínio, da resistência à penetração, porosidade e densidade foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e posteriormente, quando significativos, submetidos ao teste de comparação de médias de Tukey (5%) utilizando software ASSISTAT versão 7.7 beta (pt). As relações entre esses parâmetros foram analisadas pelo coeficiente de correlação de Pearson (r).

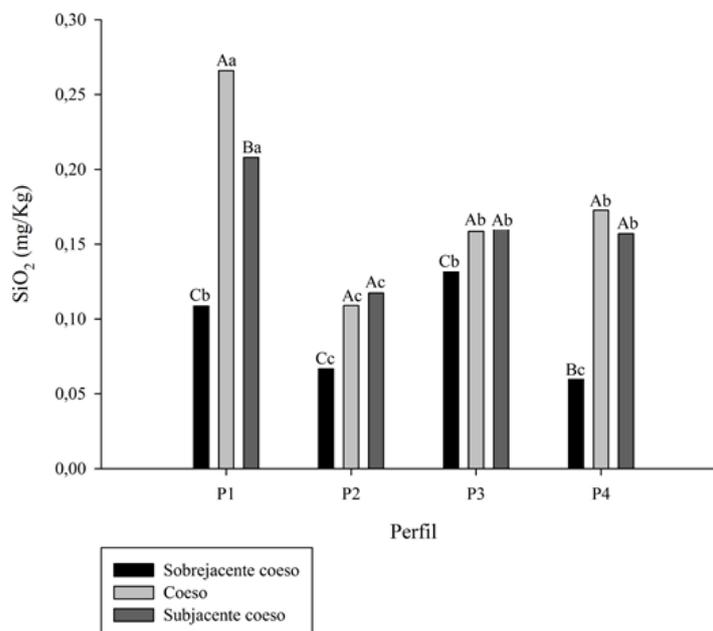
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Silício e alumínio extraídos pelo oxalato de amônio

O oxalato de amônio extrai sílica, alumínio e ferro (Sio, Alo e Feo) em meio ácido (pH 3), proveniente de fases não cristalinas e/ou de baixo grau de cristalinidade em solos. Seletivamente dissolve alumínio e sílica (Alo e Sio) de fases como alofana e imogolita, assim como ferro (Feo) de hidróxidos de ferro de baixa cristalinidade, como ferrihidrita, bem como extrai alumínio (Alo) de fases orgânica (PANSU. M, 2006)

Em todos os perfis estudados, houve um incremento de Sio nos horizontes com caráter coeso em relação aos horizontes superiores a estes (figura 6). O maior teor de sílica de baixa cristalinidade foi observado no horizonte com caráter coeso do perfil P1 (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO), havendo diferença significativa ($p > 0,05$) entre esse horizonte e os horizontes sobrejacente e subjacente a este (não coesos) (Figura 6).

Figura 6 – Teores médios de SiO₂ de baixa cristalinidade (Sio) extraídos por oxalato de amônio. Médias seguidas da mesma letra minúscula (entre perfis) e maiúscula (entre horizontes do mesmo perfil) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Dessa maneira, é provável que esta sílica esteja sendo transportada dentro do perfil e acumulada nos horizontes coesos, sendo esse transporte facilitado devido à textura mais arenosa dos horizontes superiores ao coeso (KORNDÖRFER *et al.*, 2005). Quando chega ao horizonte coeso esse transporte é dificultado, visto que este horizonte apresenta pré-condição de baixa permeabilidade (mais argiloso) e um maior teor areia fina (BEZERRA *et al.*, 2015), o que favorece o acúmulo de Si nesse horizonte. Com este acúmulo, ocorre um aumento da concentração de Si, favorecendo, dessa forma, a precipitação e polimerização deste constituinte. Quando esse fenômeno ocorre entre superfícies próximas, a sílica polimerizada pode formar pontes entre as partículas do solo, aumentando a coesão (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

Nos perfis P3 e P4 houve uma tendência de acréscimo de Sio nos horizontes com caráter coeso em relação aos horizontes subjacentes, porém não houve diferença estatística (Figura 6). Segundo Lima *et al.* (2006) e Bezerra (2010), nos horizontes não coesos existem regiões mais adensadas que ressaltam pedogênese que pode contribuir para a formação de uma camada coesa no futuro. Dessa maneira, é possível que os horizontes não coesos (subjacentes) que apresentaram elevados teores de Sio possam estar em desenvolvimento de um horizonte adensado, sendo necessários estudos mais apurados para a confirmar tal hipótese.

Comparando os teores de Sio entre os horizontes com caráter coeso dos diferentes perfis, observou-se que os teores são similares no perfil P3 e P4, apresentando uma média de 0,177 mg/kg nos horizontes coesos (Figura 6). O horizonte coeso do perfil P2 apresentou a menor média nos teores de SiO₂ (0,109 mg/kg) em relação aos demais horizontes coesos estudados, enquanto o Perfil P1, apresentou o maior teor de sílica (0,266 mg/kg) (Figura 6). Cabe ressaltar que no presente estudo, os maiores teores de Sio não foram observados nos solos com maiores quantidades de argila, não apresentando correlação significativa entre esses dois fatores ($r = 0,1$; $p < 0,05$).

Entre os horizontes do mesmo perfil, observa-se que, proporcionalmente, a maior diferença nos teores de Sio ocorreu entre os horizontes EB e Bt (coeso) do perfil P4 (ARGISSOLO ACINZENTADO), onde o horizonte com caráter coeso apresenta, aproximadamente 3 vezes mais sílica de baixa cristalinidade em relação ao horizonte subjacente (Figura 6). Esse fato pode estar relacionado ao processo de ferrólise sofrido no horizonte EB (em condições pretéritas), visto que o mesmo possui evidências que o solo passou por condições de hidromorfismo (mudança textural abrupta, cor acinzentada e presença de mosqueados) (Tabela 3). No processo da ferrólise, a estrutura do mineral

na interface sólido/solução acaba sendo rompida, liberando Si e Al em solução e, os quais podem ser transportados para o horizonte inferior e se combinar, resultando em neoformação de minerais. Segundo Rückert (1992), os processos redox influenciam a dinâmica do Si, quando os óxidos de Fe estão presentes. De acordo com o mesmo autor, ocorre uma liberação adicional de Si durante ciclos de encharcamento e secagem do solo, onde ocorre variações do potencial redox.

É provável que o incremento de silício em profundidade, principalmente nos horizontes com caráter coeso, seja originado do transporte desse elemento dentro do perfil (conforme citado anteriormente) ou proveniente de áreas mais altas da paisagem e acumulada nos horizontes com caráter coeso. Segundo estudos recentes, locais mais baixos da paisagem, favorecem o processo de acumulação de alguns constituintes, como argila e/ou sílica pouco cristalina. Provavelmente, a sílica é “lixiviada” de uma parte mais elevada da paisagem podendo ser (re-) precipitada em outras partes (mais baixas). (VIEIRA *et al.*, 2012). De acordo com Dantas *et al.* (2014) a posição na paisagem onde o horizonte com caráter coeso se encontra pode ser determinante para a distinção dos graus de coesão, sendo aqueles desenvolvidos em pedofoma côncava os que apresentaram a maior expressão do caráter coeso.

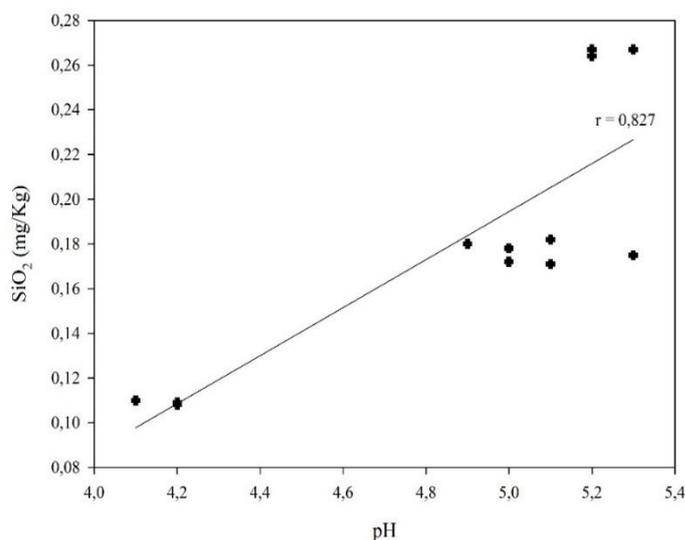
Pesquisas mostram que a maioria das acumulações de sílica são relatadas em climas que mostram uma estação seca distinta (recente ou relíquia). Nesse caso, o preenchimento do Si nos horizontes do subsolo durante as estações úmidas pode ser endurecido por repetidas dessecações nas estações secas (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001). Se esse processo continuar por mais tempo, pode haver o desenvolvimento de horizontes cimentados (TORRENT *et al.*, 1980; CHARTRES, 1985; CHADWICK *et al.*, 1987a, b)

É importante destacar que a solubilidade da sílica de baixa cristalinidade é influenciada pelo pH do solo, mas constante entre pH 2,5 e 8,5 (DOVE, 1995), bem como pela presença de óxidos de Fe e Al (adsorção na fase sólida) (CORNELIS *et al.*, 2011). Sabe-se que a sílica é muito solúvel em meio alcalino, conseqüentemente pouco solúvel em meio ácido (CASSETI, 2005). Apesar dos horizontes coesos estudados apresentarem uma leve acidez, apresentando uma variação de pH entre 4,1 e 5,2, foi observada correlação positiva entre os teores de Si_o e os valores de pH nos horizontes com caráter coesos (Figura 7).

Esses dados sugerem que a sílica de baixa cristalinidade apresenta certa solubilidade mesmo não sendo em meio mais alcalino. Segundo Oehler (1979), essa forma de sílica (de baixa cristalinidade) é mais solúvel do que a sílica cristalina, sendo no

mínimo 10 vezes mais solúvel que o quartzo, podendo ser mais atuante na cimentação dos solos (DREES *et al.*, 1989).

