



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

CILLAS POLLICARTO DA SILVA

GÊNESE DO CARÁTER COESO: RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÊNซิล COM
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

FORTALEZA

2019

CILLAS POLLICARTO DA SILVA

GÊNESE DO CARÁTER COESO: RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÊNซิล COM
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de Concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

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)

S579g Silva, Cillas Pollicarto da.
Gênese do caráter coeso: relação da resistência tênsil com atributos físicos e químicos do solo / Cillas Pollicarto da Silva. – 2019.
65 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Tabuleiros Costeiros. 2. Grau de seleção de areias. 3. Silício. 4. Alumínio. I. Título.

CDD 664

CILLAS POLLICARTO DA SILVA

GÊNESE DO CARÁTER COESO: RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÊNซิล COM
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de Concentração: Pedologia.

Aprovada em: 11/04/2019.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida (Coorientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dr. Alcione Guimarães Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Valdenir Antônio e Paula Francinete, que na sua simplicidade, com ensinamentos, sempre me mostraram o valor da educação, das virtudes e da prática de boas ações.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela vida e por mais uma batalha vencida;

À minha família: Paula Francinete (mãe), Valdenir Antônio (pai), Veruska Dalila (irmã) e Valquiria Dalila (irmã) pelo incentivo, confiança, amor, ajuda e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso;

À minha namorada, Edja Micaella Araújo dos Santos, pelo amor, compreensão, incentivo, atenção e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos;

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do doutorado;

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pela concessão da bolsa de estudo e ao Projeto Pró-Integração (nº55/2013) que viabilizou, em parte, a realização desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela excelente orientação, amizade e presteza ao longo desses anos;

Aos professores do Departamento de Ciências do Solo, pelos ensinamentos transmitidos em suas disciplinas;

Aos membros da banca de avaliação desse trabalho;

Aos membros da equipe técnica e amigos de toda hora: Thiago Leite, Márcio Godofredo, Lucas Oliveira, Alexandre dos Santos e Ícaro Vasconcelos, pela amizade e auxílio na realização das coletas e análises dos solos;

Aos amigos do Departamento de Ciências do Solo: Gustavo Henrique, Gleiciane Silva, Edilaine Marques, Arilene Franklin, Vanessa Ohana, Carlos Eduardo, Alessa Milena, Ademir Menezes, Luís Felipe, Rafaela Batista, Alcione Guimarães, Kaio Gráculo, Zé Filho, Tancio Ailan e à aluna de graduação Mirla Almeida, pela estimada amizade;

Aos técnicos de laboratório: Deyse Maia, Franzé, Fátima Rêgo, Crisanto, Tavares, Amilson, pela ajuda na realização de algumas análises;

Aos supervisores dos laboratórios de Física do Solo, Pedologia, Manejo do Solo e Química do Solo, por terem colaborado com a disponibilização dos espaços e equipamentos para as realizações das análises;

Aos servidores técnico-administrativos do Departamento de Ciências do Solo/UFC, pela amizade;

Aos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A gênese do caráter coeso em horizontes é atribuída a vários processos, muitos dos quais ainda não completamente esclarecidos, daí a necessidade de mais estudos em busca de sua elucidação. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a contribuição do tamanho dos constituintes da fração areia, do silício, alumínio e ferro associados a compostos mal cristalizados na cimentação de horizontes coesos, bem como definir a variabilidade da resistência tênsil dentro do mesmo horizonte do solo. Nos estados do Ceará, Pernambuco e Bahia, foram selecionados em seis perfis de solos os horizontes com e sem caráter coeso, nos quais foram coletadas amostras de solos no topo, meio e base em blocos com dimensões de 15 x 20 x 10 cm de largura, comprimento e altura, respectivamente. Do material coletado foram obtidos os agregados/torrões, com os quais foram realizados os ensaios de resistência tênsil e, posteriormente, granulometria com fracionamento das areias e densidade do solo. Adicionalmente, foram quantificados os teores de carbono orgânico total, bem como de silício, ferro, alumínio constituindo óxidos de baixa cristalinidade. A análise dos dados foi realizada considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 x 2 x 3 (seis solos, dois graus de coesão, três posições no perfil) com cinco repetições. Para a análise de variância foi aplicado o teste F e para a comparação de médias o teste de Tukey a 5% de significância. A relação entre a resistência tênsil e frações areia, silte e argila, foi mensurada por análise de regressão (considerando o modelo de regressão linear) e de correlação. Foi empregado o teste t, a 5% de significância, para avaliar os coeficientes angular (b) e de correlação (r). Quanto aos resultados, observou-se que em todos os horizontes (com e sem caráter coeso) a fração areia foi predominante, definindo com as frações silte e argila texturas que variaram de franco argiloarenosa a argiloarenosa. Com relação ao fracionamento das areias, observou-se para os horizontes investigados no estado do Ceará, e nas três posições nos horizontes (topo, meio e base), o predomínio de areia fina seguido de média, grossa e muito fina; para os horizontes analisados nos estados de Pernambuco e Bahia, nas posições topo, meio e base, constatou-se o predomínio de areia média, seguido de fina, grossa, muito fina e muito grossa. Quanto aos valores de resistência tênsil, esses apresentaram-se maiores para os horizontes coesos, chegando a valores médios de 49,9 kPa, seguidos pelos valores para não coesos (média de 34,1 kPa). No tocante aos teores de silício e alumínio, eles apresentaram-se maiores para os horizontes com caráter coeso, já o ferro não seguiu mesma tendência. Concluiu-se que a resistência tênsil está associada diretamente com a coesão do solo. No tocante à granulometria, ela não explica sozinha a gênese do caráter coeso, porém a má seleção dos grãos

da fração areia concorre para o empacotamento de partículas mais adensado, resultando em aumento significativo para a coesão dos agregados/torrões. Os teores de silício e alumínio associados a compostos mal cristalizados contribuem para a gênese da coesão como atributo diagnóstico. Há variabilidade da resistência tênsil, principalmente nos horizontes descritos com o caráter coeso, com redução da coesão do topo para a base do horizonte.

Palavras-chave: Tabuleiros Costeiros. Grau de seleção de areias. Silício. Alumínio.

ABSTRACT

The genesis of the cohesive character in soil horizons is attributed to several processes, many of which have not yet been fully clarified, hence the need for further research aiming at its elucidation. The present study aimed to evaluate the contribution of the size of sand fraction constituents and of silicon, aluminum and iron associated with poorly crystallized compounds to the cementation of cohesive horizons, as well as to define the variability of tensile strength within the same soil horizon. In the states of Ceará, Pernambuco and Bahia, horizons with and without cohesive character were selected in six soil profiles and samples in the form of blocks (15 cm wide x 20 cm long x 10 cm high) were collected at their top, middle and base positions. Aggregates/clods were obtained from the collected material and subjected to the tests of tensile strength and, subsequently, particle size with sand fractionation, and soil density. In addition, the contents of total organic carbon, as well as silicon, iron and aluminum constituting poorly crystalline oxides were quantified. Data analysis was carried out considering a completely randomized design, in a 6 x 2 x 3 factorial arrangement (six soils, two degrees of cohesion, three positions in the profile), with five replicates. F test was used in the analysis of variance and Tukey test at 5% significance level was used for means comparison. The relationship between tensile strength and sand, silt and clay fractions was measured by regression analysis (considering the linear regression model) and correlation analysis. T test at 5% significance level was used to evaluate the angular (b) and correlation (r) coefficients. As for the results, it was observed that in all horizons (with and without cohesive character) the sand fraction was predominant, defining along with the fractions silt and clay textures that ranged from sandy clay loam to sandy clay. Regarding sand fractionation, the horizons investigated in the state of Ceará, at the three positions (top, middle and base), showed predominance of fine sand followed by medium, coarse and very fine sand; horizons analyzed in the states of Pernambuco and Bahia, at the top, middle and base positions, had predominance of medium sand, followed by fine, coarse, very fine and very coarse sand. In regard to tensile strength, the values were higher in cohesive horizons, reaching 49.9 kPa, followed by the values of non-cohesive horizons (mean of 34.1 kPa). Silicon and aluminum contents were higher in horizons with cohesive character, but iron did not follow the same trend. It was concluded that tensile strength is directly associated with soil cohesion. In relation to particle size, it does not explain by itself the genesis of the cohesive character, but the poor selection of the grains of the sand fraction contributes to the denser packing of particles, resulting in a significant increase in the cohesion of aggregates/clods. Silicon and aluminum contents associated with poorly crystalline compounds

contribute to the genesis of cohesion as a diagnostic attribute. There is variability of tensile strength, especially in the horizons described with the cohesive character, with reduction of cohesion from the top to the base.

Keywords: Coastal Tablelands. Degree of selection of sands. Silicon. Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização dos pontos de coleta dos solos	24
Figura 2	– Detalhe do umedecimento dos blocos em laboratório	26
Figura 3	– Valores médios da fração areia nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	32
Figura 4	– Valores médios da fração silte nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	33
Figura 5	– Valores médios da fração argila nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	35
Figura 6	– Distribuição das areias nos solos do Ceará dos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – PVAd, Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto – PAex e Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico – PAex. Valor phi (ϕ) de -1,00 a 0 (areia muito grossa); de 0 a 1,00 (areia grossa); de 1,00 a 2,00 (areia média); de 2,00 a 3,25 (areia fina); e de 3,25 a 4,24 (muito fina)	37
Figura 7	– Distribuição das areias nos solos de Pernambuco e Bahia dos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirodóxico – PAdx, Latossolo Amarelo Alumínico argissólico – LAa e Latossolo Amarelo Distrocoeso típico – LAdx. Valor phi (ϕ) de 1,00 a 0 (areia muito grossa); de 0 a 1,00 (areia grossa); de 1,00 a 2,00 (areia média); de 2,00 a 3,25 (areia fina); e de 3,25 a 4,24 (muito fina)	40

Figura 8	– Valores médios de densidade do solo nos horizontes com e sem caráter coeso dos solos avaliados (PVAd, PAex abruptico, PAex típico, PAdx, LAa e LAdx)	42
Figura 9	– Valores médios de densidade do solo nos horizontes com e sem caráter coeso dos solos avaliados (PVAd, PAex abruptico, PAex típico, PAdx, LAa e LAdx)	43
Figura 10	– Valores médios da resistência tênsil nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	45
Figura 11	– Correlação e regressão da resistência tênsil com todos os dados de areia (A), silte (B) e argila (C) para os solos avaliados	47
Figura 12	– Valores médios de silício (SiO_2) extraído por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	51
Figura 13	– Valores médios de ferro (Fe_2O_3) extraído por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	53
Figura 14	– Valores médios de alumínio (Al_2O_3) extraídos por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Granulometria e classes texturais dos solos	24
Tabela 2	– Descrição morfológica dos horizontes dos solos	25
Tabela 3	– Análise de variância para os dados de areia, silte e argila	30
Tabela 4	– Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia ($\mu \pm$ desvio padrão) e grau de seleção segundo Folker e Ward (1957) para horizontes com e sem caráter coeso dos solos do Ceará	38
Tabela 5	– Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia ($\mu \pm$ desvio padrão) e grau de seleção segundo Folker e Ward (1957) para horizontes com e sem caráter coeso dos solos de Pernambuco e Bahia	41
Tabela 6	– Análise de variância para os dados de ferro, alumínio e silício	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Ambiente de formação de solos com caráter coeso	15
2.2	Gênese do caráter coeso em solos	16
2.3	Atributos de horizontes com caráter coeso	17
2.4	Resistência tênsil: relação com atributos físicos e químicos	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Área de estudo	23
3.2	Coleta das amostras e preparo dos agregados/torrões	23
3.3	Análises físicas	26
3.3.1	<i>Resistência tênsil</i>	26
3.3.2	<i>Granulometria, fracionamento da areia e densidade do solo pelo método do torrão parafinado</i>	27
3.4	Análises químicas	28
3.4.1	<i>Silício, alumínio, ferro de baixa cristalinidade extraídos por oxalato de amônio; e carbono orgânico total</i>	28
3.5	Análise dos dados	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Análise de variância e dados médios da fração areia, silte e argila	30
4.2	Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia por tamanho e grau de seleção, densidade do solo e teor de carbono orgânico	36
4.3	Densidade do solo e carbono orgânico total	41
4.4	Resistência tênsil: correlação e regressão com areia, silte e argila	44
4.5	Análise de variância e dados médios de ferro, alumínio e silício extraídos por oxalato de amônio	48
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Algumas particularidades em horizontes de solos da faixa dos Tabuleiros Costeiros são observadas principalmente no que diz respeito à consistência que, quando secos, apresenta-se de muito dura a extremamente dura, passando a friável ou firme quando úmidos. No Brasil, os primeiros registros desse comportamento foram feitos por volta de 1950 no levantamento de solos do Estado do Rio de Janeiro, em que foram observados horizontes de solos com forte resistência à penetração do martelo pedológico.

Esse comportamento já é empregado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), com o termo “caráter coeso” e é utilizado como atributo diagnóstico para classificar solos até o terceiro nível categórico. Esse caráter é de natureza pedogenética, sendo constatado geralmente nos horizontes AB e/ou BA, e/ou parte do Bw ou Bt, em profundidades que variam de 30 a 70 cm ou mais, em material de textura argilosa, argiloarenosa, franco argiloarenosa e franco arenosa, com predomínio de caulinita na fração argila e essencialmente quartzo na fração areia, sendo também pobre em ferro e com avançado estágio de intemperização.

A gênese do caráter coeso não foi totalmente elucidada e algumas pesquisas indicam que atributos de ordem físicas e químicas podem ser responsáveis pela manifestação do referido caráter. No tocante aos atributos físicos como possíveis causadores do caráter coeso, tem-se a possibilidade de que fração areia com grãos mal selecionados concorre para empacotamento de partículas mais adensado, contribuindo significativamente para manifestação do caráter coeso. Já para os atributos químicos, relaciona-se que compostos de baixa cristalinidade envolvendo material com ferro, alumínio e silício atuam como agentes de cimentação, em que no período seco tais compostos passam por processo de polimerização e precipitação, promovendo a máxima expressão do caráter coeso.

Alguns parâmetros têm sido utilizados como formas de identificação do caráter coeso. Particularmente, a resistência tênsil – definida como a força por unidade de área necessária para causar ruptura dos agregados/torrões – vem sendo empregada para mensurar o efeito de agentes cimentantes em horizontes com o caráter coeso.