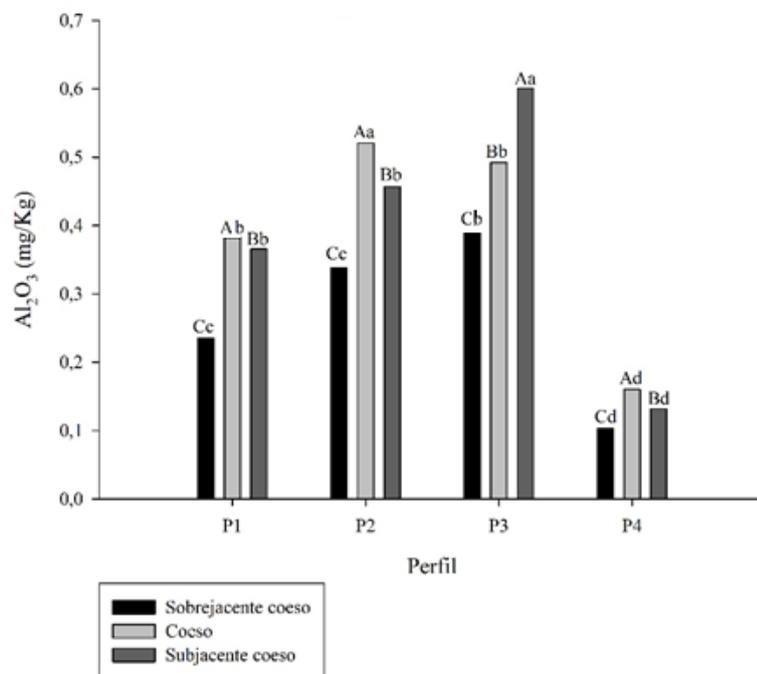
Figura 7- Correlação entre os teores de silício de baixa cristalinidade e pH do solo



Em relação aos teores de alumínio de baixa cristalinidade (Al₀), pode-se observar que, com exceção do perfil P4 (ARGISSOLO ACINZENTADO), os teores desse elemento foram superiores aos valores encontrados de Si₀ (Figura 8). No horizonte com caráter coeso do perfil P2, o valor de Al₀ foi aproximadamente cinco vezes maior que o teor de Si₀ nesse mesmo horizonte. Esses maiores teores de alumínio podem ser atribuídos devido a sua baixa mobilidade no solo (Ribeiro, 1998).

Duarte (2015), estudando solos dos Tabuleiros Costeiros, observou que em condições de pH próximos e inferiores a 5 ocorre um incremento na taxa de solubilização do alumínio, aumentando assim a competição desse elemento com os cátions de outros elementos para os locais de troca nos minerais argilosos e matéria orgânica. O Al é solúvel tanto em meio ácido quanto em ambientes alcalinos, apresentando baixa solubilidade em meio neutro. No presente estudo, não houve uma correlação significativa entre os valores de pH e os teores de Al₀ obtidos nos horizontes coesos ($r = -0,585$). Porém, nota-se que os maiores teores de Al₀ foram observados em solos com menores valores de pH (P2 e P3).

Figura 8- Teores médios de Al_2O_3 de baixa cristalinidade extraídos por oxalato de amônio. Médias seguidas da mesma letra minúscula (entre perfis) e maiúscula (entre horizontes do mesmo perfil) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade



Nos Perfis P1 (ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO), P2 (ARGISSOLO AMARELO e P4 (ARGISSOLO ACINZENTADO) os teores de Al_2O_3 foram significativamente superiores ($p > 0,05$) nos horizontes com caráter coeso em relação aos horizontes não coesos (Figura 8). No perfil P3 (ARGISSOLO AMARELO), os maiores teores de alumínio foram observados no horizonte subjacente ao horizonte com caráter coeso. Comparando as médias dos teores de Al_2O_3 entre os perfis, pode-se notar que os maiores teores desse elemento foram encontrados no horizonte com caráter coeso do perfil P2 (horizonte BA) e no horizonte Bt (subjacente ao coeso) do perfil P3, apresentando valores médios de 0,521 mg/kg e 0,601, respectivamente. Os menores teores de Al_2O_3 foram observados no perfil P4 – Argissolo Acinzentado (figura 8).

Os fragipãs localizados nos Tabuleiros Costeiros, apresentaram maiores proporções de compostos aluminosos (ROMERO, 2003), enquanto os fragipãs localizados na depressão sertaneja, os principais agentes cimentantes são os compostos silicosos. No presente estudo, houve um claro e significativo aumento nos valores de sílica e alumínio pouco cristalinos nos horizontes com caráter coeso, nos quais o Al é o

elemento que participa em maior quantidade nas fases amorfas relacionadas aos agentes cimentantes (com exceção do perfil P4).

De acordo com Moreau (2001), o alumínio possui contribuição nos mecanismos de endurecimento, visto que este elemento encontra-se associado à sílica, e em solos com soluções ricas nesses elementos, ocorre co-precipitação de ambos, os quais, devido às suas afinidades químicas, podem formar aluminossilicatos e hidroxialuminossilicatos (DOUCET et al., 2001). É importante ressaltar que alumínio também influencia na solubilidade da sílica (JONES e HANDRECK, 1963). Na faixa ácida, que é a reação do domínio dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, mesmo em quantidades muito baixas (traços), o alumínio favorece a precipitação da sílica coloidal, facilitando a formação de compostos silico- aluminosos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

Cabe ressaltar que, embora os teores de Al tenham sido superiores em relação aos do SiO₂, o aumento de Al do horizonte não coeso para o coeso se deu de forma mais discreta nos solos, enquanto os acréscimos de SiO₂ nos horizontes coesos foram mais notáveis (Tabela 4). Exemplificando essa afirmação, constatou-se um aumento de 144% SiO₂ no horizonte coeso do perfil P1 e 180% no horizonte coeso do perfil P4 em relação aos horizontes não coesos sobrejacentes. Enquanto os acréscimos nos teores de alumínio nesses horizontes coesos foram de 62% e 55%, respectivamente nos perfis P1 e P4, em relação aos horizontes não coesos (Tabela 4). De acordo Drees *et al.* (1989), embora que a SiO₂ ocorra em menor proporção, pequenos teores desse constituinte podem contribuir com uma coesão temporária maior das partículas, deixando o material duro a extremamente duro quando seco.

Tabela 4- Teores de Al_2O_3 e SiO_2 nos horizontes coeso e não coeso obtidos através de extrações com oxalato de amônio.

PERFIL	HORIZONTE	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2 / Al_2O_3
		-----mg/kg-----'		
P1	BE	0,109	0,235	0,46
	Bt1 (Coeso)	0,266	0,382	0,70
	Bt2	0,208	0,366	0,57
P2	AB	0,067	0,338	0,20
	BA(Coeso)	0,109	0,521	0,21
	Bt1	0,117	0,457	0,26
P3	BE	0,122	0,391	0,31
	Bt(Coeso)	0,180	0,492	0,37
	Bt/Bw	0,178	0,601	0,30
P4	EB	0,060	0,103	0,58
	Bt1(Coeso)	0,173	0,160	1,08
	Bt2	0,140	0,120	1,17

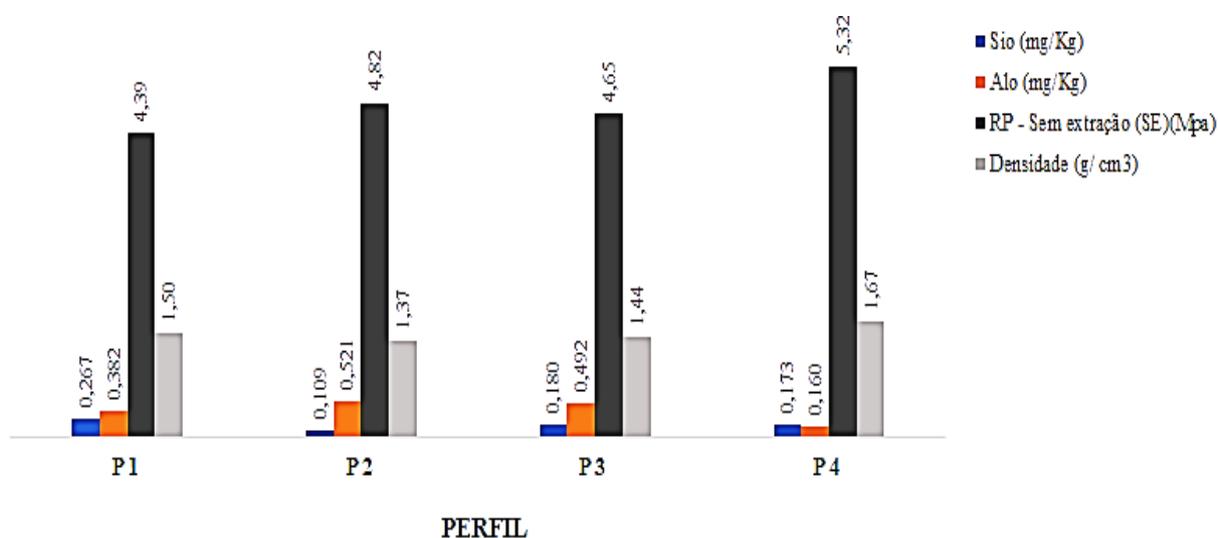
A determinação de concentrações elementares em fases amorfas que atuam como agentes cimentantes e de onde os elementos foram extraídos, não é uma tarefa simples (ARAÚJO FILHO, 2001), fato este, que dificulta o esclarecimento da efetiva participação desses elementos na gênese de horizontes coesos. Contudo, pesquisas realizadas por Vieira et al. (2012) mostraram que a extração de compostos de baixa cristalinidade do solo (Si, Al e Fe), realizada por oxalato de amônio, diminuiu a coesão do solo, quantificada através da resistência do solo à penetração. Em estudo mais recente, Silva (2019) observou que os horizontes com caráter coeso que manifestaram os maiores valores de resistência tênsil foram os que apresentaram também os maiores teores de silício, em comparação aos horizontes sem o caráter coeso.

3.2 Resistência do solo à penetração e densidade do solo

Os maiores valores de resistência do solo à penetração (RP) no tratamento SE (sem extração por oxalato), foram observados nos horizontes coesos dos perfis P2 e P4

(Figura 9). Nota-se que os perfis P1 e P3 apresentam os maiores teores de SiO₂ e Al₂O₃, porém, não apresentam as maiores médias de RP (Figura 9). O maior valor de RP foi encontrado no horizonte coeso do perfil P4, apresentando uma média de 5,3 Mpa, diferindo estatisticamente ($p > 0,05$) dos valores de RP dos demais horizontes com caráter coeso. O horizonte coeso do perfil P2 foi o que apresentou maiores valores de Al₂O₃, porém não apresentou RP superior ao horizonte coeso do perfil P4 (com maiores teores de SiO₂).

Figura 9- Valores médios de Resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo e teores de SiO₂ e Al₂O₃ nos tratamentos SE (sem extração por oxalato).