Face ao exposto, foram consideradas as hipóteses de que 1) a coesão em solos apresenta correlação direta com a resistência tênsil dos agregados/torrões, 2) o caráter coeso é dependente da má seleção da fração areia, da contribuição de silício, alumínio e ferro associados a compostos mal cristalizados, e 3) há variabilidade significativa da coesão dentro do horizonte de solo.

Desse modo, objetivou-se com esta pesquisa avaliar a contribuição do tamanho dos constituintes da fração areia, do silício, alumínio e ferro associados a compostos mal cristalizados na cimentação de horizontes coesos, bem como definir a variabilidade da resistência tênsil dentro do mesmo horizonte do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ambiente de formação de solos com caráter coeso

O ambiente de formação de solos com caráter coeso está relacionado com os depósitos sedimentares argilosos, argiloarenosos e arenosos, que no Brasil são associados à Formação Barreiras, pertencente à unidade geomorfológica denominada de Tabuleiros Costeiros, que se estende por quase toda faixa litorânea, desde o estado do Amapá até o Rio de Janeiro (JACOMINE, 2001). A expressão Tabuleiro Costeiro faz menção à topografia predominantemente plana com suaves ondulações que são bem características nesse ambiente (CORRÊA *et al.*, 2008; CINTRA *et al.*, 2009).

Geologicamente, essa unidade geomorfológica (Tabuleiro Costeiro) teve sua formação no período Terciário, sob climas áridos e semiáridos, sendo que no final do período Pleistoceno houve uma alternância do clima para quente e úmido; foi nesse período que originou-se a Formação Barreiras por meio de uma grande transgressão marinha que promoveu a erosão do pacote sedimentar que, a priori, está contida na unidade geomorfológica (SUGUIO *et al.*, 1985; DUARTE *et al.*, 2000).

As principais classes de solos encontradas nos Tabuleiros Costeiros são os Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, sendo que os Espodossolos, Argissolos Acinzentados, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos também são encontrados nesse ambiente, porém, com menor expressão (EMBRAPA, 1995; JACOMINE, 1996). No tocante às classes dos Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, por vezes apresentam um comportamento diferenciado em condições naturais, principalmente nos horizontes transicionais AB e, ou, BA, podendo atingir o Bw ou Bt – o caráter coeso (LIMA *et al.*, 2004).

Esse tipo de comportamento do solo foi incluído ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) por meio da criação e utilização do atributo diagnóstico “caráter coeso”, ressaltando a diferença marcante entre o grau de consistência do solo seco e úmido. Esse atributo é pedogenético, expresso pelo adensamento típico de alguns horizontes de solo com textura média, argilosa ou muito argilosa, manifesto normalmente entre 0,30 e 0,70 m de profundidade, podendo atingir 1 metro ou pouco mais, muito comum em solos dos sedimentos terciários da Formação Barreiras (JACOMINE, 2001; LIMA NETO *et al.*, 2009; EMBRAPA, 2018). No estado do Ceará, Lima *et al.* (2004) e Vieira *et al.* (2012) encontraram horizontes com caráter coeso em profundidades maiores, comumente associado ao horizonte Bt de Argissolos.

Contudo, vale salientar que o caráter coeso não se limita apenas aos solos desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras. Conforme Corrêa *et al.* (2008), solos com esse caráter, e que não são formados de sedimentos da Formação Barreiras, podem ser encontrados na região dos Tabuleiros no sul da Bahia, norte do Espírito Santo e nordeste de Minas Gerais. Deve-se frisar ainda que em outras partes do mundo há registros de solos com características similares aos solos com caráter coeso do Brasil, podendo-se destacar a Austrália e o continente Africano, onde são encontrados os *hardsetting*, com atributo correlato ao caráter coeso descrito em solos do Brasil (GIAROLA; SILVA, 2002; GIAROLA *et al.*, 2001).

2.2 Gênese do caráter coeso em solos

O caráter coeso é um atributo de horizontes subsuperficiais de solos que apresentam consistência muito dura a extremamente dura quando secos, passando a friável ou firme quando umedecidos (LIMA NETO *et al.*, 2009). A gênese desse horizonte ainda não foi completamente elucidada; no entanto, sabe-se que sua natureza é pedogenética, ocorrendo de forma natural, e que pode estar associada a vários processos (LIMA NETO *et al.*, 2010).

A princípio, surgiu-se a hipótese da formação dos horizontes coesos por obstrução dos poros com argila iluvial, ocasionando assim diminuição da porosidade total e aumentando a densidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 1968; ACHÁ-PANOSO, 1976, SILVA *et al.*, 1998). Moreau *et al.* (2006) também propuseram que a gênese dos horizontes coesos estaria relacionada com processos de translocação de argila e entupimento dos poros. Entretanto, Corrêa *et al.* (2008) atribuíram a esse caráter o conteúdo de argila muito fina (<0,2 μm) na forma dispersa, translocada dentro do mesmo horizonte ou entre horizontes, promovendo a ligação entre as partículas do solo, intermediadas por possíveis pontes de argila muito fina.

A posteriori, surgiram outras teorias sobre a gênese desse caráter, dentre as quais a forte instabilidade estrutural, a presença de agentes químicos cimentantes, e adensamento por dessecação decorrente da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem (RIBEIRO, 1986; PONTE; RIBEIRO, 2001).

Outros autores propuseram que a gênese do caráter coeso em solos possivelmente poderia ser relacionada à cimentação inepta e de forma temporária, ocasionada por compostos de baixa cristalinidade envolvendo material sílico-aluminoso, que ao serem polimerizados e precipitados no período seco favorecem maior coesão e, no período úmido, ao serem despolimerizados concorrem para uma condição de friabilidade do solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

Em contrapartida às teorias pedogenéticas, alguns autores dão ênfase aos processos geológicos como um complemento à formação dos horizontes coesos. Segundo Giarola e Silva (2002) e Bezerra *et al.* (2014), a presença de material mal selecionado pode ser uma das causas para a formação dos horizontes coesos, ou seja, um material 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. Morais *et al.* (2006) ainda citam outros parâmetros do material mal selecionado, tais como distribuição do tamanho da areia, arredondamento, esfericidade e rugosidade, como mais um reforço na coesão desses horizontes.

É muito provável que a gênese do horizonte coeso esteja concernente com causas múltiplas e inter-relacionadas, ocorrendo de forma simultânea, e que a intensidade com que as camadas coesas são formadas irá depender das variações climáticas e morfopedológicas existentes nas diferentes unidades geoambientais que compõem os Tabuleiros Costeiros (RIBEIRO, 1996).

Registre-se que são vários os trabalhos voltados ao estudo da gênese dos horizontes coesos, contudo, muitos dos resultados mostram-se ainda incipientes e pouco conclusivos, o que exige a nítida necessidade de mais informações sobre solos com caráter coeso para a plena compreensão de sua gênese, para, então, utilizar esses conhecimentos em melhores práticas de manejo desses solos.

2.3 Atributos de horizontes com caráter coeso

2.3.1 Atributos químicos

Frequentemente as classes de solos que apresentam horizontes com caráter coeso não são consideradas bons reservatórios de nutrientes, refletindo baixa fertilidade natural, aumento da acidez, baixa CTC, baixa saturação por bases ($V < 50\%$) e valores elevados de alumínio trocável (JACOMINE, 1996; SOUZA, 1996). Além disso, apresentam baixos teores de carbono orgânico, com valores menores que 15 g kg^{-1} (RIBEIRO, 1996; RIBEIRO, 2001).

A origem desses solos por depósitos sedimentares de materiais argilosos e argiloarenosos reflete características nos horizontes coesos, em que a mineralogia da fração argila evidencia que a caulinita é o mineral dominante e a fração areia é constituída essencialmente por quartzo (JACOMINE, 1996; REZENDE, 2000). Portanto, de modo geral, esses solos apresentam teores

de Fe_2O_3 muito baixos (inferiores a 80 g kg^{-1}), assim como os teores de SiO_2 (LIMA NETO *et al.*, 2009; MOREAU, 2001; MELO *et al.*, 2002). As baixas concentrações desses compostos, em associação com os baixos teores de matéria orgânica, favorecem o desenvolvimento de horizontes adensados, com maior ordenamento microestrutural das partículas e consequente aumento da coesão (RESENDE *et al.*, 2002).

O silício pode ser encontrado no solo constituindo formas cristalinas ou mal cristalizadas (amorfas), sendo apontado em pesquisas como um dos principais atuantes na gênese de duripãs, em que este constituinte funciona como agente químico na cimentação desses horizontes (CORNELIS *et al.*, 2011; VIEIRA *et al.*, 2012). Araújo Filho *et al.* (2001) afirmam que a sílica juntamente com outros aluminossilicatos podem também atuar como agentes cimentantes temporários nos horizontes de baixa permeabilidade, como é o caso dos horizontes com caráter coeso.

Em solo *hardsetting* da Austrália, que apresenta atributo correlato ao caráter coeso descrito no Brasil, a sílica de baixa cristalinidade é considerada como o principal agente cimentante de solos com esse comportamento (CHARTRES *et al.*, 1990; FRANZMEIER *et al.*, 1996). Os horizontes desses solos normalmente apresentam baixa permeabilidade, fato que promove lentidão no deslocamento da solução no solo, favorecendo consequente retenção e precipitação da sílica e ou materiais sílico-aluminosos no estágio em que o solo se encontra seco (CHADWICK *et al.*, 1987).

No período em que o solo se encontra seco, a sílica dissolvida na solução (H_4SiO_4) pode ser adsorvida e precipitada na forma de SiO_2 ou de outros componentes sílico-aluminosos mal cristalizados, sendo os óxidos de Fe e Al os principais constituintes com capacidade para adsorverem a sílica (CORNELIS *et al.*, 2011). Essa sílica mal cristalizada ou outros componentes sílico-aluminosos, quando precipitados, acabam sendo polimerizados e formam “pontes” que ligam partículas que estão próximas umas das outras, possibilitando a expressão da coesão no solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001). Essa coesão, segundo Ribeiro (1996) não é atribuída apenas ao silício, e sim também ao alumínio, ferro e a presença de argilominerais.

Contudo, Moreau *et al.* (2006) ao estudarem solos com horizontes coesos no estado da Bahia não confirmaram a influência de componentes mal cristalizados associados ao Fe, Al e Si nos horizontes estudados. Por outro lado, no Ceará, Vieira *et al.* (2012) avaliaram a resistência à penetração de horizontes coesos e constataram aumento da resistência, fato que atribuíram à presença dos compostos mal cristalizados atuando como agentes cimentantes.

2.3.2 Atributos físicos

Horizontes de solos com caráter coeso, a depender da profundidade, podem prejudicar diretamente o crescimento de plantas, promover redução da profundidade efetiva do volume de raízes e dificultar a emergência de plântulas. Além disso, manifestam aumento na densidade, resistência à penetração, resistência tênsil, redução da porosidade total, que, conseqüentemente, influência na aeração e movimento de água nesses horizontes. Contudo, o caráter coeso só impõe restrições de ordem física no período seco, situação em que manifesta maior expressão de sua coesão (RAMOS *et al.*, 2013).

Os atributos físicos citados no parágrafo anterior podem ser utilizados para diferenciar horizontes coesos de não coesos no mesmo perfil de solo (GIAROLA *et al.*, 2001; RAMOS *et al.*, 2013). Dentre esses atributos pode-se citar a densidade, que atinge altos valores, que associada à baixa macroporosidade, à presença de argila dispersa e outros agentes químicos, resulta em entupimento dos poros diminuindo a taxa de infiltração de água no solo e a condutividade hidráulica em seu interior (SOUZA, 1997). Alguns autores estudando solos coesos desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras encontraram valores de densidade do solo que variaram de 1,66 g cm⁻³ a 1,73 g cm⁻³ (LIMA *et al.*, 2005; SANTANA *et al.*, 2006; VIEIRA *et al.*, 2012).

Outro fator que contribui é a mineralogia da fração argila que, destaque-se nos solos com caráter coeso, é predominantemente constituída por caulinita, com arrançamento que contribui para que ocorra encaixe com maior adensamento dessas partículas, promovendo assim maior densidade do solo e, conseqüentemente, menor macroporosidade e menor permeabilidade (JACOMINE, 1996; FERREIRA *et al.*, 1999).

Outro atributo físico que se destaca em horizonte com caráter coeso é a elevada resistência do solo à penetração, fato relacionado com uma estrutura desorganizada que assume aspecto maciço com graus variáveis de coesão (JACOMINE, 2001). A resistência do solo à penetração desses solos quando secos pode exceder os 3 MPa, a qual é considerada suficiente para inibir severamente o crescimento de raízes da maioria das espécies vegetais cultivadas (MULLINS, 1997). Isso foi constatado por Rezende (2000) em solos coesos do Nordeste brasileiro, que observou efeito negativo do aumento da resistência à penetração em horizontes coesos do solo no desenvolvimento de raízes de laranjeiras, principalmente as pivotantes.

A resistência tênsil também é um dos atributos físicos que pode aferir a manifestação do caráter coeso, pelo fato desse atributo ser bastante sensível às modificações estruturais do solo. É usada para avaliar a resistência dos agregados/torrões, podendo ser determinada por teste

simples. É importante ressaltar que a resistência tênsil é dependente da composição do solo, bem como do volume do agregado/torrão (DEXTER; KROESBERGEN, 1985).

No que diz respeito à porosidade total desses horizontes, autores afirmam que os poros manifestam efeito marcante do adensamento, com aumento da resistência à penetração no período seco. Ocorre que, em solos com alto grau de adensamento, como é o caso dos horizontes com caráter coeso, os poros grandes são comprimidos, com redução total dos poros, dificultando o movimento e a disponibilidade de água desses solos (CINTRA; LIBARDI, 1998; GUÉRIF, 1988; MUNKHOLM *et al.*, 2001).

2.4 Resistência tênsil: relação com atributos físicos e químicos

A resistência tênsil é um indicador físico muito sensível às mudanças provocadas no solo, sendo definida como a força de compressão ou de tração por unidade de área necessária para que o solo se rompa mediante a aplicação de uma tensão (DEXTER; WATTS, 2000). Outros autores sugerem que esse parâmetro físico pode ser utilizado para mensurar a capacidade das raízes em penetrar no solo (IBARRA *et al.*, 2005).