Nos horizontes com caráter coeso dos perfis P1 e P3, onde não foram encontradas feições pedológicas de iluviação de argila, os agentes químicos (Al₂O₃ e SiO₂) podem ser mais atuantes na coesão desses solos, em detrimento da ação de outros fatores de ordem física. É válido ressaltar que todos os horizontes coesos apresentaram areia pobremente selecionada, fato que permite a formação de um arranjo mais compacto das partículas, favorecendo o acúmulo e precipitação de alguns agentes cimentantes (GIAROLA e SILVA, 2002).

Em solos *hardsetting*, quando a cimentação química complementa os mecanismos físicos como parte do processo de endurecimento observado nesse solo, a sílica pode ser precipitada de várias maneiras: i) pela combinação de íons Al-OH para formar aluminossilicatos pouco cristalinos ou alofanas pobremente ordenadas; ii) pela combinação de Si com óxidos de ferro, como a goethita (associadas as superfícies das

argilas) criando complexos argila-óxido-sílica-óxido-argila; iii) pela adsorção de sílica por hidróxidos de Al para formar pontes Al-O-Si- (FRANZMEIER *et al.*, 1996) . É provável que nos horizontes com caráter coeso dos Tabuleiros costeiros, esses processos ocorram de forma semelhante, dependendo da mineralogia dos solos.

Já os horizontes com caráter coeso dos perfis P2 e P4, a gênese parece sofrer influência da iluviação de argila (conforme abordado no capítulo 1), da presença de compostos de sílica, alumínio e/ ou aluminossilicatos de baixa cristalinidade e ainda da má seleção da fração areia. Como resultado da ação desses três fatores, esses horizontes apresentaram maiores valores de RP do solo, demonstrando assim, um maior grau de coesão. A utilização da resistência à penetração como um atributo quantitativo para a identificação de horizontes com caráter coeso foi sugerida por Giarola *et al.* (2003), tendo em vista que, aliada a outros parâmetros (densidade e porosidade), consiste em uma medida útil na caracterização do comportamento coeso.

Convém ressaltar que os horizontes com caráter coeso dos perfis P2 e P4 são os que apresentaram maiores quantidades de argila dispersa, dentre os perfis estudados (Tabela 2). Segundo Zarei e Stahr (2006), a argila dispersa em água tem relação com a ocorrência de características *hardsetting*, onde constatou-se uma relação entre a argila dispersa em água com a densidade do solo, mostrando que quanto maior a dispersão de argila maior a densidade, explicando a tendência de *hardsetting* dos solos. Desse modo, infere-se que solos com caráter coeso que apresentam maiores quantidades de argila dispersa em água são mais susceptíveis ao processo de argiluviação.

Os dados do presente estudo sugerem que não se pode atribuir unicamente a sílica e/ou alumínio de baixa cristalinidade como fator dominante na formação do caráter coeso, reforçando que a gênese do horizonte coeso é multicausal e que a influência dos processos físicos e agentes químicos no processo de coesão ocorrem de maneira conjunta, podendo em alguns solos, um fator físico ser dominante em relação ao fator químico, ou vice e versa. Porém, não se pode negligenciar a contribuição desses compostos na manifestação da coesão, visto que nos horizontes com caráter coeso, há uma baixa permeabilidade do solo e um fluxo reduzido das soluções, o que favorece a retenção e precipitação da sílica, na época de secagem do solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001; CHADWICK; HENDRICKS; NETTLETON, 1987).

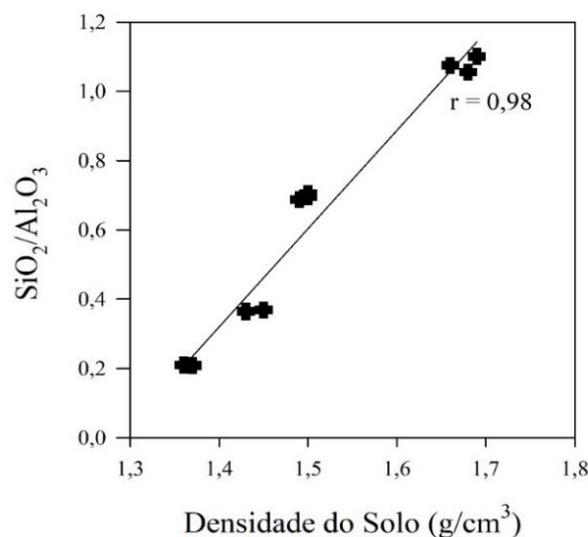
Em relação aos valores de densidade, o horizonte com caráter coeso do perfil P4 foi o que apresentou maior densidade, apresentando um valor de 1,67 g cm³ (Figura 9). Ressalta-se que esse solo apresenta granulometria distinta dos demais perfis (textura

franco arenosa) (Tabela 2), o que confere maior densidade em relação aos demais horizontes coesos, com textura mais argilosa (franco argilo arenosa). Comparando a densidade dos perfis de mesma textura (P1 ao P3), notou-se que o horizonte que apresentou maior densidade foi o horizonte coeso do perfil P1, sendo este, o horizonte que apresentou maiores valores de SiO_2 (Figura 9).

Observou-se ainda, uma correlação entre os valores de densidade do solo e os valores da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Figura 10). Buscou-se com essa relação, uma tentativa de associar o grau de “cimentação” dos horizontes estudados com a densidade do solo, pois Segundo Araújo Filho (2001), os horizontes que apresentam cimentação mais forte, apresentam em geral, teores mais elevados de SiO_2 em relação ao Al_2O_3 , apresentando assim, uma maior relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em comparação aos horizontes que apresentam cimentação mais fraca, onde os teores de Al_2O_3 são maiores que os de SiO_2 .

Comparando os valores da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre os horizontes, observou-se que nos horizontes com caráter coeso dos perfis P1 e P4, essa relação foi superior àquela observada nos demais perfis (Tabela 4). Assim, é provável que a sílica de baixa cristalinidade seja o agente químico mais atuante na coesão observada nos horizontes coesos dos perfis P1 e P4, promovendo, em parte, os elevados valores de densidade observados nesses solos (Figura 9).

Figura 10- Correlação entre os valores de densidade do solo e os valores da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$



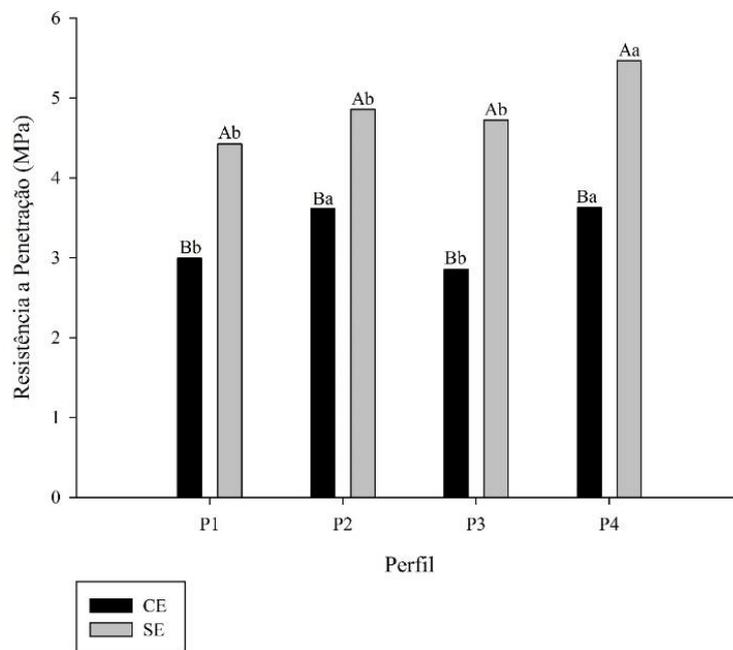
Comparando-se as médias de RP do solo entre os tratamentos SE (sem extração) e CE (com extração), observou-se que, em todos os perfis, os valores de RP diminuíram significativamente ($p > 0,05$) em todas as amostras dos horizontes com caráter coeso em que os compostos amorfos foram retirados (CE) (Figura 11). Nota-se que os menores valores de RP no tratamento CE foram observados nos perfis P1 e P3, apresentando médias significativamente inferiores as amostras dos perfis P2 e P4 (Figura 11).

Segundo Araújo Filho *et al.* (2001), durante o período de secamento do solo, esses compostos se polimerizam e precipitam entre superfícies próximas, ocorrendo a formação de “pontes” entre as partículas do solo, aumentando a coesão. Os maiores valores de RP observados nos solos em que esses compostos pouco cristalinos não foram retirados, evidenciam tal fato.

Estudos realizados em solos da Austrália (CHARTRES *et al.*, 1990; FRANZMEIER *et al.*, 1996) também destacam a sílica de baixa cristalinidade como o principal agente cimentante em solos com comportamento *hardsetting*, correlato ao caráter coeso (GIAROLA; SILVA, 2002). A gênese desses solos está relacionada com o umedecimento e secagem cíclicos do solo, onde a cimentação pode ocorrer também como resultado da liberação da sílica solúvel durante o umedecimento e reprecipitação com o solo seco.

É interessante destacar que nas amostras do tratamento CE dos perfis P1 e P3, houve uma redução da RP do solo de 32 % e 40%, respectivamente, enquanto nos perfis P2 e P4 (que apresentaram as maiores médias de RP no tratamento CE), constatou-se uma redução na RP de 25% e 30%, respectivamente. Os maiores valores de RP encontrados nas amostras do tratamento CE dos perfis P2 e P4 (Figura 11), em detrimento dos valores de RP dos perfis P1 e P3, corroboram mais uma vez com a hipótese que nesses últimos solos, os agentes químicos (Al e So) podem ser mais atuantes na gênese do caráter coeso.

Figura 11- Valores médios dos valores de resistência do solo à penetração nos tratamentos SE e CE. Médias seguidas da mesma letra maiúscula (entre tratamentos) e minúscula (perfis) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



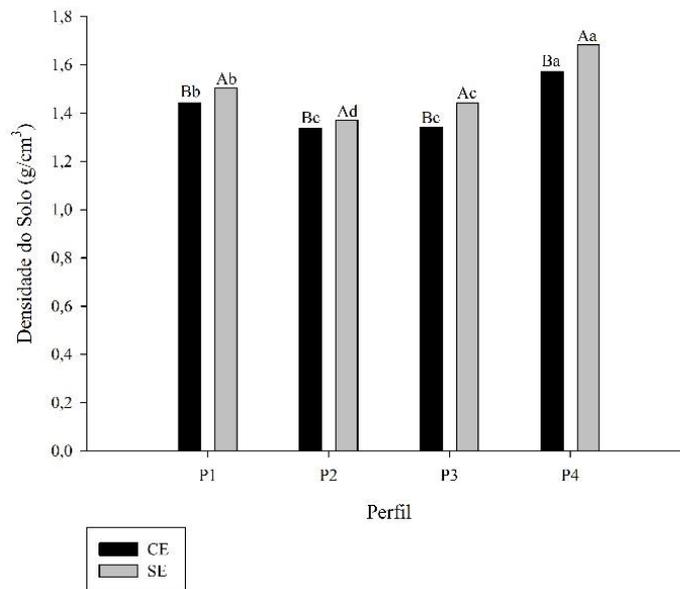
Apesar da RP do solo das amostras reduzirem significativamente ($\rho > 0,05$) após a extração dos compostos pouco cristalinos, os valores obtidos ainda podem ser considerados elevados (Figura 11), pois segundo Mullins (1987), valores de resistência mecânica à penetração do solo entre 2 MPa e 3 MPa resultam em limitações ao crescimento das raízes das plantas, mesmo para conteúdos elevados de umidade do solo. Portanto, é provável que apenas uma extração não removeu completamente esses componentes do solo, sendo necessários estudos mais apurados para avaliação da quantidade de sílica e alumínio presentes após uma extração desses compostos.

Os dados do presente estudo, corroboram com a teoria que o adensamento natural observado nos horizontes coesos, é oriundo da acumulação de materiais finos (CORREA et al., 2008) e do arranjo das partículas (Bezerra et al., 2015), aumentando a microporosidade, e limitando a permeabilidade da solução do solo, que pode favorecer o acúmulo e precipitação de alguns agentes cimentantes temporários (ARAÚJO FILHO et al., 2001).

Comparando densidade do solo entre os tratamentos, nota-se que houve uma redução significativa nas amostras do tratamento CE (Figura 12). Essa diminuição da

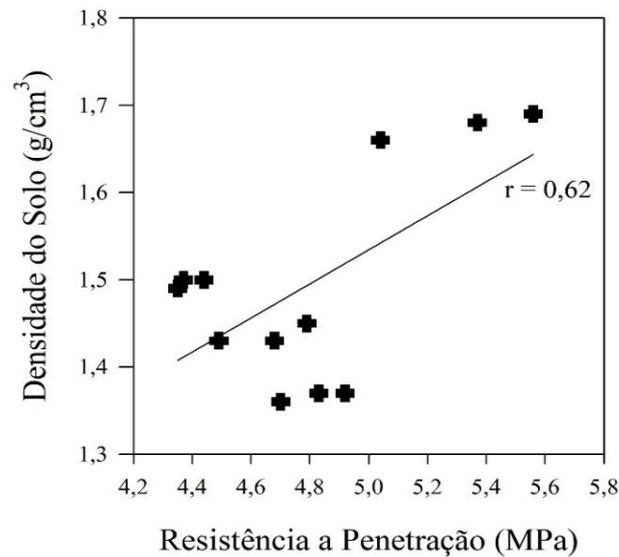
densidade do solo, foi responsável em parte, pelos menores valores de RP encontrados nas amostras que passaram pela extração, visto que a retirada desse material cimentante, provavelmente diminuiu o contato entre as partículas do solo, provocando uma redução da densidade do solo.

Figura12- Valores médios dos valores de resistência do solo à penetração nos tratamentos SE e CE. Médias seguidas da mesma letra maiúscula (entre tratamentos) e minúscula (perfis) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Segundo Lima *et al.* (2005), a resistência do solo à penetração possui forte relação com a densidade do solo, pois altos valores de densidade reduzem a porosidade dos solos, aumentando a resistência mecânica dos mesmos. A correlação positiva e significativa entre os valores de RP e densidade do solo evidenciam essa afirmação (Figura 13). A correlação da densidade do solo com a resistência à penetração são bons indicadores para inferir sobre o funcionamento regular da rede porosa do solo. O aumento dessas duas variáveis afeta o desenvolvimento radicular das plantas em função das limitações de absorção de água e nutrientes, bem como a oxigenação da matriz do solo e o armazenamento de água (MENEZES, 2016).

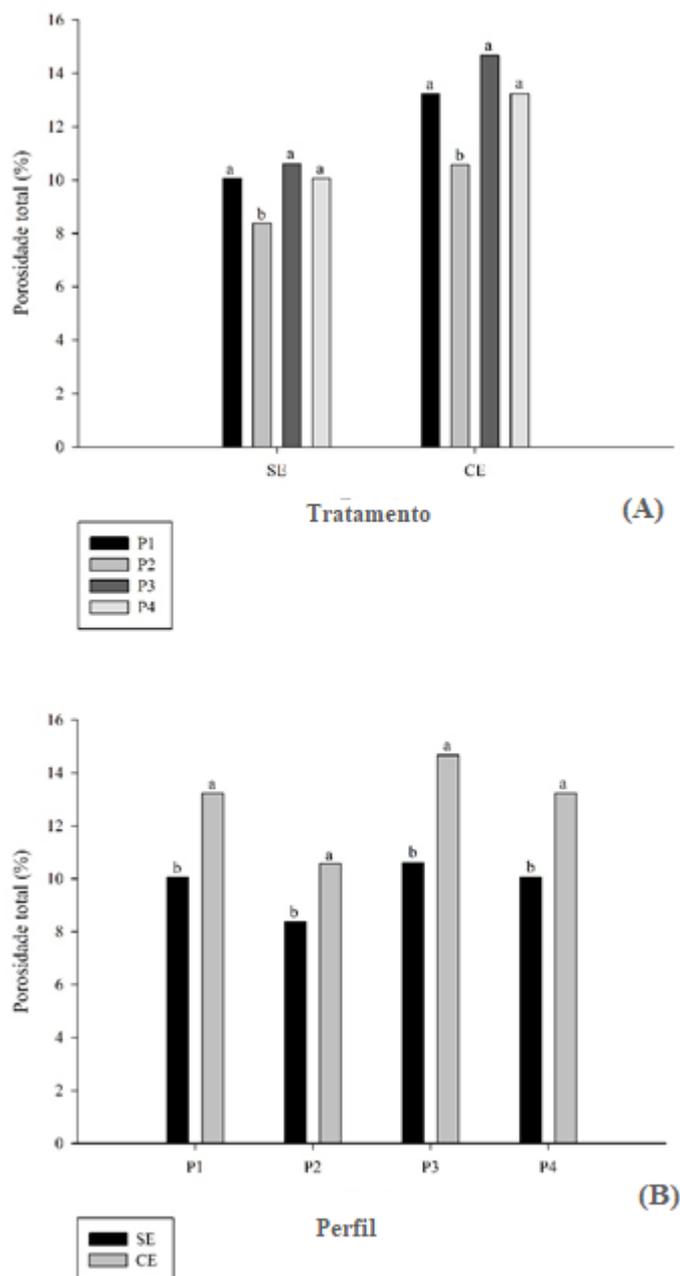
Figura 13 -Correlação entre Resistência do solo à penetração e densidade do solo



3.3 Porosidade do solo obtida por meio de tomografia de raios -X

Quanto à porosidade total do solo, obtida através das imagens da tomografia, a menor porosidade no tratamento SE foi observada no perfil P2, apresentando uma média de 8,3%, sendo significativamente inferior ($p > 0,05$) que as demais médias de porosidade dos horizontes coesos estudados (Figura 14A). Nos perfis P1, P3 e P4, as porosidades observadas foram em torno de 10%, não havendo diferença estatística entre as médias desses horizontes. Esses valores apresentaram-se similares aos valores de porosidade observados por Menezes *et al.* (2018), em horizontes coesos por meio da técnica da micromorfologia.

Figura 14- Valores médios de porosidade, obtida por imagens de tomografia, nos tratamentos SE e CE. (A) Médias seguidas da mesma letra (entre perfis) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (B) Médias seguidas da mesma letra (entre tratamentos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

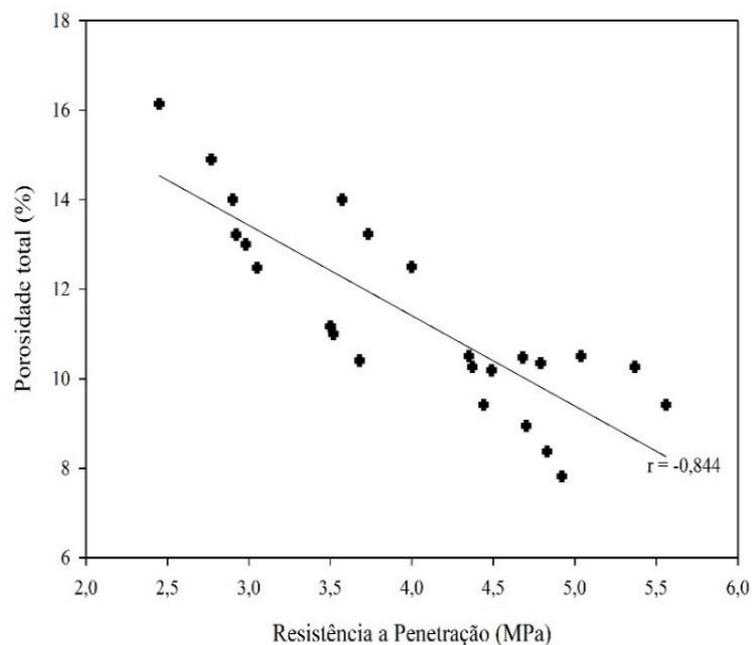


Comparando a porosidade entre os tratamentos SE e CE, observa-se nas amostras do tratamento CE de todos os perfis, um aumento significativo na porosidade dos solos (Figura 14B). Semelhante a porosidade observada na amostra do tratamento SE do perfil P2, a porosidade desse horizonte no tratamento CE, apresentou-se

estatisticamente inferior a porosidade dos demais horizontes. A porosidade das amostras nos tratamentos CE dos perfis P1 e P4, apresentaram um aumento em torno de 30% em relação ao tratamento SE. O maior valor de porosidade foi observado na amostra do tratamento CE do perfil P3 (Figura 14A, 14B), apresentando um valor de 14,6 % de poros, que corresponde um aumento de 41% na porosidade total do solo em relação a amostra do tratamento SE.