A resistência tênsil de agregados pode ser estabelecida de forma direta ou indireta, sendo que a forma direta é a menos utilizada em pesquisas de solos em consequência à dificuldade de consecução da medida da força necessária para romper o agregado (GUÉRIF, 1988; MUNKHOLM *et al.*, 2001). Em contrapartida, os métodos indiretos são os mais utilizados (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; GUÉRIF, 1988). No ensaio da resistência tênsil dos agregados na forma indireta a força não é aplicada diretamente ao agregado, e sim, por intermédio de duas placas paralelas, em que se aplica uma força compressiva no plano vertical do centro do agregado com aumento gradativo até a quebra do mesmo. Assim, a resistência tênsil é o valor da tensão aplicada no instante em que o agregado sofre a fissura (ALMEIDA, 2008; DEXTER; WATTS, 2000).

A resistência tênsil do solo pode ser influenciada por alguns atributos físicos. Dentre esses atributos, destaca-se a umidade do solo como fator promotor da resistência tênsil. Nesse caso é necessário que haja alternância entre períodos secos e úmidos, que irá resultar em alteração da estrutura do solo, proporcionando adensamento das partículas e consequente aumento da coesão quando o solo está seco (RIBEIRO, 1986; LEY *et al.*, 1993; CHARTRES *et al.*, 1990; PERFECT *et al.*, 1995). Outros atributos físicos que podem ocasionar aumento da resistência tênsil são o conteúdo e mineralogia das argilas e a densidade do solo (LEY *et al.*, 1993).

No que concerne ao conteúdo de argila, seu acúmulo nos horizontes subsuperficiais pode ser ocasionado pelo processo de argiluviação. Ressalte-se que essas argilas ao se tornarem

dispersas promovem a formação de pontes que, em associação com variações dos ciclos de umedecimento e secagem, proporcionam adensamento e coesão das partículas quando o solo está seco e, por fim, aumento na resistência tênsil (RIBEIRO, 1986; SOUZA, 1996). A mineralogia, irá influenciar na organização das partículas que promoverá adensamento por meio de um possível ajuste mais adensado de partículas do solo, principalmente pela caulinita por apresentar sua forma laminar (LIMA *et al.*, 2005).

No caso da densidade do solo, a sua relação com a resistência tênsil pode ser explicada pelo movimento de materiais mais finos (argila e silte) dos horizontes superficiais para os subsuperficiais, chegando a ocasionar obstrução dos microporos levando a aumento na densidade para valores na faixa de 1,5 a 1,8 kg dm⁻³ (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001; LIMA, 2004). Smith *et al.* (1997) afirmam que a resistência do solo é fortemente influenciada pelo grau de compactação do solo, que é por sua vez intimamente associado à densidade.

A porosidade total do solo também é outro atributo físico que influencia na resistência tênsil do solo (MUNKHOLM *et al.*, 2001). Segundo Lima *et al.* (2005), em solos adensados, como é o caso dos horizontes coesos, os poros originalmente grandes são comprimidos, refletindo redução do volume total de poros e acarretando efeito marcante sobre o aumento da resistência durante o período seco. Guérif (1988) mostrou uma forte correlação negativa entre macroporos e resistência tênsil.

A resistência tênsil do solo pode ser controlada por vários fatores, além dos físicos citados anteriormente. Os fatores químicos também podem contribuir por meio de adsorção de cátions, concentração e composição da solução do solo e teor de carbono orgânico (UTOMO; DEXTER, 1981; RAHIMI *et al.*, 2000). No que se refere à adsorção de cátions, e sua contribuição com a resistência tênsil do solo, pode-se afirmar que cátions que promovem a maior dispersão das argilas em período úmido, como por exemplo o Na⁺, fazem com que após uma alternância para o período seco as partículas do solo apresentem forças de ligações muito maiores, que propiciam maior coesão e, por conseguinte, refletem elevados valores de resistência tênsil (DEXTER; CHAN, 1991). Segundo Rahimi *et al.* (2000) a resistência do solo pode ser influenciada pela concentração e composição da solução, mediante a presença de cátions em solução, tais como cálcio, magnésio e alumínio que exercem ligações entre as partículas do solo.

Outros atributos químicos que podem influenciar na manifestação do caráter coeso em horizontes são os compostos de baixa cristalinidade. Pesquisas já realizadas indicam que a gênese dos horizontes coesos pode estar relacionada à cimentação temporária promovida por esses compostos envolvendo material sílico-aluminoso, visto que tais compostos agem como

agentes cimentantes durante o período em que o solo encontra-se mais seco, fazendo com que a resistência tênsil do agregado/torrão seja elevada (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001). Estudos que objetivaram a compreensão sobre a gênese de horizontes endurecidos e/ou cimentados apontam o silício como principal atuante na manifestação da coesão como atributo diagnóstico, com evidências de correlações positivas entre resistência do solo e sílica extraível (DUCAN; FRANZMEIER, 1999; FRANZMEIER *et al.*, 1989; McBURNET; FRANZMEIER, 1997).

O carbono orgânico também pode promover aumento na resistência tênsil de agregados do solo, como também promover um efeito contrário. Segundo alguns autores, ele contribui para o aumento dos valores de resistência tênsil quando o teor de argila+silte é elevado, sendo a matéria orgânica humificada a responsável pela cimentação entre as partículas minerais do solo (BARTOLI *et al.*, 1992; GUIMARÃES *et al.*, 2009). Ou seja, a fração argila, por apresentar reatividade devido à presença de cargas elétricas, favorece, assim, a formação de ligações entre partículas minerais e, ou, partículas minerais e orgânicas (IMHOFF *et al.*, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A coleta de agregados/torrões foi realizada em Argissolos e Latossolos localizados nos estados do Ceará, Pernambuco e Bahia (Figura 1). O critério para a escolha dos solos se deu pela ocorrência do caráter coeso em pelo menos um horizonte dos referidos solos. Foram coletadas amostras de seis solos, a saber: em Aquiraz-CE, um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – PVAd (UTM 24 S 565155.1 9570780.0) e um Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto – PAex (UTM 24 S 564998.0 9570840.0); em Fortaleza-CE, um Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico – PAex (UTM 24 S 547034.0 9586291.0); em Goiana-PE, um Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredoxico – PAdx (UTM 25 S 285384 9154451); e em Cruz das Almas-BA, um Latossolo Amarelo Alumínico argissólico – LAa (UTM 24 S 488544 8599669) e um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico – LAdx (24 S 490401 8600977).

Concernente à granulometria e as percentagens das frações areia, silte e argila com as respectivas classes texturais dos solos estudados, os dados estão apresentados na Tabela 1. Quanto à descrição morfológica, as informações estão apresentadas na Tabela 2.

3.2 Coleta das amostras e preparo dos agregados/torrões

Foram selecionados em cada solo os horizontes Bt, Bw, AB e BA com e sem caráter coeso, nos quais foram coletadas amostras de solo em forma de bloco, em caixas de papel-cartão com dimensão de 15 x 20 x 10 cm de largura, comprimento e altura, respectivamente, nas posições topo, meio e base.

Nos horizontes que apresentaram espessura menor que 45 cm – o que levaria à sobreposição dos blocos (considerando os 15 cm de largura de cada bloco) – a coleta dos blocos foi feita nas caixas com as dimensões citadas anteriormente, com o cuidado de marcar na caixa de coleta a porção de solo correspondente a cada posição. Nestes casos, em laboratório, se fez o descarte dos agregados/torrões que apresentavam posições sobrepostas. Os blocos, ainda em campo, foram envoltos em filmes plásticos.

Logo após, em laboratório, os blocos foram postos em bandejas com água e forradas com esponja (cerca de 2 cm de espessura) para que se pudesse atingir até aproximadamente a capacidade de campo por capilaridade (Figura 2). A partir daí os blocos foram separados manualmente em seus agregados/torrões naturais pela aplicação de uma força mínima, de forma manual, contudo suficiente para separá-los pelos seus pontos de fraqueza.

Figura 1. Localização dos pontos de coleta dos solos.

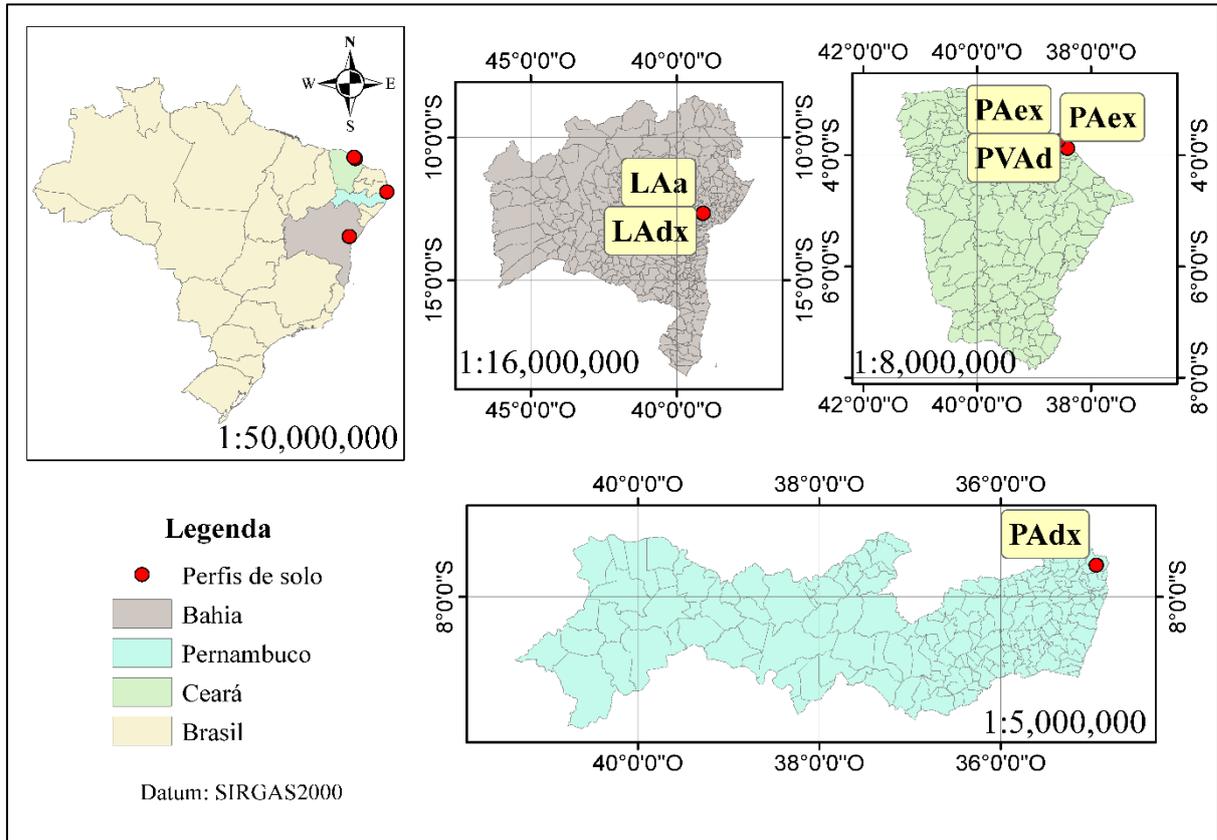


Tabela 1. Granulometria e classes texturais dos solos.

Local	Solo	Caráter no horizonte	Granulometria (%)			Classe textural
			Areia	Silte	Argila	
Aquiraz-CE	PVAd	coeso	63	5	32	Franco argiloarenosa
		não coeso	63	4	33	Franco argiloarenosa
	PAex	coeso	73	2	25	Franco argiloarenosa
		não coeso	75	5	20	Franco argiloarenosa
Fortaleza-CE	PAex	coeso	59	7	34	Franco argiloarenosa
		não coeso	58	8	34	Franco argiloarenosa
Goiana-PE	PAdx	coeso	65	6	29	Franco argiloarenosa
		não coeso	63	7	30	Franco argiloarenosa
Cruz das Almas-BA	LAa	coeso	49	2	49	Argiloarenosa
		não coeso	61	2	37	Argiloarenosa
	LAdx	coeso	70	2	28	Franco argiloarenosa
		não coeso	60	6	34	Franco argiloarenosa

Tabela 2. Descrição morfológica dos horizontes dos solos.

Local	Solo	Horizonte	Descritivo morfológico
Aquiraz - CE (MENEZES, 2016)	PVAd	Bt1 CCC ¹	81-129 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/6, seco); maciça com tendência à formação de blocos subangulares; extremamente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
		Bt2 SCC ²	129-171 cm; vermelho-amarelo (5YR 5/8, seco); moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
	PAex	Bt1 CCC	107-153 cm; amarelo-brunado (10YR 6/8, seco); maciça; muito dura, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
		Bt2 SCC	153-184 cm; amarelo-brunado (10YR 6/6, seco); moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
Fortaleza - CE (VIEIRA, 2012)	PAex	Bt1 SCC	63-79 cm; bruno amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6, seco); moderada média a grandes blocos subangulares; dura, muito friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
		Bt2 CCC	79- 112 cm; amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6, seco); maciça com tendência à formação de blocos subangulares; extremamente dura, friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
Goiana - PE (ANDRADE, 2014)	PADx	Bt CCC	43-70 cm; bruno amarelado-claro (10YR 6/4, seco); maciça em partes, fraca pequena e média blocos subangulares; muito duro, friável com partes firmes, plástica e pegajosa, transição plana e gradual.
		Bw SCC	135-190+ cm; amarelo (10YR 7/8, seco), mosqueado pouco, médio e proeminente, vermelho (2,5 YR 4/6, seco); fraca pequenas e média blocos subangulares com aspecto maciço poroso; duro, muito friável, plástico e pegajoso.
Cruz das Almas - BA (MELO FILHO; ARAÚJO FILHO, 1996; MOTA, 2016)	LAa ³	AB2 CCC	38-56 cm; bruno amarelado (10YR 5/4, seco); fraca pequena e média blocos subangulares; duro a muito duro, friável, plástico e pegajoso, transição plana e difusa.
		BA SCC	56-85 cm; bruno amarelado (10YR 5/4, seco); fraca pequena e média em blocos subangulares; duro, friável, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
	LAdx ⁴	Bw1 CCC	49-71 cm; bruno oliváceo-claro (2,5Y 5/3, seco); maciça com tendência à formação de blocos subangulares; muito duro, friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
		Bw3 SCC	96-130+ cm; bruno amarelado-claro (2,5Y 6/3, seco); fraca, grandes blocos subangulares; ligeiramente duro a duro, muito friável, plástico e pegajoso.

¹CCC: Com caráter coeso; ²SCC: Sem caráter coeso; ³Melo Filho e Araújo Filho, 1984; ⁴Mota, 2016.

Figura 2. Detalhe do umedecimento dos blocos em laboratório.