Desse modo, pode-se inferir que o processo de extração dos compostos de baixa cristalinidade (Sio e Alo) diminuiu, após os ciclos de umedecimento e secagem, o contato entre as partículas do solo, promovendo assim um menor adensamento, e, conseqüentemente, uma redução na coesão dos solos. Esse fato pode ser evidenciado pela correlação significativa entre a resistência do solo à penetração e a porosidade do solo (Figura 15), onde nota-se que os maiores valores de RP foram observados nos solos com menor porosidade, mostrando assim, que a retirada desses compostos permitiu uma melhoria física nos horizontes com caráter coeso estudados.

Figura 15- Correlação entre os valores de RP e porosidade do solo



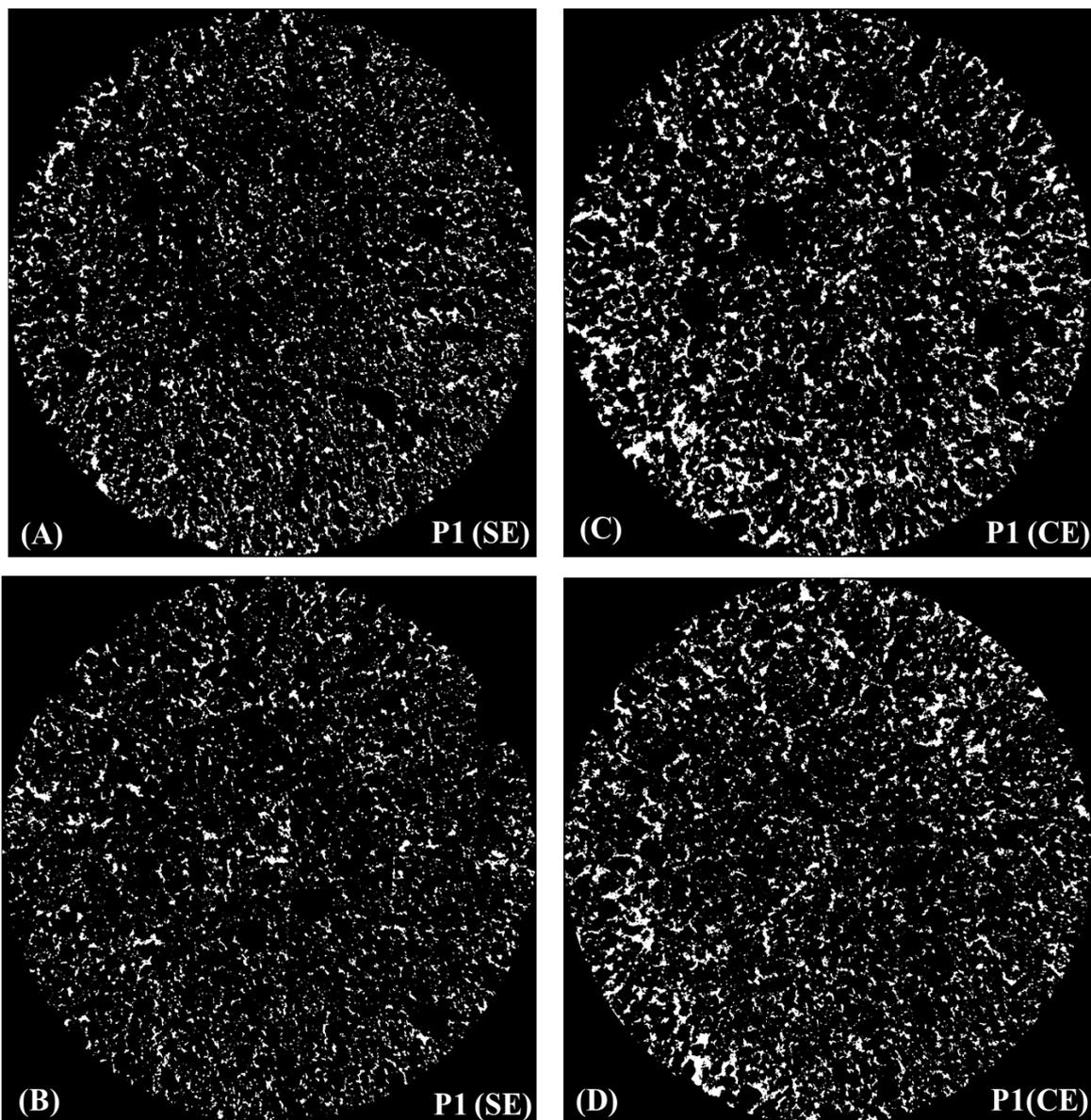
Ressalta-se que, apesar das diferenças morfológicas, químicas e pedoambientais existente entre esses solos, o alumínio e o sílica de compostos de baixa cristalinidade parecem promover, de fato, uma cimentação fraca no solo, aumentando a coesão do solo quando seco. Os dados do presente estudo, evidenciam, mais uma vez, similaridades entre os solos com caráter coeso e solos comportamento *hardsetting* (GIAROLA E SILVA, 2002), visto que estudos realizados em solos da Austrália destacam a sílica de baixa cristalinidade como o principal agente cimentante em solos com comportamento *hardsetting* (CHARTRES *et al.*,1990; FRANZMEIER *et al.*,1996).

As imagens obtidas pelo microtomógrafo evidenciam a notória mudança do espaço poroso do solo (Figuras 16 a 19), nas quais observam-se solos menos adensados nas amostras dos tratamentos CE, com poros maiores, mais alongados e conectados. Segundo Streck (2007), a continuidade de poros é mais importante do que a porosidade, já que poros obstruídos não contribuem para realização da troca de gases entre o solo e a atmosfera.

Em todos os perfis e tratamentos, observou-se o predomínio de poros mais arredondados em detrimento de outros formatos. A análise micromorfométrica realizada nesses solos (Capítulo 1), mostram também a dominância de poros arredondados, principalmente nos solos que apresentaram maior adensamento. Segundo Lima *et al.* (2004), o principal efeito do adensamento observado nos solos com caráter coeso é a criação de poros arredondados médios, em decorrência da redução de poros alongados e desaparecimento de poros complexos.

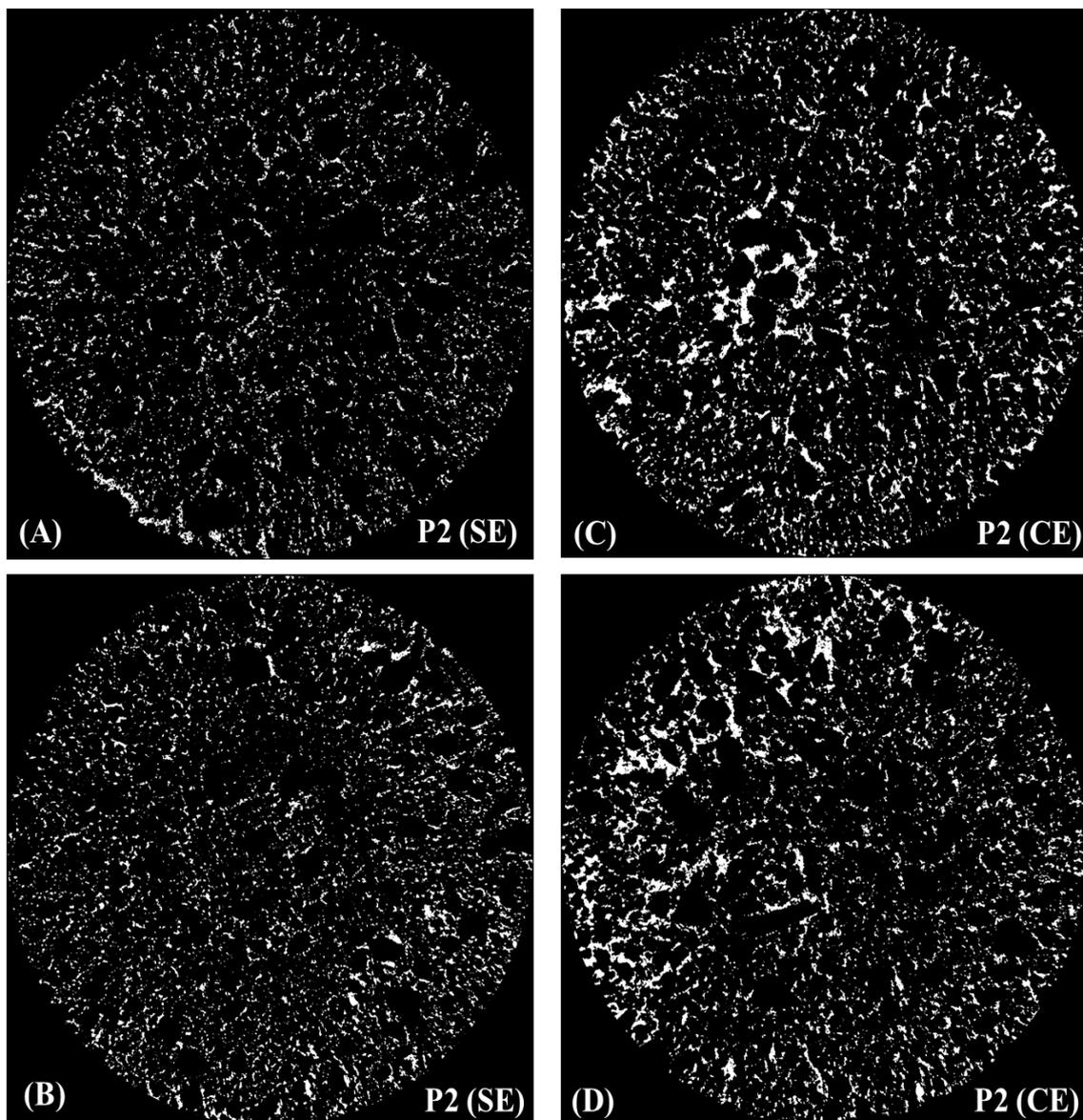
É interessante ressaltar que, apesar das amostras do tratamento CE apresentarem também o predomínio de poros arredondados, após o tratamento da extração dos compostos de baixa cristalinidade, notou-se um aumento de poros mais alongados e conectados (Figuras 20C e 20D). Observou-se também nessas amostras, um aumento na frequência de poros maiores em relação as amostras que não passaram por esse processo (Figuras 20 A e 20B). Corrêa *et al.* (2008) verificaram que os valores de macroporosidade dos horizontes coesos foram significativamente menores do que nos horizontes não coesos, com poros pouco conectados.

Figura 16 -Imagens binarizadas obtidas através de cortes tomográficos no solo do perfil P1 (ARGISSOLO VERMELHO -AMARELO Distrófico típico). Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos. (A), (B): “SE” - Sem extração por oxalato de amônio. (C), (D): “CE” Com extração por oxalato de amônio.



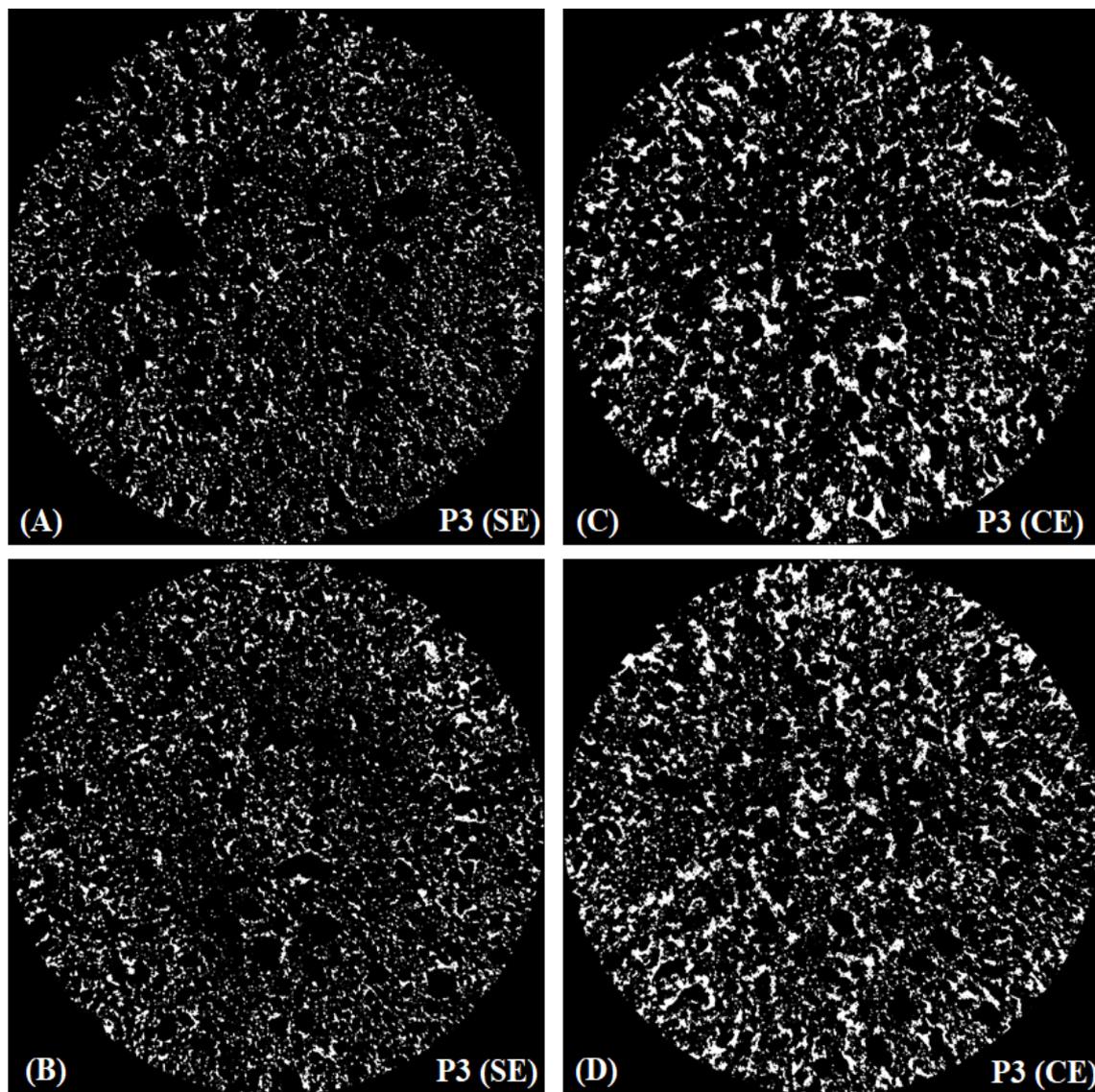
A fase sólida do solo aparece em preto e poros em branco

Figura 17 -Imagens binarizadas obtidas através de cortes tomográficos no solo do perfil P2 (ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico). Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos. (A), (B): “SE” - Sem extração por oxalato de amônio. (C), (D): “CE” Com extração por oxalato de amônio.



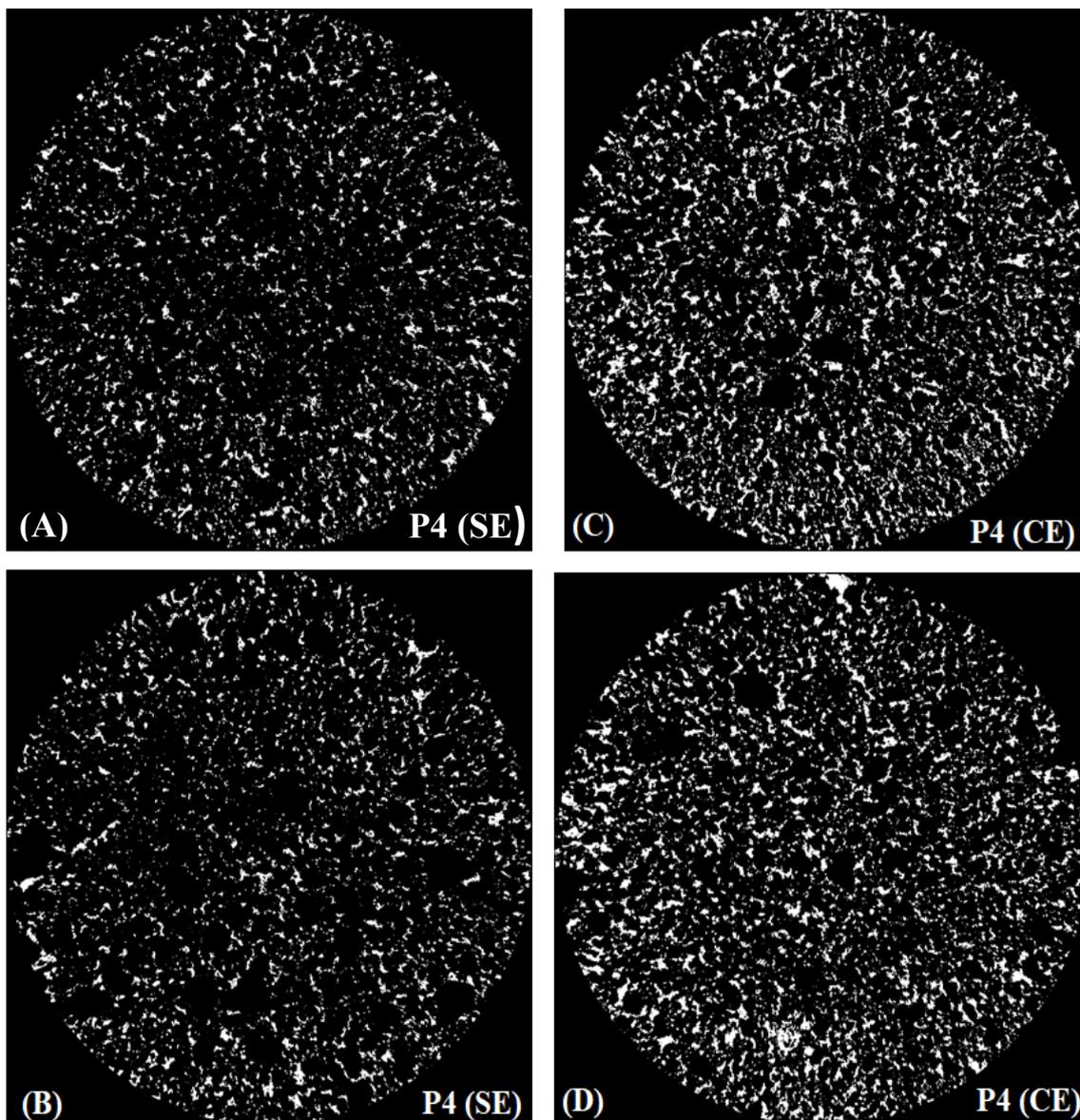
A fase sólida do solo aparece em preto e poros em branco

Figura 18 -Imagens binarizadas obtidas através de cortes tomográficos no solo do perfil P3 (ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirredóxico). Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos. (A), (B): “SE” - Sem extração por oxalato de amônio. (C), (D): “CE” Com extração por oxalato de amônio.