Fonte: Araújo (2017)

Essa partição manual foi feita até que os agregados/torrões passassem naturalmente em peneira com abertura da malha de 25,4 mm, porém ficassem contidos em peneira com abertura da malha de 19 mm (ALMEIDA, 2008). Os agregados/torrões foram postos ao ar por 36 horas, para secagem e homogeneização do teor de água, e, em seguida, foram postos em estufa a 60 °C por 24 horas (FIGUEREDO *et al.*, 2011).

3.3 Análises físicas

3.3.1 Resistência tênsil

Após conclusão dos procedimentos citados anteriormente, foram realizados os ensaios de resistência tênsil utilizando um dinamômetro com atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de 0,08 mm s⁻¹ (TORMENA *et al.*, 2008). Foram considerados 90 agregados/torrões por horizonte (30 do topo, 30 do centro e 30 da base do horizonte), totalizando 180 agregados/torrões por perfil de solo estudado. Para compor uma repetição (pela necessidade de uma quantidade razoável de TFSA para a realização das análises físicas e químicas) foram considerados seis agregados/torrões, sendo considerada a média aritmética dos dados obtidos para definir o valor da repetição. Neste caso, com os 30 agregados/torrões foram definidos cinco grupos, cada um constituído por seis agregados/torrões, e, por conseguinte, totalizando cinco repetições.

Antes da avaliação no dinamômetro cada agregado/torrão de solo teve sua massa medida em balança analítica. O agregado/torrão foi, individualmente, colocado na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base do equipamento, e outra superior móvel e ligada à extremidade da célula de carga do atuador eletrônico linear, com capacidade de 20 kgf. O valor da carga empregado para a ruptura tênsil foi inscrito por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Depois de cada procedimento de ruptura, uma porção da amostra do agregado/torrão teve sua massa mensurada em balança analítica para, posteriormente, ser submetida à secagem em estufa a 105 °C por 48 horas, para calcular o teor de água no agregado/torrão de solo. Com o que restou da amostra do agregado/torrão foram realizadas as análises de granulometria descritas posteriormente.

A resistência tênsil (RT) foi avaliada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), (1)

$$RT = (0,576 P) / (D^2 10^3) \quad (1)$$

em que RT é a resistência tênsil de agregados/torrões (kPa), 0,576 a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado/torrão, P a força aplicada (N), e D o diâmetro efetivo do agregado/torrão (m). O diâmetro efetivo do agregado torrão foi mensurado pela equação (2) (WATTS; DEXTER, 1998),

$$D = D_m (M/M_o)^{0,333}$$

sendo D_m o diâmetro médio dos agregados/torrões [(25,4 + 19,0)/2, em mm], explicado pela média dos tamanhos da abertura das peneiras, M a massa do agregado/torrão individual seco a 105 °C (g), e M_o a massa média dos agregados/torrões secos a 105 °C (g).

3.3.2 Granulometria, fracionamento da areia e densidade do solo pelo método do torrão parafinado

Com relação à granulometria, a quantificação da fração argila se deu pelo método da pipeta, a fração areia por tamisamento, e silte pela diferença entre o total da amostra de terra fina seca em estufa e o somatório de areia e argila (GEE; BAUDER, 1986). O hidróxido de sódio (NaOH) 1 M foi utilizado para a dispersão química das partículas. O fracionamento da areia se deu em cinco classes de tamanho (≤ 2 mm a > 1 mm; ≤ 1 mm a $> 0,5$ mm; $\leq 0,5$ mm a $> 0,25$ mm; $\leq 0,25$ mm a $> 0,105$ mm e $\leq 0,105$ mm a $> 0,053$ mm).

Os dados da distribuição granulométrica da fração areia foram trabalhados estatisticamente por meio do programa de microcomputador PHI, desenvolvido por Jong van Lier e Vidal –Torrado (1992), o qual faz uso de padrões estatísticos de Folk e Ward (1957). No

programa PHI, os dados de entradas correspondem às porcentagens absolutas de cada fração granulométrica na amostra e seu correspondente diâmetro na escala phi [$\phi = -\log_2 D(\text{mm})$]. Com a transformação dos diâmetros das classes em mm para escala phi, tem-se ϕ de ≤ 2 a $> 1 \text{ mm} = \phi$ de ≤ -1 a > 0 ; ϕ de ≤ 1 a $> 0,5 \text{ mm} = \phi$ de ≤ 0 a > 1 ; ϕ de $\leq 0,5$ a $> 0,25 \text{ mm} = \phi$ de ≤ 1 a > 2 ; ϕ de $\leq 0,25$ a $> 0,105 \text{ mm} = \phi$ de ≤ 2 a $> 3,32$ e ϕ de $\leq 0,105$ a $> 0,053 \text{ mm} = \phi$ de $\leq 3,32$ a $4,32$.

Quanto à densidade do solo, agregados de massa conhecida com diâmetro entre 19 e 25 mm foram amarrados com fio dental (também com massa conhecida) e imersos individualmente em parafina a 60-65 °C por aproximadamente dez segundos. Após o revestimento, cada agregado impermeabilizado foi aferido quanto à massa e, na sequência, quanto ao seu volume pelo princípio de Arquimedes. Os procedimentos de cálculo consideraram a definição física de densidade, isto é, a razão entre massa de solo seco a 105 °C e volume do agregado/torrão (ALMEIDA *et al.*, 2009).

3.4 Análises químicas

3.4.1 Silício, alumínio, ferro de baixa cristalinidade extraídos por oxalato de amônio; e carbono orgânico total

O oxalato de amônio, também chamado reagente Tamm, permite dissolver aluminossilicatos, sílica de baixa cristalinidade e óxidos de baixa cristalinidade que contêm silício. Para tanto, foram misturados 700 ml de $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,2 M e 530 ml de $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,2 M para obtenção da solução a ser utilizada, com o pH ajustado (com ácido oxálico) para o valor 3,0. A extração foi realizada no escuro, agitando-se 0,5 g de solo e 20 ml da solução durante 4 horas (MCKEAGUE; DAY, 1966). Em seguida, o material foi centrifugado por 10 minutos e o sobrenadante armazenado em frascos escuros para determinação dos teores de silício e alumínio (espectrofotometria de emissão óptica em plasma) e ferro (por espectrofotometria de absorção atômica).

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados conforme método descrito por Yeomans e Bremner (1988), que consiste na oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio, em presença de H_2SO_4 e aquecimento externo, e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal na presença do indicador difenilamina.

3.5 Análise dos dados

Os dados de cada solo foram estudados, considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $6 \times 2 \times 3$ (seis solos: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto, Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico, Latossolo Amarelo Alumínico argissólico e Latossolo Amarelo Distrocoeso típico; dois graus de coesão: com e sem caráter coeso, e três posições no horizonte: topo, meio e base), com cinco repetições. Foram submetidos ao teste F para a análise de variância, e ao teste de Tukey para a comparação de médias a 5% de significância. A relação entre a resistência tênsil e granulometria foi mensurada por análise de regressão e de correlação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de variância e dados médios da fração areia, silte e argila

Na Tabela 3 é apresentada a análise de variância para os dados de areia, silte e argila. Com relação à areia foram observadas diferenças estatísticas significativas pelo teste F a 1% de probabilidade para os fatores solos e posições, indicando que existe pelo menos duas classes de solos com diferenças significativas para a variável e que existe diferenças significativas entre pelos menos duas posições de coleta no horizonte. Adicionalmente, foram observadas interações significativas entre os fatores solos x graus de coesão, solos x posições e solos x graus de coesão x posições.

Tabela 3. Análise de variância para os dados de areia, silte e argila.

Variáveis	Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Areia	Solos (F1)	5	6001,47	1200,29	968,42**
	Graus de coesão (F2)	1	2,99	2,99	2,41 ^{ns}
	Posições (F3)	2	61,35	61,35	24,75**
	Interação F1xF2	5	1845,94	369,19	297,87**
	Interação F1xF3	10	206,40	20,64	16,65**
	Interação F2xF3	2	3,00	1,50	1,21 ^{ns}
	Interação F1xF2xF3	10	230,83	23,02	18,62**
	Tratamentos	35	8351,97	238,63	192,53**
	Erro residual	144	178,48	1,24	
	Total	179	8530,45		
Silte	Solos (F1)	5	546,09	109,22	82,74**
	Graus de coesão (F2)	1	64,86	64,86	49,14**
	Posições (F3)	2	67,18	33,59	25,45**
	Interação F1xF2	5	64,99	13,00	9,85**
	Interação F1xF3	10	34,25	3,42	2,59**
	Interação F2xF3	2	1,20	0,60	0,46 ^{ns}
	Interação F1xF2xF3	10	25,27	2,53	1,91*
	Tratamentos	35	803,85	22,97	17,40**
	Erro residual	144	190,08	1,32	
	Total	179	993,92		
Argila	Solos (F1)	5	6120,92	1224,18	586,53**
	Graus de coesão (F2)	1	95,68	95,68	45,84**
	Posições (F3)	2	5,05	5,05	2,42**
	Interação F1xF2	5	321,23	321,23	153,91**
	Interação F1xF3	10	27,84	27,84	13,34**
	Interação F2xF3	2	2,77	2,77	1,33 ^{ns}
	Interação F1xF2xF3	10	30,38	30,39	14,56**
	Tratamentos	35	240,59	240,59	115,27**
	Erro residual	144	2,09	2,09	
	Total	179	8721,17		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; ^{ns}: não significativo; **: significativo a 1%; *: significativo a 5%.

Para o silte, foram observadas diferenças estatísticas significativas pelo teste F a 1% de probabilidade para os fatores solos, grau de coesão e posições. Também foram observadas interações significativas entre os fatores solos x graus de coesão e solos x posições. Para a argila, foram observadas diferenças significativas para os fatores solos, graus de coesão e posições. Adicionalmente, foram observadas interações significativas entre os fatores solos x graus de coesão e solos x posições.

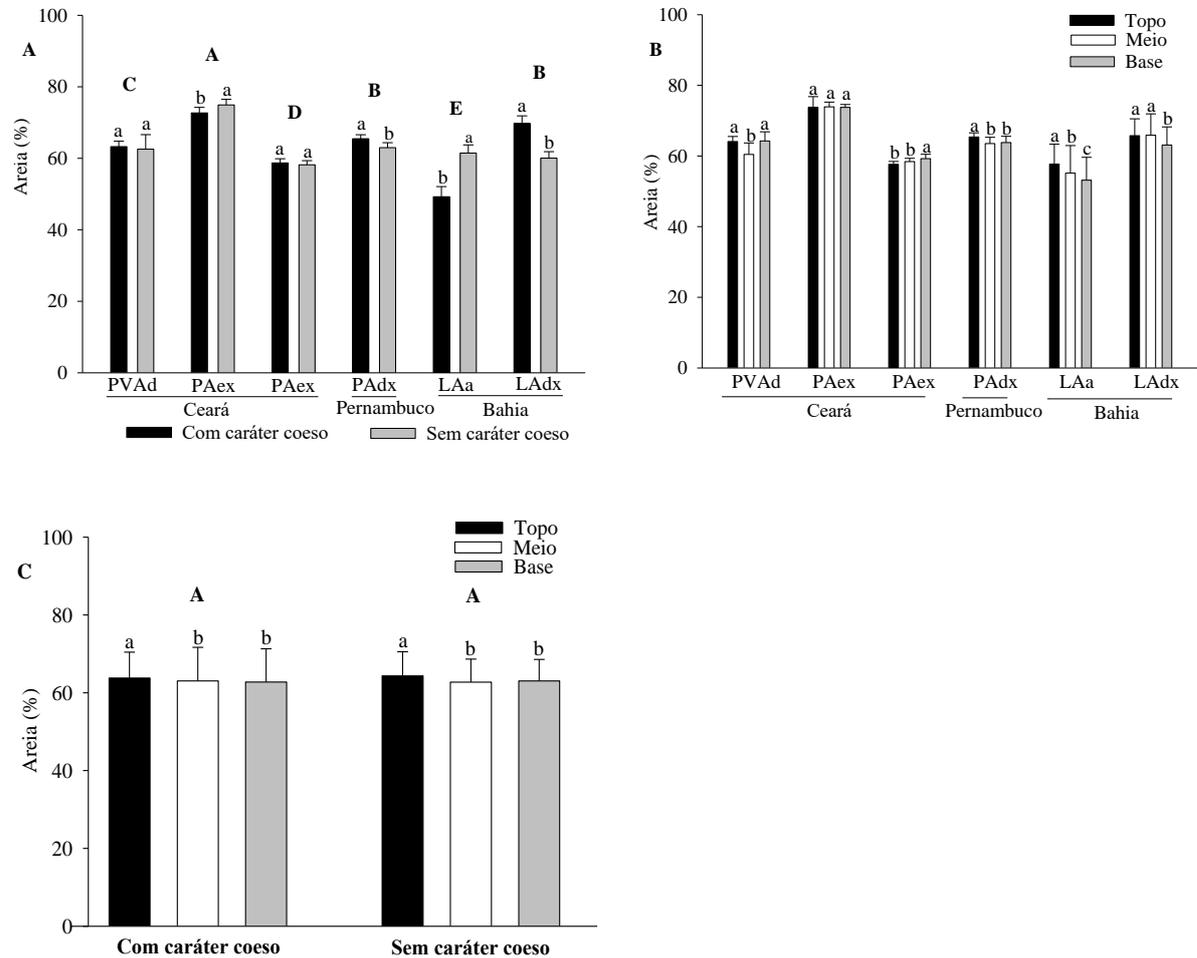
No tocante ao teor de areia, aplicando-se o teste de Tukey a 5% de significância para comparação de médias, observou-se que entre os horizontes com e sem o caráter coeso houve diferença estatística significativa para maioria das classes de solos avaliadas, com exceção para PVAd e PAex típico no estado do Ceará (Figura 3A). Adicionalmente, comparando as classes de solos avaliadas sem distinguir o caráter coeso do não coeso, observou-se diferença estatística no teor de areia total para maioria das classes de solos avaliadas, com exceção para o PAdx (Pernambuco) e LAdx (Bahia).

Na Figura 3B estão apresentados os teores de areia dentro de cada classe de solo nas posições topo, meio e base. Observou-se que em todos os casos houve diferenças estatísticas significativas, exceto para o PAex abruptico.

Avaliando a Figura 3C, pode-se observar a média dos dados da fração areia total considerando apenas os graus de coesão e posições em todos os horizontes avaliados. Constatou-se que não houve diferença estatística significativa na comparação dos teores de areia total nos horizontes com e sem caráter coeso, porém é possível observar que em cada horizonte, nas posições topo, meio e base, houve diferenças estatísticas significativas, com o teor de areia no topo do horizonte sendo superior ao observado nas posições meio e base, esses dois últimos iguais estatisticamente.