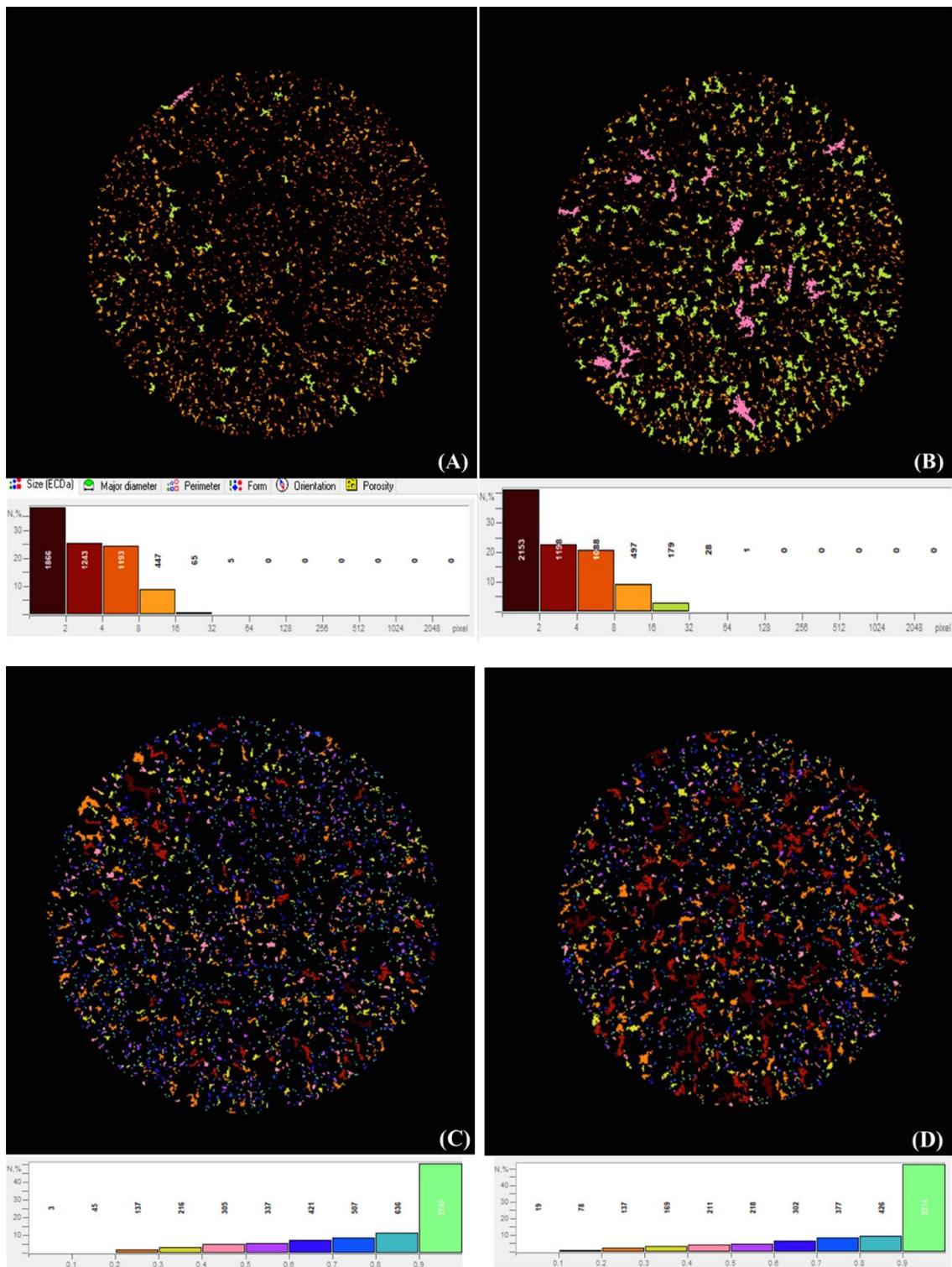
A fase sólida do solo aparece em preto e poros em branco

Figura 19-Imagens binarizadas obtidas através de cortes tomográficos no solo do perfil P4 (ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abruptico). Material do horizonte com caráter coeso submetido aos tratamentos. (A), (B): “SE” - Sem extração por oxalato de amônio. (C), (D): “CE” Com extração por oxalato de amônio.



A fase sólida do solo aparece em preto e poros em branco

Figura 20- Cortes tomográficos de amostras do perfil P3 – ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirredóxico, com destaque no tamanho e forma dos poros. (A), (C): Amostras do Tratamento “SE”. (B), (D): Amostras do Tratamento “CE”.

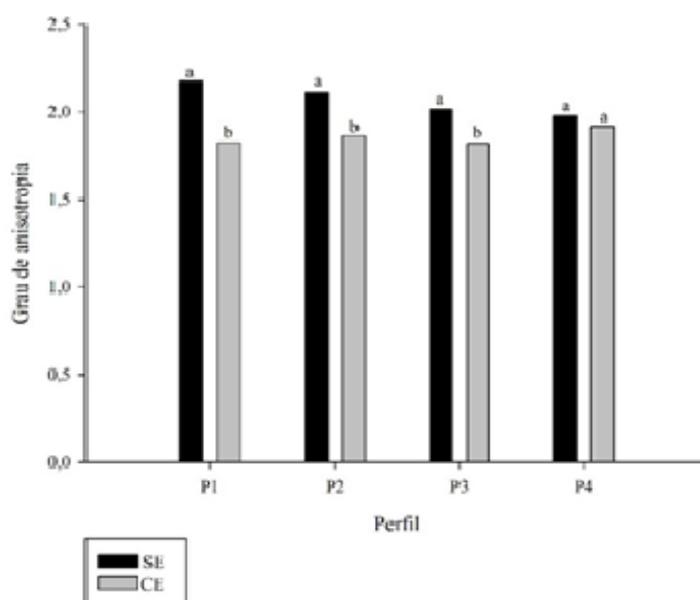


As Figuras A e B referem-se ao tamanho e figuras C e D a forma dos Poros. Nas figuras (A), (B) os maiores poros estão na cor rosa e verde. Nas figuras (C), (D), os poros mais arredondados estão nas cores verde e azul os mais alongados, nas cores laranja e vermelho. Os gráficos referem-se a distribuição do tamanho (A, B) e forma (C e D) dos poros

Um fator peculiar nos horizontes com caráter coeso é a orientação preferencial dos poros alongados tendendo para horizontal (LIMA *et al.*, 2004). O elevado grau de anisotropia dos poros, calculado pelo programa Skycan, demonstram que os poros estão orientados preferencialmente na horizontal (Figura 21), em ambos tratamentos (SE e CE). Segundo Fossen (2018), o volume pode variar na mesma proporção em todas as direções (isotrópico) ou preferencialmente em uma direção (anisotrópico).

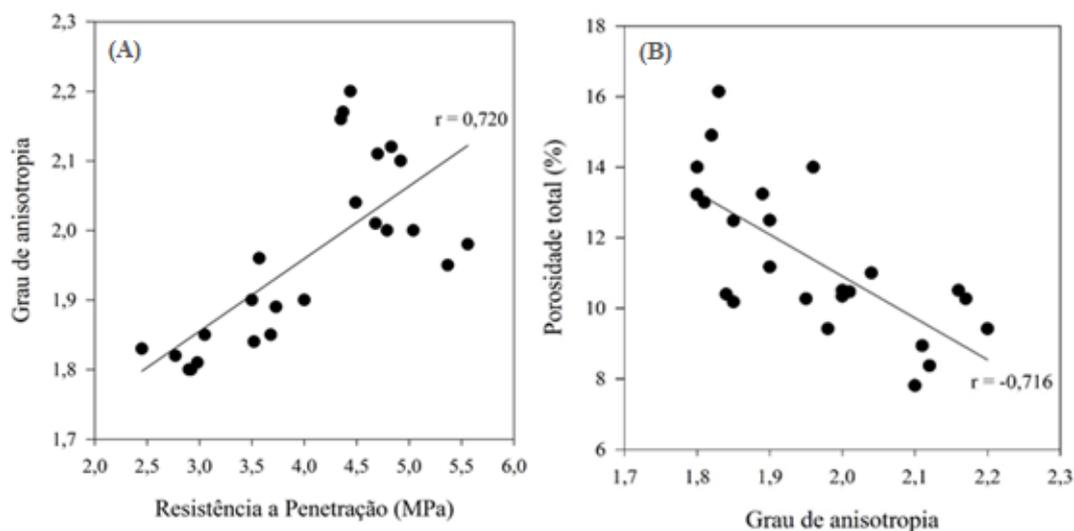
É importante destacar que, com exceção do material do horizonte com caráter coeso do perfil P4, houve diferença estatística no grau de anisotropia dos poros entre os tratamentos aplicados (Figura 21). Como pode-se observar, os maiores valores obtidos do grau de anisotropia dos poros, foram observados nas amostras dos tratamentos SE. Desse modo, além do aumento significativo no volume total dos poros das amostras do tratamento CE, notou-se também uma mudança na forma e tamanho dos poros, sendo estes poros, menos orientados na horizontal.

Figura 21 – Valores médios de anisotropia nos tratamentos CE e SE. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Cabe ressaltar que foram observadas correlações significativas entre o grau de anisotropia dos poros e RP do solo, assim como entre a porosidade total do solo e o grau de anisotropia (Figuras 22A, 22B). Assim, essa mudança na orientação dos poros, resultante da extração dos compostos amorfos, propiciou diferença significativa na resistência do solo à penetração e na porosidade total do solo, onde nota-se que nas amostras com maior grau de anisotropia, o solo apresenta maior RP e menor porosidade. Desse modo, observou-se que nos solos mais adensados, há a predominância de poros que se orientam preferencialmente na horizontal e nos solos menos adensados, o sistema poroso do solo apresentou-se mais conectado, com maior frequência de poros distribuídos no sentido vertical. Com base nos dados acima expostos, infere-se que após a retirada dos compostos de baixa cristalinidade, houve uma melhor estruturação do solo, com o aumento poros complexos e alongados. Saliente-se que poros complexos (principalmente, grandes) indicam melhor estruturação do solo, por estarem interconectados (GENNARO *et al.*, 2015).

Figura 22 – (A) Correlação entre RP do solo e grau de anisotropia dos poros. (B) Correlação entre porosidade total do solo e grau de anisotropia dos poros



Menezes (2016) observou em um dos horizontes coesos estudados, que na posição de coleta na vertical, o valor de resistência do solo à penetração foi significativamente superior quando comparado com a horizontal. Segundo o mesmo autor, horizontes com caráter coeso apresentam funcionalidade de maneira distinta dentro

do perfil do solo, em decorrência da grande quantidade de poros pequenos e por estarem orientados preferentemente na horizontal, fato este, que implica na diminuição da condução de ar e água no perfil de solo.

4 CONCLUSÕES

1- Os acréscimos de silício e alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes com caráter coeso evidenciam que esses compostos contribuem conjuntamente na gênese destes horizontes, onde a sílica tem maior ação cimentante em relação ao alumínio em dois dos solos estudados.

2- Todas as amostras que passaram pelo processo de extração de sílica e alumínio de baixa cristalinidade apresentaram uma melhoria física do solo, apresentando um menor adensamento em relação as amostras que não passaram pela extração desses compostos.

3- As imagens da porosidade, obtidas por meio da técnica de tomografia de raios- X, evidenciaram um aumento do espaço poroso do solo nas amostras dos tratamentos que foram submetidos a extração, onde observa-se solos menos adensados, com poros maiores, mais alongados e mais conectados. Desse modo, ratifica-se a contribuição de compostos de sílica e alumínio de baixa cristalinidade no endurecimento dos solos coesos.

5 REFERÊNCIAS

ARAUJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. e. 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, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.

ATTOU, F; BRUAND, A. Experimental study of fragipans formation in soils. Role of Clay dispersion and wetting-drying cycles. **Earth Planet.Sci.**, v.326, p. 545-552, 1998.

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**, v. 53, p. 43, 2015.

BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, **Letchworth**, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995.

BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A, (ed). **Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods**. Madison: ASA, 1986. p.363-375.

CASSETI, Valter. Geomorfologia. [S.l.]: [2005]. Disponível em:<<http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap3/index.php>>. Acesso em: 20maio2017.

CHADWICK, O.A.; HENDRICKS, D.M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: I.A deposicional model. **Soil Science Society of American Journal**, v.51, p. 975-982, 1987.

CHARTRES, C.J.; NORTON, L.D. Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons. In: **INTERNATIONAL WORKING**.1994.

CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M. ;RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, p.1060–1067, 1990.

CORNELIS J.T. *et al.* Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**. v.8, p. 89-112, 2011.

CORRÊA, M.M. *et al.* 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**, v. 32, p. 297-313, 2008.

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

DIETZEL M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.64,n.19, p.3275-3281,2000.

DOUCET, F.J. *et al.* The formation of hydroxyaluminosilicates of geochemical and biological significance. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, V. 65, N. 15, p. 2461–2467, 2001

DREES, L.R. *et al.* Silica in soils: quartz and disordered sílica polymorps. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B (Ed). **Minerals in soil environments**. 2 ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989, v. 19, p. 913-974.

DUARTE L. R.S **Pedogênese de horizontes com caráter coeso em duas toposssequências nos Tabuleiros Costeiros do Ceará**. 2015. 54p. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DUARTE, M.N. *et al.* Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1237-1250, 2000.

DUCAN, M.M; FRANZMEIER, D.P. Role of free silicon, aluminum, and iron in fragipan formation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 923-929, 1999.

EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS. **Importância econômica dos tabuleiros costeiros nordestinos na agropecuária da região**. Publicado em 26/02/2002. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=artigo_seartigo=291eshowaquisicao=true. Acesso em: 10 jan. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos- CNPS. In: Reunião de Classificação, Correlação e Aplicação de Levantamentos de Solos, 4. 1994, Rio de Janeiro, R.J. **Anais**. Rio de Janeiro: EMPRAPA, SNLCS/SBCS, 1995. 157p .

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006, 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo**. 5. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro, 2018, 356p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.

FRANZMEIER, D. P., NORTON, L. D., STEINHARDT, G. C. Fragipãs Formation in Loess of the Midwestern United States. In: SMECK N. E. e CIOLKOSZ, E. J. **Fragipãs: Their occurrence, Classification, and Genesis**. Wisconsin, USA. SSSA, 1989.p. 69-97.

FRANZMEIER, D.P.; CHARTRES, C.J. ; WOOD, J.T. **Hardsetting** soils in Southeast Australia: Landscape and profile processes. **Soil Science Society of American Journal**, v.60, p.1178-1187, 1996.

FONSECA, O.O.M. **Caracterização e classificação de solos Latossólicos e Podzólicos desenvolvidos nos sedimentos do terciário no litoral Brasileiro**. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986. 185p. (Tese de Mestrado).

GENNARO, L. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M.; CAMPOS, M. C. C. Estrutura do solo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 608-614, 2015.

GIAROLA, N.F.B. *et al.* Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: Estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.239-247, 2001.

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

HUSSEIN, J.; ADEY, M.A. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. **Geoderma**, v.85, p.63-82, 1998.

JACOMINE, P. T. K. Distribuição geográfica, Características e Classificação dos Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros. In:Reunião Técnica sobre Solos dos Tabuleiros Costeiros. **Anais**. Embrapa/UFBA. 1996.p.13-26.

JACOMINE, P.K.T.; MONTENEGRO, J.O.; RIBEIRO, M.R. **Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Sergipe**. Recife: EMBRAPA, 1975. 506p. (Boletim Técnico, 36. Série Recursos de Solos, 6).

JACOMINE, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.19-46.

JONES, L.H.P.; HANDRECK, K.A. Effects of iron and aluminium oxides on silica in solution in soils. **Nature**. V.198, p. 852-853, 1963.

KARATHANASIS, A.D. Mineral solubility relationships in Fragiuudalfs of Western Kentucky. **Soil Science Society of American Journal**, v. 51, p.474-481, 1987.

KORNDÖRFER, G.H.; NOLLA, A.; RAMOS, L.A. Available silicon tropical soils crop yield. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia, **Anais**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005, p.77-84.

KRYC, K.A., MURRAY, R.W., MURRAY, D.W. Elemental fractionation of Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mn, P, and Ba in five marine sedimentary reference materials: results from sequential extractions. **Analytica Chimica Acta**, v. 487, p. 117-128, jul. 2003.

LASSO, P.R.O. **Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e condicionadores de solo**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2001. 124p. (Tese de Doutorado).

- LIMA, H.V *et al.* Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, V.28, p.467-476, 2004.
- LIMA, H. V.; SILVA, A P; ROMERO,R.E . Estabilidade estrutural e argila dispersa em água nos solos com horizontes coesos no Estado do Ceará. In: XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2005, Recife. **XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-1, 2005.
- LIMA NETO, J.A. *et al.* Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1001-1011, 2009.
- LIMA NETO, J.A. *et al.* Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos Tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.473-486, 2010.
- MATICHENKOV, V. V., BOCHARNIKOVA, E. A. (2001): The relationship between silicon and soil physical and chemical properties, in Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Korndörfer, G. H. (eds.): Silicon in agriculture. Studies in Plant Science8, **Elsevier**, Amsterdam, pp. 209–219.
- MATICHENKOV, V. V., SNYDER, G. H. (1996): The mobile silicon compounds in some South Florida soils. **Eurasian Soil Sci.** 12, 1165–1180.
- MENEZES, A.S. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de Tabuleiro Costeiro**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. 75p.
- McBURNETT, S.L; FRANZMEIER, D.P. Pedogenesis and cementation in calcareous till in Indiana. **Soil Science Society of America Journal**. V.61, p. 1098-1104, 1997.
- MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; ASSIS JUNIOR, R.N.; TOMA, R.S.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; COOPER, M.; MOTA, J.C.A. Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, v. 313, p. 290-297, 2018.
- McDONALD, R.C.; ISBELL, R.F.; SPEIGHT, J.G.; WALKER, J; HOPKINS, M.S. **Australian Soil and Land Survey Field Handbook**. 2.ed. Mellbourn: Inkata Press,1990.
- McKEAGUE, J.A., CLINE, M.G. Silica in soil solutions II.The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal Soil Science**. v.43, p.83- 95, 1963b.
- McKEAGUE, J.A., DAY,J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil . **Canadian Journal Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966.
- MOREAU, A.M.S.S. **Gênese, mineralogia e micromorfologia de horizontes coeso, fragipã e duripã em solos dos Tabuleiros Costeiros do Sul da Bahia**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa 2001. 138p. (Tese de Doutorado).

- MOREAU A. M. S. S *et. al.* Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.1021-1030, 2006b.
- MULLINS, C.E. Hardsetting soils. In: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of soil science**. New York, CRC Press, p.G65-G87, 1999.
- MULLINS, C.E.; YOUNG, I.M.; BENGHUH, A.G.; LEY, G.J. Hardsetting soils. **Soil Use and Management**, v.3, p. 79-83, 1987.
- MULLINS, C.E *et al.* Hardsetting soils: behaviour, occurrence and management. **Advances in Soil Science**, v.11, p.37-108, 1990.
- RIBEIRO, L. P. Os Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano: gênese, evolução e degradação. Salvador, **SEPLANTEC, CADCT**, 1998. 99p
- RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju, EMBRAPA-CPATC e CNPMF/EAUFBA / IGUFBA, 1996. p.17-35.
- ROMERO, R.E. **Gênese e Degradação de Duripãs em uma Topossequência dos Tabuleiros Costeiros, Conde - Bahia**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2003. 144p. (Tese de Doutorado).
- SANTANA, M. B.; SOUZA, L. DA 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 do estado da Bahia. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 30, p. 1-12, 2006.
- SANTOS, M.C. Estudos micromorfogógicos aplicados à avaliação da coesão em solos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. P. 67-91.
- SILVA, E.A.; GOMES, J.B.V.; ARAÚJO FILHO, J.C.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. e CURI, N. Morphology, mineralogy and micromorphology of soils associated to summit depressions of the Northeastern Brazilian coastal plains. **Ci. Agrotec**. V. 36, p.507-517, 2012.
- SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional ASSISTAT para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.1, p. 71-78, 2002.
- SILVA. C.P. Gênese do caráter coeso: relação da resistência tênsil com atributos físicos e químicos do solo. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. 64p.

SOMMER, M. (2006). Influence of soil pattern on matter transport in and from terrestrial biogeosystems – a new concept for landscape pedology. **Geoderma**, 2006, Vol.133(1), p.107-123

STRECK, C. A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil**, 2007. 95 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007

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**, v.22, p. 573-581, 1998.

VIEIRA, J.M *et al.* Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. out-dez, 2012.

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. 113p. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CONCLUSÕES GERAIS

A gênese dos horizontes com caráter coeso está relacionada a um mecanismo de “empacotamento” das partículas, facilitado pelo baixo grau de seleção da fração areia nos horizontes estudados. Esse mecanismo ocorre naturalmente com os ciclos de umedecimento e secagem do solo, os quais, à medida que são incrementados, proporcionam uma redução significativa da porosidade do solo. Fato este, que permite a formação de um arranjo mais compacto que favorece a deposição da argila nos poros, podendo também favorecer o acúmulo e precipitação de alguns agentes cimentantes.

O aumento na quantidade dos ciclos de umedecimento e secagem também favoreceu o processo de translocação e iluviação de argila, provocando o entupimento dos poros, e, conseqüentemente, um aumento na coesão do solo. A presença de feições de iluviação de argila em dois dos perfis estudados (P2 e P4), sugerem que a argila iluvial está relacionada à gênese dos solos com caráter coeso. A ausência de feições de iluviação de argila no material de dois perfis (P1 e P3) indicam que, nesses solos, elementos químicos, como o silício e alumínio, podem ser mais atuantes na gênese do caráter coeso, em detrimento aos fatores físicos.

Os acréscimos de silício e alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes com caráter coeso evidenciam que esses compostos contribuem conjuntamente na gênese destes horizontes, onde a sílica tem maior ação cimentante em relação ao alumínio em dois dos solos estudados. Todas as amostras que passaram pelo processo de extração de sílica e alumínio de baixa cristalinidade apresentaram uma melhoria física do solo, apresentando um menor adensamento em relação as amostras que não passaram pela extração desses compostos. Desse modo, ratifica-se a contribuição de compostos de sílica e alumínio no endurecimento dos solos coesos.

Desse modo, a gênese do caráter coeso é multicausal e a influência dos fatores físicos e agentes químicos no processo de coesão ocorrem de maneira conjunta, podendo em alguns solos, um fator físico ser dominante em relação ao fator químico, ou vice e versa.