De modo geral, constatou-se que os horizontes com e sem caráter coeso apresentam variações significativas nos teores da fração areia total, embora, como visto anteriormente, não difiram quanto à classe textural. Também foram observadas diferenças nos teores de areia total nas posições topo, meio e base. No entanto, apesar das diferenças encontradas nos teores de areia total, não é possível afirmar que elas sejam por si mesmas a causa principal das diferenças nos graus de coesão entre os horizontes. Outros autores também encontraram resultados semelhantes (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Figura 3. Valores médios da fração areia nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



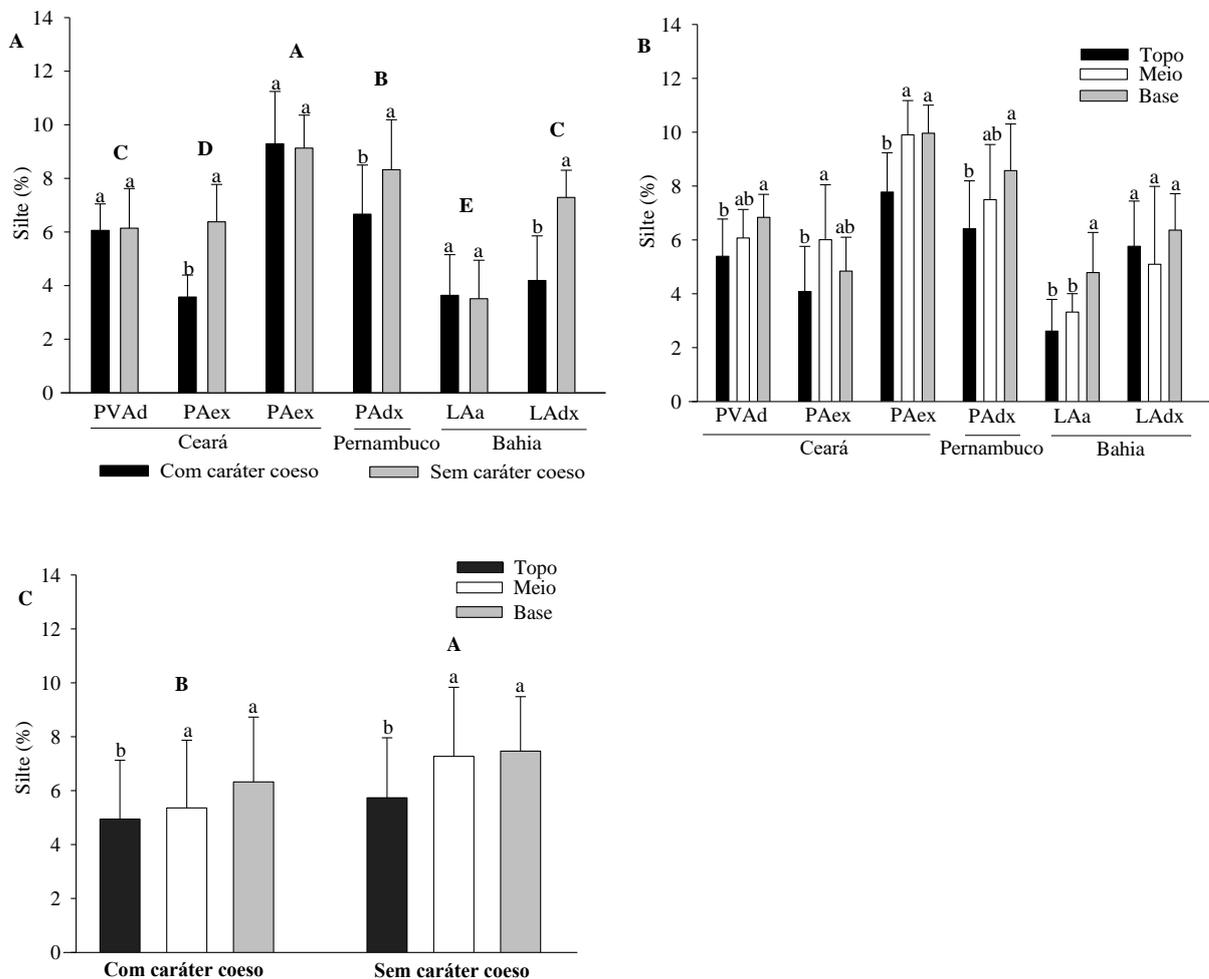
De acordo com os resultados da análise granulométrica (Tabela 1, item Material e Métodos), pode-se observar que em todos os solos e horizontes (com e sem caráter coeso) a fração areia foi predominante, definindo a textura franco argiloarenosa, exceto para o LAA em que a textura foi argiloarenosa para ambos os horizontes. Estudos de Corrêa *et al.* (2008) evidenciaram resultados semelhantes, indicando que os horizontes com caráter coeso normalmente apresentam classes texturais franco arenosa, franco argiloarenosa e argiloarenosa.

Observando a Figura 4A, dos seis solos avaliados três não apresentaram diferenças estatísticas (PVAd, PAex típico e LAA) quanto aos teores de silte comparando-se os horizontes com e sem a manifestação do caráter coeso. Já as classes PAex abrupto, PAdx e LAdx apresentaram diferenças estatísticas nos teores de silte nos horizontes com e sem o caráter coeso, em que os horizontes sem o caráter coeso foram os que apresentaram os maiores teores

de silte. Fazendo uma comparação geral entre as seis classes de solos avaliadas, apenas PVAd e LAdx não apresentaram diferença estatística significativa quanto aos teores de silte.

Quanto os teores de silte em cada classe de solo ao longo das posições topo, meio e base, Figura 4B, verificou-se que houve diferença estatísticas significativas nas posições topo, meio e base e aumento no sentido do topo à base, exceto para o LAdx. Observando a figura 4C, há diferença estatística significativa quanto ao caráter coeso e não coeso, evidenciando também que os teores de silte aumentam no sentido do topo à base com os maiores teores nos horizontes sem o caráter coeso.

Figura 4. Valores médios da fração silte nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



Segundo Araújo *et al.* (2018), que encontraram resultados semelhantes, uma explicação para os maiores teores do silte nos horizontes sem a manifestação da coesão como caráter coeso,

é a sua grande mobilidade no solo, por ser uma partícula pequena com tamanho inferior a 53 μm até maior que 2 μm de diâmetro. Brady e Weil. (2013) também afirmaram que por causa de sua pouca pegajosidade e plasticidade, e além de não exibirem cargas de superfície, são facilmente deslocados no solo por fluxos internos de água. Como os horizontes sem o caráter coeso são mais porosos, a tendência é que o silte seja deslocado pela água no solo e se deposite com acúmulo desde a base até o topo. No caso dos horizontes com caráter coeso, por serem menos porosos, a migração do silte se torna mais dificultada e, provavelmente, com o tempo, a tendência é de seu acúmulo no topo (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Quanto à fração argila, Figura 5A, observa-se que PVAd, PAex típico e PAdx não apresentaram diferenças estatísticas significativas no que diz respeito aos horizontes com e sem o caráter coeso; no entanto, o PAex abruptico, LAa e LAdx foram as classes que apresentaram diferenças comparando-se os horizontes em estudo (com e sem o caráter coeso), sendo apenas o PAex abruptico e o LAa os que, em média, apresentaram teores de argila nos horizontes com caráter coeso superiores aos horizontes sem caráter coeso dentro da mesma classe. Bezerra *et al.* (2014) também encontraram resultados com maiores teores de argila em horizontes com caráter coeso. Fazendo a comparação entre cada classe de solo avaliada, apenas o PAdx e LAdx não apresentaram diferenças estatísticas.

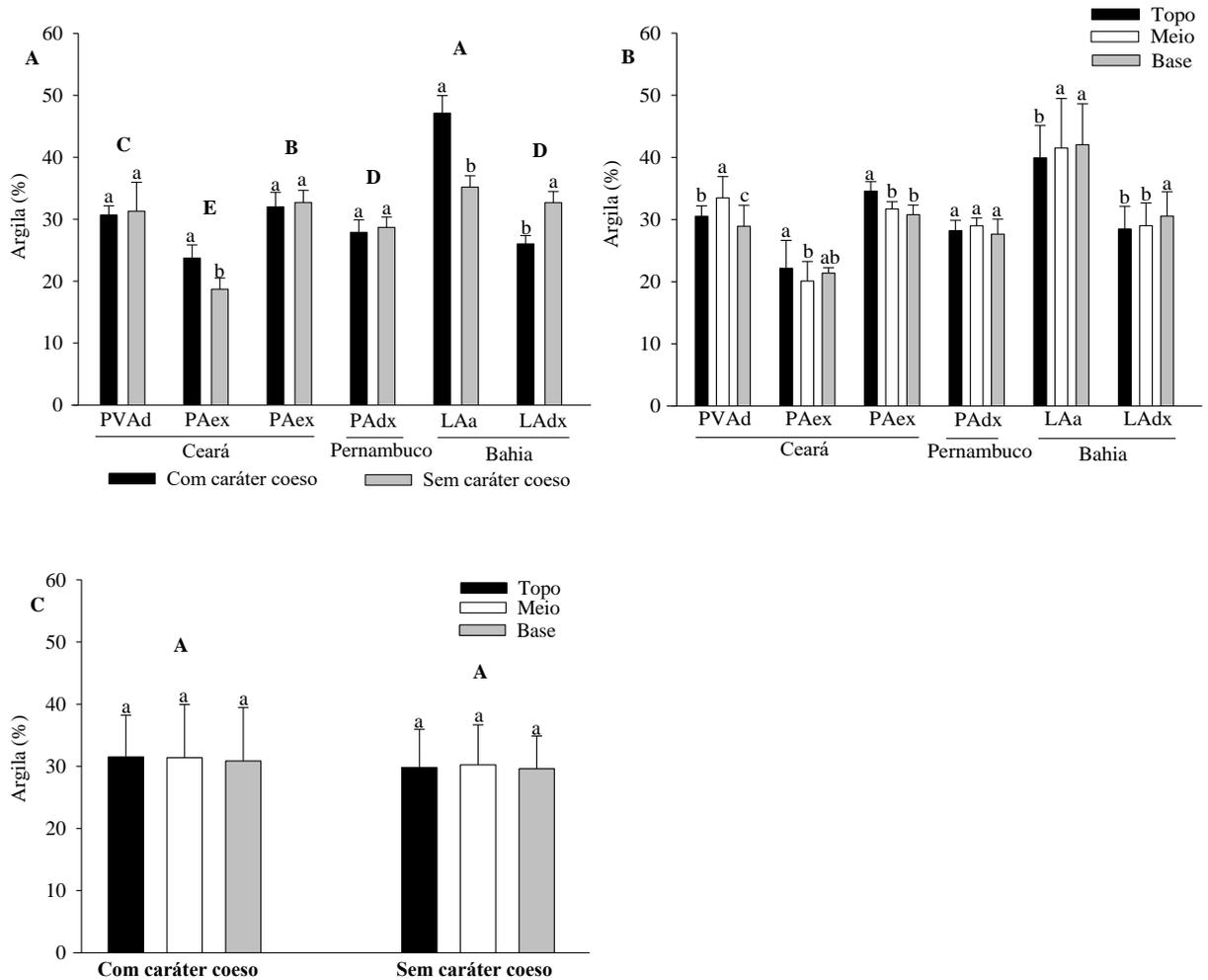
Na Figura 5B podem ser observados os teores de argila em cada classe de solo nas posições topo, meio e base. Apenas o PAdx não apresentou diferença estatística significativa. Vale salientar que apesar de haver diferenças dos teores de argilas no topo, meio e base para alguns solos, não houve um padrão de distribuição da quantidade de argila no conjunto de solos analisado.

Na Figura 5C, observa-se que em geral não há diferença estatística significativa para o teor de argila entre os horizontes avaliados (com e sem o caráter coeso) e ao longo das posições monitoradas, evidenciando não ser argila a fração que define as diferenças no tocante aos valores médios de resistência tênsil.

São vários os autores que atribuem à argila iluvial como sendo a responsável pela gênese dos horizontes com caráter coeso, pois a mesma contribui para diminuição da porosidade pelo aumento de argila fina dentro dos poros; tal afirmação baseia-se no aumento da superfície específica e na relação argila fina e argila grossa nos horizontes que manifestam o caráter coeso (ACHÁ-PANOSO, 1976; CORRÊA *et al.*, 2008; 2015; LIMA NETO *et al.*, 2009). No entanto, Ribeiro. (2001) afirma que o processo de iluviação de argila (argiluviação) não explica a gênese dos horizontes coesos, pois grande parte da argila que está na superfície do horizonte é eliminada dos solos por erosão diferencial e que apenas uma pequena parte dessas argilas pode

migrar e ser depositada no topo dos horizontes com caráter coeso – o que é coerente para explicar a maior resistência tênsil constatada no topo dos horizontes que expressam o referido atributo.

Figura 5. Valores médios da fração argila nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



Anjos (1985) propôs que as argilas, principalmente a caulinita que é predominante nos solos dos Tabuleiros Costeiros, podem proporcionar empacotamento denso por meio do ajuste face a face desse tipo de argilomineral, por causa de sua forma laminar, favorecido pelos ciclos repetidos de umedecimento e secagem do solo. No entanto, estudos indicam que o grau de ordenamento da caulinita encontrado em áreas dos Tabuleiros Costeiros não permite associar o empacotamento da fração argila com a ocorrência do caráter coeso nestes solos (GIAROLA *et al.*, 2009).

Vieira *et al.* (2012), estudando a influência de compostos mal cristalizados na gênese de horizontes com caráter coeso no estado do Ceará, observaram em um perfil de solo mais argiloso que mesmo com a remoção de sílica mal cristalizada a resistência à penetração foi superior a de solos com menos argila e que também tiveram a sílica mal cristalizada removida, indicando que a argila também é um dos fatores que concorre para cimentação de horizontes. Vale ressaltar que no presente estudo foram encontradas correlações positivas entre resistência tênsil e teores de argila, o que será discutido mais adiante.

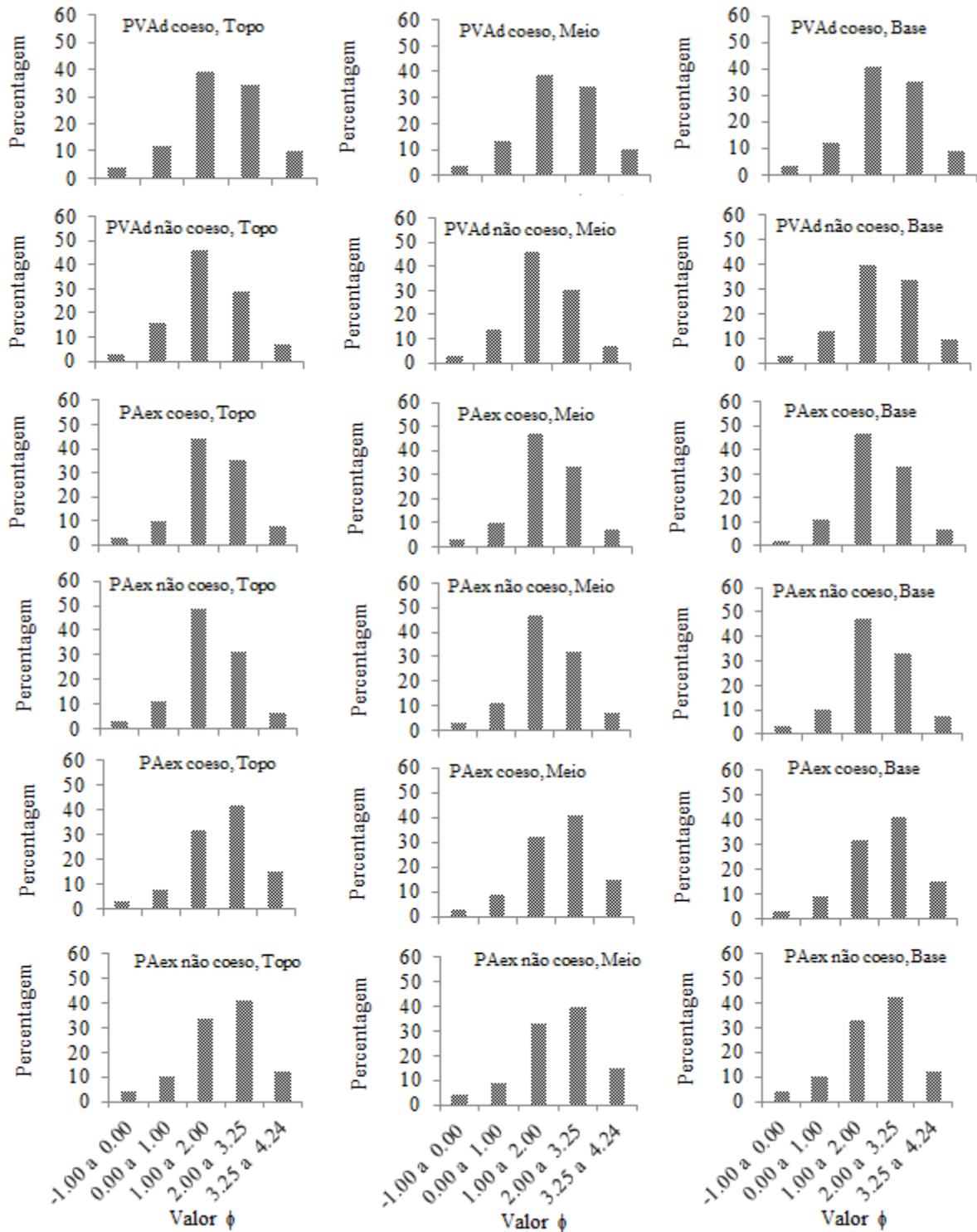
4.2 Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia por tamanho e grau de seleção, densidade do solo e teor de carbono orgânico

No que diz respeito ao fracionamento das areias dos solos estudados no Ceará, observou-se para todos os horizontes do PVAd e PAex abrupático, nas posições topo, meio e base, predomínio de areia média seguido, na sequência, por areia fina, grossa, muito fina e muito grossa. No PAex típico, também no Ceará, nos mesmos horizontes coesos e posições, observou-se predomínio de areia fina seguido de areia média, muito fina, grossa e muito grossa (Figura 6).

Segundo alguns autores, solos arenosos quando contêm altas proporções de areia fina, são facilmente adensados, o que é ainda, mais agravado quando os tamanhos dos grãos de areia apresentam-se mais amplamente distribuídos, levando ao quadro de compactidade máxima, ou seja, ocorre um adensamento natural, que é uma característica peculiar dos solos desenvolvidos de sedimentos do grupo geológico Barreiras – o caso do presente estudo (PANAYIOTOPOULOS; MULLINS, 1985; ABRAHÃO *et al.*, 1998).

A fração areia mal selecionada e fina favorece o arranjo adensado de suas partículas e, com base nessa informação, pode-se sugerir que a formação do horizonte Bt coeso, no Ceará, é influenciada pela desuniformidade da composição granulométrica dos solos (RESENDE *et al.*, 1992; BEZERRA *et al.*, 2014). Além disso, os horizontes com areia mal selecionada e maior teor de partículas pequenas apresentam maior propensão ao acúmulo de argila, dada a elevada compactidade do arranjo das partículas da fração areia (ABRAHÃO *et al.*, 1998).

Figura 6. Distribuição das areias nos solos do Ceará dos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – PVAd, Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto – PAex e Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico – PAex. Valor phi (ϕ) de -1,00 a 0 (areia muito grossa); de 0 a 1,00 (areia grossa); de 1,00 a 2,00 (areia média); de 2,00 a 3,25 (areia fina); e de 3,25 a 4,24 (muito fina).



Avaliando o grau de seleção das partículas de areia das classes de solos estudados no Ceará (Tabela 4), observou-se que no PVAd, no horizonte com caráter coeso, houve predomínio no topo e meio de areias mal selecionadas e de areias moderadamente selecionadas na base. No caso do horizonte sem caráter coeso, este apresentou predomínio de areias moderadamente selecionadas no topo e meio, com a base sendo constituída por areias mal selecionadas.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia ($\mu \pm$ desvio padrão) e grau de seleção segundo Folker e Ward (1957) para horizontes com e sem caráter coeso dos solos do Ceará.

Solo	Horizonte	Posição	ϕ ($\mu \pm$ desvio-padrão)	Grau de seleção da areia
Argissolo Vermelho-Amarelo	Bt1 com caráter coeso	Topo	$1,934 \pm 1,006$	Mal selecionado
		Meio	$1,915 \pm 1,020$	Mal selecionado
		Base	$1,932 \pm 0,959$	Moderadamente selecionado
Distrófico típico (PVAd)	Bt2 sem caráter coeso	Topo	$1,783 \pm 0,934$	Moderadamente selecionado
		Meio	$1,816 \pm 0,929$	Moderadamente selecionado
		Base	$1,917 \pm 1,000$	Mal selecionado
Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto (PAex)	Bt1 com caráter coeso	Topo	$1,924 \pm 0,915$	Moderadamente selecionado
		Meio	$1,890 \pm 0,891$	Moderadamente selecionado
		Base	$1,890 \pm 0,871$	Moderadamente selecionado
	Bt2 sem caráter coeso	Topo	$1,834 \pm 0,870$	Moderadamente selecionado
		Meio	$1,868 \pm 0,899$	Moderadamente selecionado
		Base	$1,890 \pm 0,891$	Moderadamente selecionado
Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (PAex)	Bt1 com caráter coeso	Topo	$2,203 \pm 1,005$	Mal selecionado
		Meio	$2,116 \pm 1,029$	Mal selecionado
		Base	$2,180 \pm 1,020$	Mal selecionado
	Bt2 sem caráter coeso	Topo	$2,090 \pm 1,014$	Mal selecionado
		Meio	$2,171 \pm 1,043$	Mal selecionado
		Base	$2,100 \pm 1,014$	Mal selecionado

Já nos horizontes com e sem caráter coeso do PAex abrupto, a distribuição da fração areia por tamanho foi totalmente classificada como moderadamente selecionada; no PAex típico, nos horizontes coeso e não coeso, nas posições topo, meio e base, foi observada distribuição da areia mal selecionada.

Segundo Abrahão *et al.* (1998), que realizaram pesquisas com a distribuição de frequência de tamanho da fração areia, o aumento no adensamento em solos oriundos de sedimentos da Formação Barreiras pode ser gerado pelo aumento do teor de areia fina, que contribui para um ajuste mais compacto das partículas. Esses mesmos autores concluíram que os horizontes de superfície apresentam partículas de melhor seleção, pois possuem maior quantidade de material grosseiro por estarem mais sujeitos à eluviação. Já nos horizontes subsuperficiais, a areia mal selecionada tem maior predominância de partículas finas, concorrendo para que nestes horizontes ocorra acumulação de argila devido ao adensamento decorrente do arranjo da fração

areia, com as areias mais finas preenchendo os espaços vazios deixados entre as partículas de areias mais grossas.

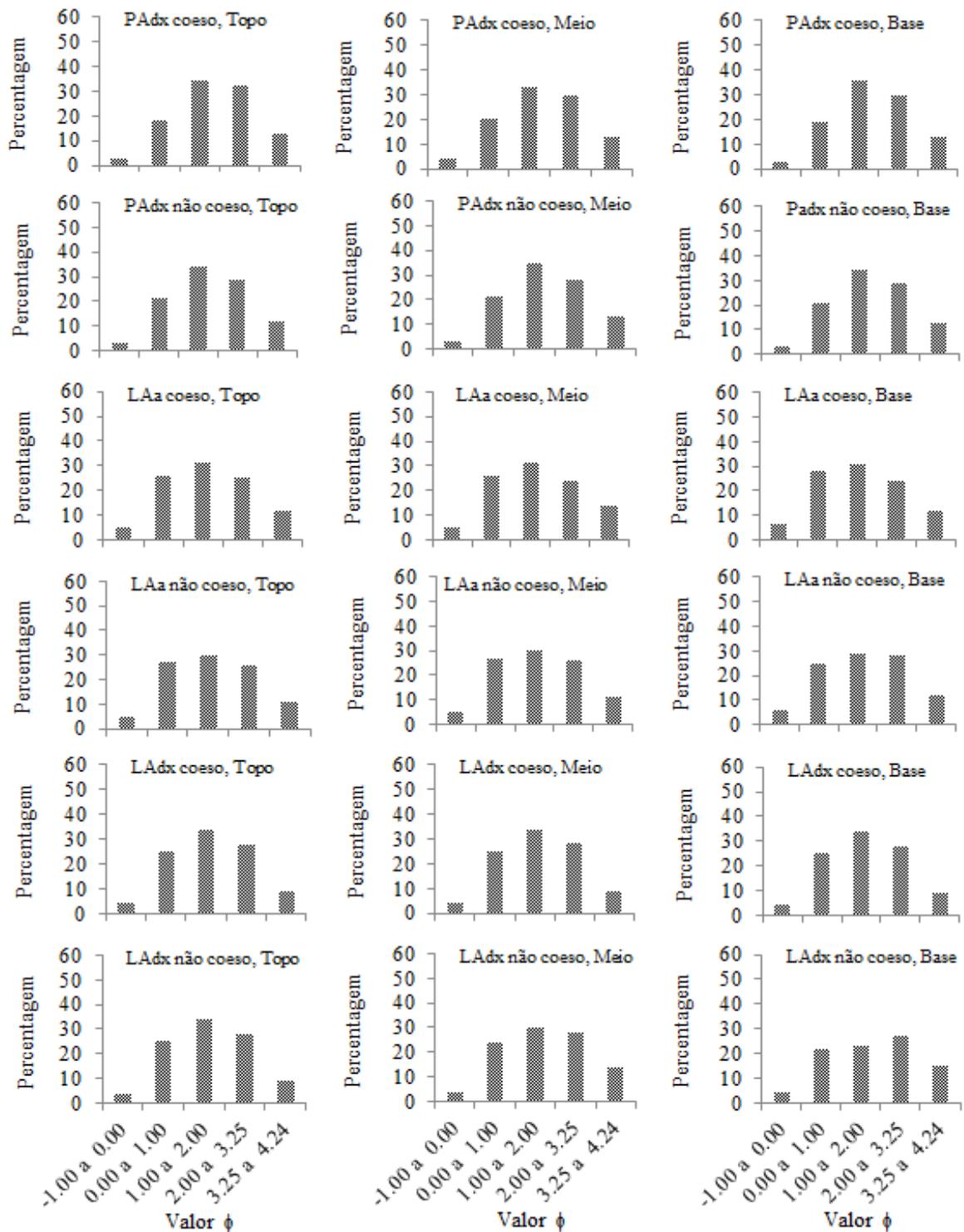
No que tange ao arranjo do empacotamento, são dois os modelos conhecidos. No primeiro modelo, as partículas que formam a estrutura possuem formato esférico de tamanhos parecidos, proporcionando assim um empacotamento aberto; já no segundo modelo, as partículas que compõem a estrutura apresentam distribuição gradual, com areia muito grossa, grossa, média, fina e muito fina, em que essas partículas mais finas ocupam os espaços vazios entre as partículas maiores, podendo chegar a um estado de máxima densidade (HARRIS, 1971). Segundo Panayiotopoulos (1989), o empacotamento de solos afeta suas propriedades físicas – uma delas é a resistência mecânica.

Nesta pesquisa foi observada melhor aderência dos dados ao segundo modelo de empacotamento, visto que houve distribuição gradual de partículas por tamanho, em que a fração areia total apresentou predomínio de areia média, fina e muito fina, fato constatado principalmente no PVAd, PAex abruptico e no PAex típico, o que deve ter contribuído para a maior resistência tênsil de agregado/torrão, com conseqüente aumento da coesão para os horizontes Bt1 estudados.

De acordo com 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. Na presente pesquisa, houve predominância de areia média, fina e muito fina, fato que corroborou a pesquisa de Lima (2004) e Ribeiro *et al.* (2007). Para outros autores, a ocorrência dos horizontes com caráter coeso é promovida pela presença de material mal selecionado agrupado nas frações areia fina e média (BEZERRA *et al.*, 2014).

No que diz respeito ao fracionamento das areias dos solos estudados em Pernambuco (PAdx) e Bahia (LAa e LAdx), observou-se que o PAdx em todos os horizontes, com e sem o caráter coeso, e nas três posições amostradas, apresentou predomínio de areia média e fina, seguidas de areia grossa, muito fina e muito grossa. No caso dos solos da Bahia, o LAa apresentou nos horizontes com e sem o caráter coeso, bem como nas posições topo meio e base, predominância de areia média, grossa, fina, muito fina e muito grossa, nessa ordem. No LAdx, a fração areia apresentou tendência semelhante às outras classes de solos, tendo as frações areia média, fina e grossa como as de predomínio em todas as situações estudadas (Figura 7).

Figura 7. Distribuição das areias nos solos de Pernambuco e Bahia dos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico – PAdx, Latossolo Amarelo Alumínico argissólico – LAa e Latossolo Amarelo Distrocoeso típico – LAdx. Valor phi (ϕ) de 1,00 a 0 (areia muito grossa); de 0 a 1,00 (areia grossa); de 1,00 a 2,00 (areia média); de 2,00 a 3,25 (areia fina); e de 3,25 a 4,24 (muito fina).



Avaliando o grau de seleção da fração areia para os solos em Pernambuco e Bahia, pode-se observar que todas as classes (PAdx, LAa e LAdx) apresentaram areia mal selecionada para

todos os horizontes, com e sem o caráter coeso, ao longo das posições topo, meio e base (Tabela 5).

Levando em consideração que no presente estudo observa-se uma tendência dos dados ao segundo modelo de empacotamento, visto que há distribuição gradual das partículas, em que a fração areia total apresenta predomínio de areia média, fina e grossa, pode-se afirmar que no quesito granulometria os solos da costa leste também são passíveis de manifestar a ocorrência do caráter coeso em seus horizontes Bt. No entanto, como será visto posteriormente, essas classes de solos (PAdx, LAa e LAdx) apresentaram baixa resistência tênsil em seus agregados/torrões.

Tabela 5. Parâmetros estatísticos para a distribuição da fração areia ($\mu \pm$ desvio padrão) e grau de seleção segundo Folker e Ward (1957) para horizontes com e sem caráter coeso dos solos de Pernambuco e Bahia.

Perfil	Horizonte	Posição	ϕ ($\mu \pm$ desvio-padrão)	Grau de seleção da areia
Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico (PAdx)	Bt com caráter coeso	Topo	1,925 \pm 1,089	Mal selecionado
		Meio	1,886 \pm 1,125	Mal selecionado
		Base	1,888 \pm 1,093	Mal selecionado
	Bw sem caráter coeso	Topo	1,831 \pm 1,093	Mal selecionado
		Meio	1,860 \pm 1,105	Mal selecionado
		Base	1,868 \pm 1,106	Mal selecionado
Latossolo Amarelo Alumínico argissólico (LAa)	AB2 com caráter coeso	Topo	1,725 \pm 1,160	Mal selecionado
		Meio	1,766 \pm 1,197	Mal selecionado
		Base	1,657 \pm 1,190	Mal selecionado
	BA sem caráter coeso	Topo	1,679 \pm 1,146	Mal selecionado
		Meio	1,647 \pm 1,174	Mal selecionado
		Base	1,732 \pm 1,190	Mal selecionado
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LAdx)	B1 com caráter coeso	Topo	1,693 \pm 1,073	Mal selecionado
		Meio	1,718 \pm 1,114	Mal selecionado
		Base	1,681 \pm 1,102	Mal selecionado
	B3 sem caráter coeso	Topo	1,809 \pm 1,241	Mal selecionado
		Meio	1,848 \pm 1,162	Mal selecionado
		Base	1,877 \pm 1,175	Mal selecionado

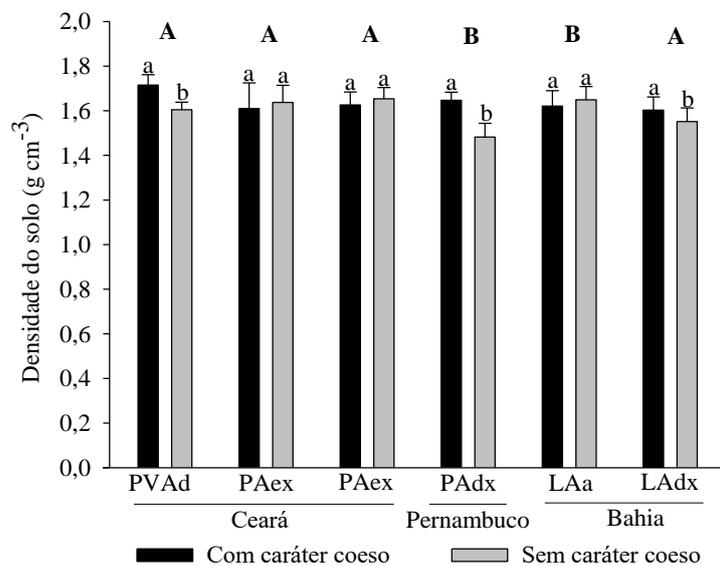
4.3 Densidade do solo e carbono orgânico total

Na Figura 8 tem-se os dados médios das densidades dos solos avaliados. Comparando-se os valores dos horizontes com caráter coeso, observa-se que o PVAd, PAdx e o LAdx apresentaram diferenças estatísticas significativas com os maiores valores para os horizontes

com o caráter coeso. Nos demais solos, PAex abruptico, PAex típico, PAdx e LAa, os horizontes não apresentaram diferenças estatísticas para o atributo.

Comparando-se as classes de solos, nota-se que o PVAd, PAex abruptico, PAex típico e o LAdx foram iguais estatisticamente, porém superiores ao PAdx e o LAa que não diferiram um do outro quanto à densidade.

Figura 8. Valores médios de densidade do solo nos horizontes com e sem caráter coeso dos solos avaliados (PVAd, PAex abruptico, PAex típico, PAdx, LAa e LAdx).



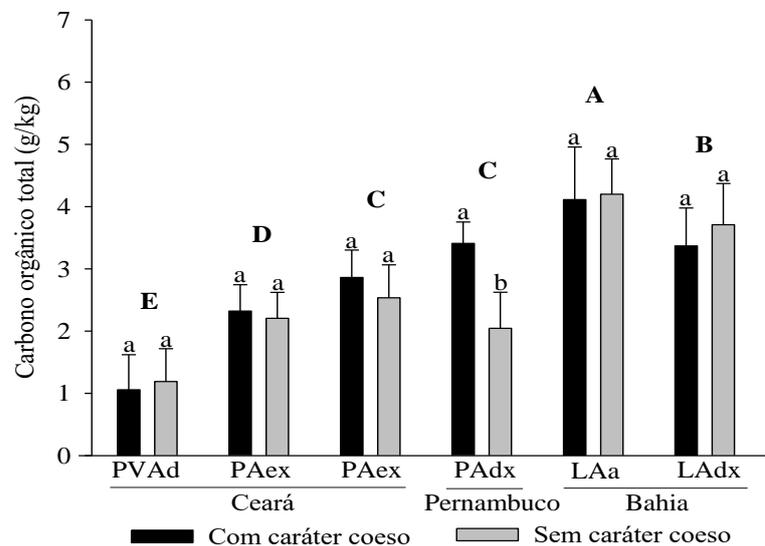
Segundo Araújo Filho *et al.* (2001), em condições naturais a densidade média dos horizontes com caráter coeso varia de 1,5 a 1,8 g cm⁻³, sendo que a expressão máxima da coesão é observada no material seco e em geral ocorre nos solos mais argilosos. Lima Neto (2008), pesquisando a gênese do caráter coeso em Argissolos e Latossolos da região dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, encontrou densidades nos horizontes com caráter coeso na faixa de 1,5 a 1,68 g cm⁻³, os quais apresentaram textura franco argiloarenosa a argiloarenosa. Vieira *et al.* (2012) encontraram valores de densidade nos horizontes com caráter coeso variando de 1,66 a 1,73 g cm⁻³. No presente estudo, a densidade dos horizontes coesos variou de 1,60 a 1,71 g cm⁻³, apresentando também classes texturais franco argiloarenosa e argiloarenosa, corroborando os estudos citados.

Portanto, diante do exposto observa-se que horizontes com caráter coeso apresentam elevadas densidades comparados com aqueles que não manifestam o referido atributo, e que essa propriedade física (densidade do solo) a que concorre para a redução da porosidade e

aumento da resistência à penetração e resistência tênsil – atributos que diferenciam horizontes com e sem o caráter coeso (GIAROLA *et al.*, 2003).

Na Figura 9 estão apresentados os teores médios de carbono orgânico em cada solo e horizontes com e sem o caráter coeso. Observa-se que apenas o PAdx manifestou diferença estatística significativa quanto à variável quando são comparados os horizontes com e sem o caráter coeso, com o horizonte com o caráter coeso apresentando o maior teor de carbono orgânico. Em geral, comparando-se os solos quanto aos seus respectivos teores de carbono orgânico, apenas o PAex típico e o PAdx não diferiram estatisticamente entre si.

Figura 9. Valores médios de carbono orgânico nos horizontes com e sem caráter coeso dos solos avaliados (PVAd, PAex abrupto, PAex típico, PAdx, LAa e LAdx).



Dentre os fatores químicos que se relacionam com a resistência tênsil, a matéria orgânica do solo pode contribuir de diferentes formas. Uma é concorrendo para aumento dos valores de resistência tênsil, fato explicado pela cimentação entre os argilominerais e matéria orgânica mais humificada (FERREIRA *et al.*, 2011; BLANCO-MOURE *et al.*, 2012). Ressalte-se que, como demonstrado por Zhang. (1994), quanto mais humificada a matéria orgânica do solo menor é o seu poder em reduzir a resistência tênsil dos agregados. No presente estudo, o LAa e o LAdx encontram-se em áreas de mata onde há maior aporte de matéria orgânica particulada, que é menos humificada e possui menor interação com as partículas do solo, promovendo redução nos valores de resistência tênsil dos agregados/torrões (TORMENA *et al.*, 2008).

Outra forma tem efeito contrário, com a matéria orgânica contribuindo para maior porosidade do agregado, o que diminui o número de ligações entre as partículas; neste caso, se

a força destas ligações não for incrementada, tem-se redução da resistência tênsil (ZHANG, 1994). No presente estudo, resultados semelhantes foram encontrados, ou seja, maiores teores de carbono orgânico possivelmente influenciaram na redução das resistências tênsil dos agregados/torrões no LAa e no LAdx, os quais apresentaram os maiores teores de carbono orgânico e os menores valores de resistência tênsil. Ferreira *et al.* (2011) avaliaram a variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais e, à semelhança do observado nesta pesquisa, encontraram menores valores de resistência tênsil com o aumento nos teores de carbono orgânico total do solo.

Outros autores também relacionaram o conteúdo de carbono orgânico com a resistência tênsil. Chan (1995) e Tormena *et al.* (2008) observaram correlação linear significativa entre resistência tênsil de agregados e teores de carbono orgânico em Latossolo de textura média, indicando que a resistência tênsil de agregados aumentou proporcionalmente com a redução dos teores de carbono orgânico do solo. Blanco-Canqui *et al.* (2005) também obtiveram correlação exponencial significativa entre ambos os parâmetros, porém em Argissolo, evidenciando que o aumento de carbono orgânico do solo implica redução de sua resistência tênsil.

4.4 Resistência tênsil: correlação e regressão com areia, silte e argila

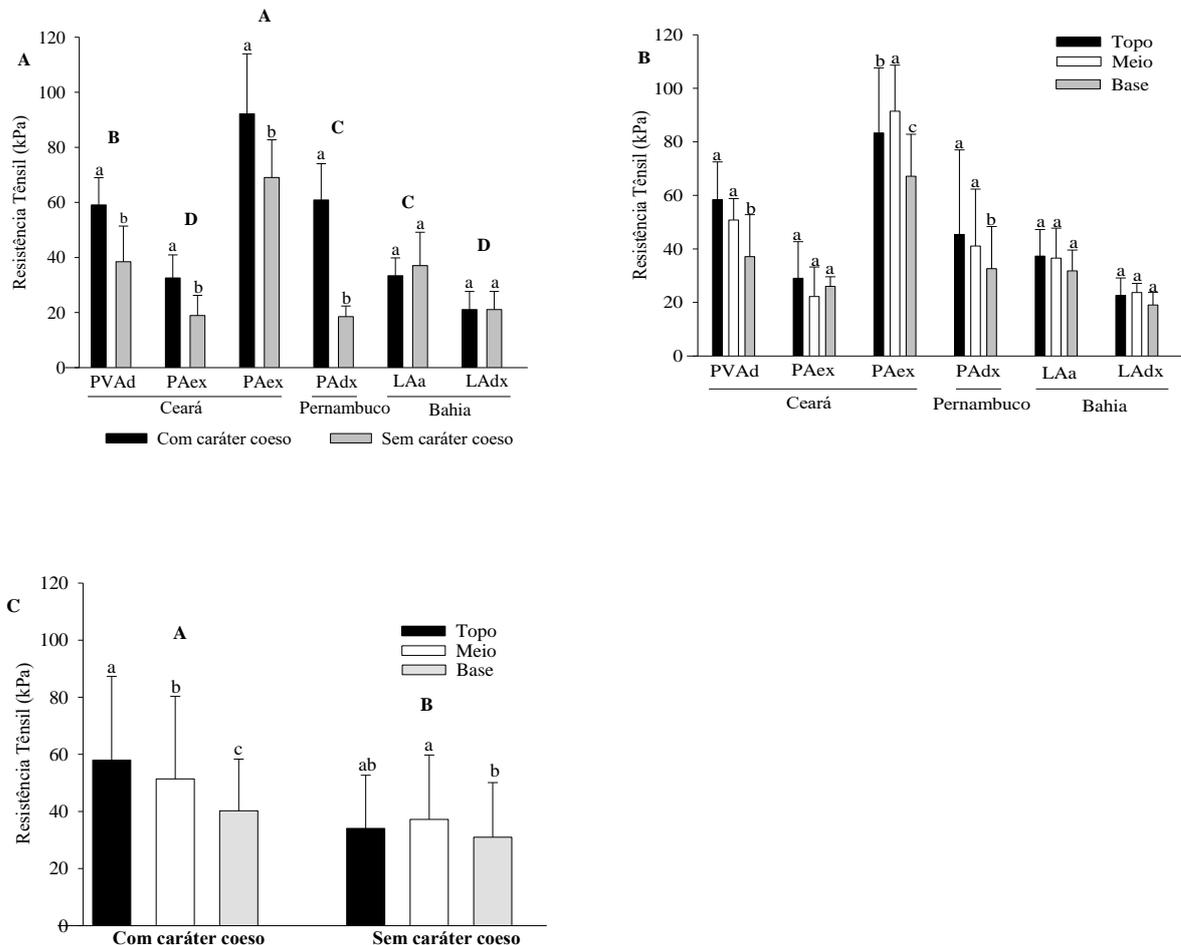
Na Figura 10A pode-se observar a resistência tênsil dos agregados/torrões de cada classe de solo dentro dos horizontes com e sem o caráter coeso. Das seis classes de solos avaliadas, apenas o LAa e o LAdx não apresentaram diferença estatística significativa entre os horizontes com e sem o caráter coeso. Tomando como referência o estudo de Queiroz *et al.* (2018), que na proposição de uma escala de resistência tênsil consideraram o valor limiar de 50 kPa para definir a manifestação do caráter coeso, apenas o PVAd, PAex típico e o PAdx superaram os 50 kPa nos horizontes descritos no campo com caráter coeso (Figura 10A).

Observando a Figura 10B, tem-se a resistência tênsil dos agregados/torrões de cada solo para as posições topo, meio e base. Das seis classes avaliadas, o PAex abrupto, LAa e o LAdx não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as posições. Seguindo a mesma tendência dos dados da Figura 10A, o PVAd, PAex típico e o PAdx apresentaram as maiores resistências à ruptura dos agregados/torrões; a respeito da variação da resistência tênsil ao longo das posições topo, meio e base dessas três classes de solos, houve diferenças estatísticas significativas do topo e base para o PVAd e PAdx, sendo que o topo e meio desses horizontes não diferiram estatisticamente; já o PAex típico, que foi a classe de solo que obteve as maiores

resistências à ruptura dos agregados/torrões, apresentou diferença estatística dos agregados/torrões do meio em relação ao topo e base.

Avaliando a Figura 10C, tem-se todos os dados das resistências tênsil comparando os horizontes com e sem o caráter coeso, como também das posições topo, meio e base dentro de cada horizonte. Houve diferença estatística significativa para os horizontes com caráter coeso nas posições topo, meio e base, seguindo a ordem de maior resistência tênsil variando do topo para a base; já nos horizontes sem caráter coeso, houve diferença estatística, porém não seguiu a mesma sequência da verificada no horizonte com caráter coeso. Pela Figura 10C, há diferença significativa entre os horizontes com e sem o caráter coeso.

Figura 10. Valores médios da resistência tênsil nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



Em estudos realizados por Lima (2004), que encontrou resultados semelhantes, o valor de resistência tênsil em torrões do horizonte com caráter coeso foi de 76,65 kPa e em agregados

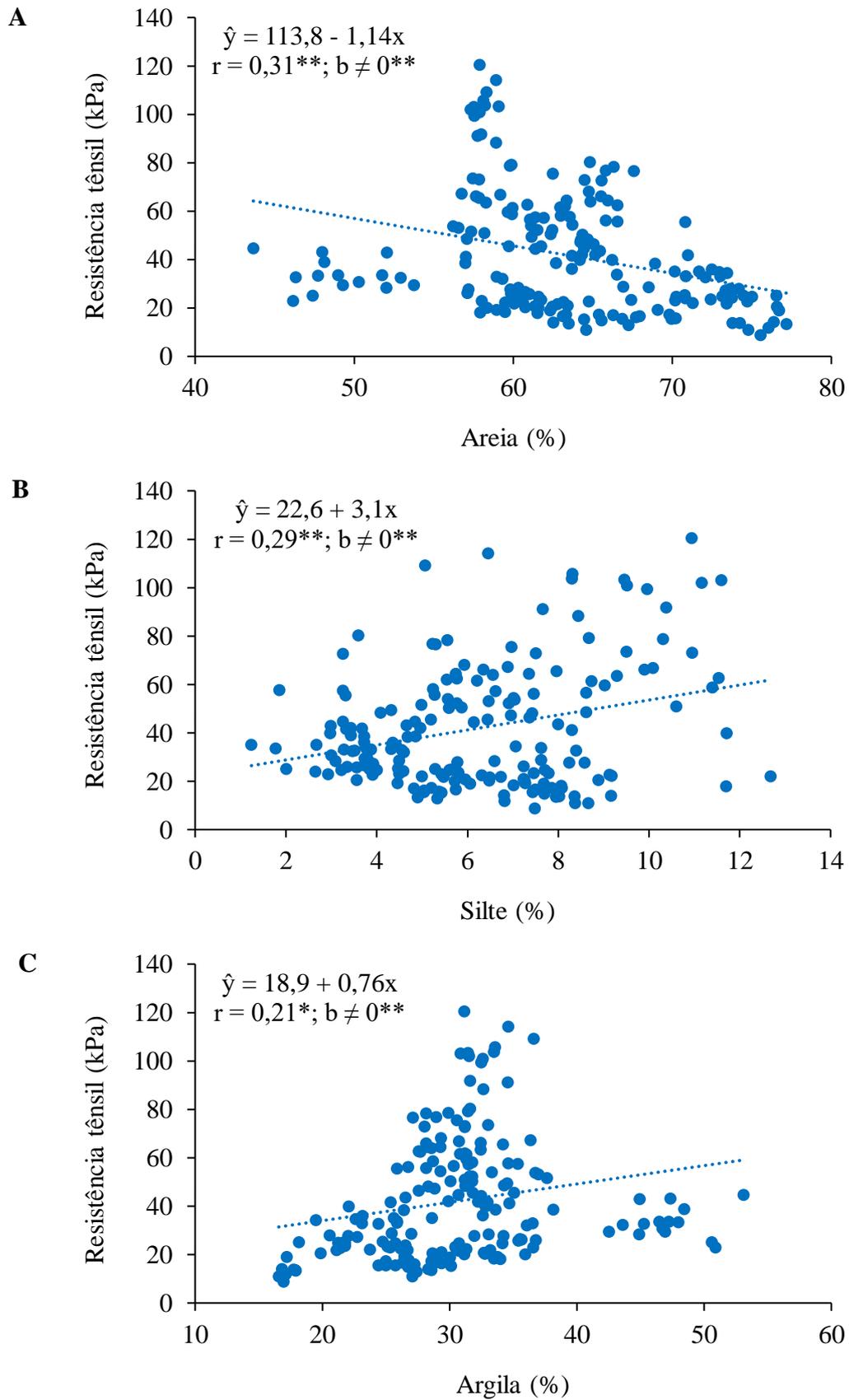
do horizonte sem caráter coeso foi de 18,88 kPa, evidenciando assim, que horizontes com caráter coeso apresentam resistência tênsil superior aos que não manifestam tal atributo. Araújo *et al.* (2018) também encontraram resultados semelhantes, em que em todas as situações avaliadas os torrões dos horizontes com caráter coeso apresentaram-se mais resistentes que os agregados dos horizontes sem caráter coeso, apresentando valores médios de 52,4 e 28,3 kPa, respectivamente. Apesar de não terem avaliado a resistência tênsil, Vieira *et al.* (2012) avaliaram a contribuição de material mal cristalizado na gênese de horizontes coesos em solos do Ceará e encontraram elevadas resistências do solo à penetração nos referidos horizontes.

Na Figura 11 são observadas as correlações da resistência tênsil com os dados de areia, silte e argila. Em todos os casos, as correlações foram baixas, porém significativas a 1%. Constatou-se que a resistência tênsil e fração areia são atributos inversamente proporcionais, ou seja, com o aumento do teor de areia há diminuição da resistência tênsil do agregado/torrão, com comportamento descrito por uma função linear. Isso deve ao fato de a areia, constituída por partículas inertes, que não exibem coesão, concorrer para definir estrutura em grãos simples ou com agregados/torrões pouco resistentes à ruptura em solos com textura mais arenosa. Além disso, a areia, por não apresentar cargas de superfície e apresentar pouca superfície específica, não apresenta a habilidade de fazer ligação por cargas elétricas com outras partículas do solo.

No caso da correlação entre resistência tênsil e a fração silte, pode-se observar que a resistência aumenta com o aumento do teor de silte, cujo comportamento também é descrito por uma função linear. O silte não apresenta carga de superfície, no entanto apresenta-se como uma partícula muito pequena que, segundo Giarola *et al.* (2003), com o aumento da área de contato entre as partículas, possibilita o aumento do estresse efetivo que mantém as partículas do solo mais unidas como também favorece a formação de pontes feitas por materiais finos como argila e silte, conectando os grãos de areia, aumentando a resistência do solo quando seco (MULLINS *et al.*, 1987).

Na correlação entre resistência tênsil e a fração argila ficou evidente que aumentando o teor de argila aumenta-se também a resistência tênsil, com comportamento descrito por uma função linear. Isso pode ser explicado pelo fato de a argila possuir cargas elétricas negativas de superfície que facilitam as ligações entre partículas minerais e/ou orgânicas, atuando como um excelente agente de cimentação/coesão, proporcionando assim a formação de agregados/torrões.

Figura 11. Correlação e regressão da resistência tênsil com todos os dados de areia (A), silte (B) e argila (C) para os solos avaliados.



Diversos autores encontraram resultados semelhantes. Imhoff *et al.* (2002) relatou aumento na resistência tênsil decorrente do aumento do teor de argila. Correa *et al.* (2008), estudando a gênese do caráter coeso, também encontraram maiores resistências em horizontes com maiores teores de argila e enfatizaram que a manifestação desse caráter está relacionada com a iluviação de argila. Bartoli *et al.* (1992) observaram em análises executadas em solos do Brasil e da Índia que os valores maiores de resistência tênsil foram encontrados em solos que apresentaram elevados percentuais de argila.

Em todas as situações a análise de correlação levou a coeficientes angulares b estatisticamente diferentes de zero, significativos a 1%, indicando que a função linear que representa o comportamento da resistência tênsil com cada variável (areia, silte e argila) conduz a uma reta que não é paralela ao eixo das abscissas. Neste caso, o não paralelismo evidencia que a variação de cada uma das referidas frações se reflete em alteração na resistência tênsil de agregados/torrões do solo.

Apesar dos resultados quanto à relação da resistência tênsil e as frações areia, silte e argila, vale salientar que a granulometria não é o único parâmetro a determinar a maior resistência de agregados em solo com caráter coeso. Vieira *et al.* (2012) enfatizaram que a manifestação do caráter coeso está associada também a compostos mal cristalizados (contendo Fe, Al e Si) que podem ser responsáveis pela cimentação em questão. Araújo *et al.* (2018) deram ênfase à granulometria na coesão dos agregados/torrões, em que a areia mal selecionada levou a um maior empacotamento das partículas, contribuindo significativamente para a coesão dos agregados. Portanto é importante mencionar que a manifestação do caráter coeso não se dá apenas pela interação com um fator, mas sim pela influência de vários fatores sejam eles físicos ou químicos – todos concorrendo para formação do caráter coeso.

4.5 Análise de variância e dados médios de ferro, alumínio e silício extraídos por oxalato de amônio

Na Tabela 6 é apresentada a análise de variância para os dados de ferro, alumínio e silício. Para a variável ferro, foram observadas diferenças a 1% de significância para os fatores solos, graus de coesão e posições. Foram observadas também interações significativas (a 1%) entre os fatores solos x graus de coesão, graus de coesão x posições e solos x posições. Para o alumínio, foram observadas diferenças significativas para os fatores solos, graus de coesão e posições e para as interações entre os fatores solos x graus de coesão, graus de coesão x posições e solos x posições, todos a 1% de significância. Para o silício, foram verificadas diferenças

significativas a 1% de significância para os fatores solos, graus de coesão e posições, bem como para as interações entre os fatores solos x graus de coesão e solos x posições ao nível de 1 e 5% de significância, respectivamente.

Tabela 6. Análise de variância para os dados de ferro, alumínio e silício.

Variáveis	Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Ferro	Solos (F1)	5	232,24458	46,44892	973,1569**
	Graus de coesão (F2)	1	19,79506	19,79506	414,7287**
	Posições (F3)	2	0,57714	0,28857	6,0458**
	Interação F1xF2	5	37,96974	7,59395	159,1017**
	Interação F1xF3	10	7,44973	0,74497	15,6080**
	Interação F2xF3	2	1,28782	0,64391	13,4907**
	Interação F1xF2xF3	10	7,18461	0,71846	15,0526**
	Tratamentos	35	306,50868	8,75739	183,4772**
	Erro residual	144	6,87314	0,04773	
Total	179	313,38182			
Alumínio	Solos (F1)	5	476,42762	93,48552	450,1611**
	Graus de coesão (F2)	1	372,58532	372,58532	1794,111**
	Posições (F3)	2	115,84243	57,92121	278,9082**
	Interação F1xF2	5	67,78813	13,55663	65,2793**
	Interação F1xF3	10	15,62687	1,56269	7,5248**
	Interação F2xF3	2	43,69310	21,84655	105,1978**
	Interação F1xF2xF3	10	8,02158	0,80216	3,8626**
	Tratamentos	35	1090,98004	31,17086	150,0971**
	Erro residual	144	29,90466	0,20767	
Total	179	1120,88470			
Silício	Solos (F1)	5	5,26249	1,05250	154,9505**
	Graus de coesão (F2)	1	4,27698	4,27698	629,6643**
	Posições (F3)	2	0,90934	0,45467	66,9373**
	Interação F1xF2	5	0,45971	0,09054	13,3297**
	Interação F1xF3	10	0,13971	0,01397	2,0570*
	Interação F2xF3	2	0,00512	0,00256	0,3766 ^{ns}
	Interação F1xF2xF3	10	0,29608	0,02961	4,3589**
	Tratamentos	35	11,34244	0,32407	47,7101**
	Erro residual	144	0,97812	0,00679	
Total	179	12,32056			

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrados médios; ns: não significativo; **: significativo a 1%; *: significativo a 5%.

Na Figura 12A tem-se os teores de silício em cada classe de solo avaliada dentro dos horizontes com e sem caráter coeso. É possível observar que os horizontes com caráter coeso foram os que estatisticamente apresentaram os maiores teores de silício comparados com os horizontes sem caráter coeso. Comparando-se os solos quanto aos teores de silício, o PVAd (1,08 dg kg⁻¹ para o coeso e 0,83 dg kg⁻¹ para o não coeso) e o LAa (1,04 dg kg⁻¹ para o coeso

e 0,74 dg kg⁻¹ para o não coeso) foram os que apresentaram os maiores teores mas não diferiram estatisticamente entre si, e o PAdx (0,80 dg kg⁻¹ para o coeso e 0,60 dg kg⁻¹ para o não coeso) e o LAdx (0,76 dg kg⁻¹ para o coeso e 0,50 dg kg⁻¹ para o não coeso) seguiram a mesma tendência, sendo iguais estatisticamente. As únicas classes de solos que apresentaram diferenças estatísticas entre todos os solos avaliados foram o PAex abrupto (0,68 dg kg⁻¹ para o coeso e 0,25 dg kg⁻¹ para o não coeso) e o PAex típico (0,80 dg kg⁻¹ para o coeso e 0,35 dg kg⁻¹ para o não coeso).

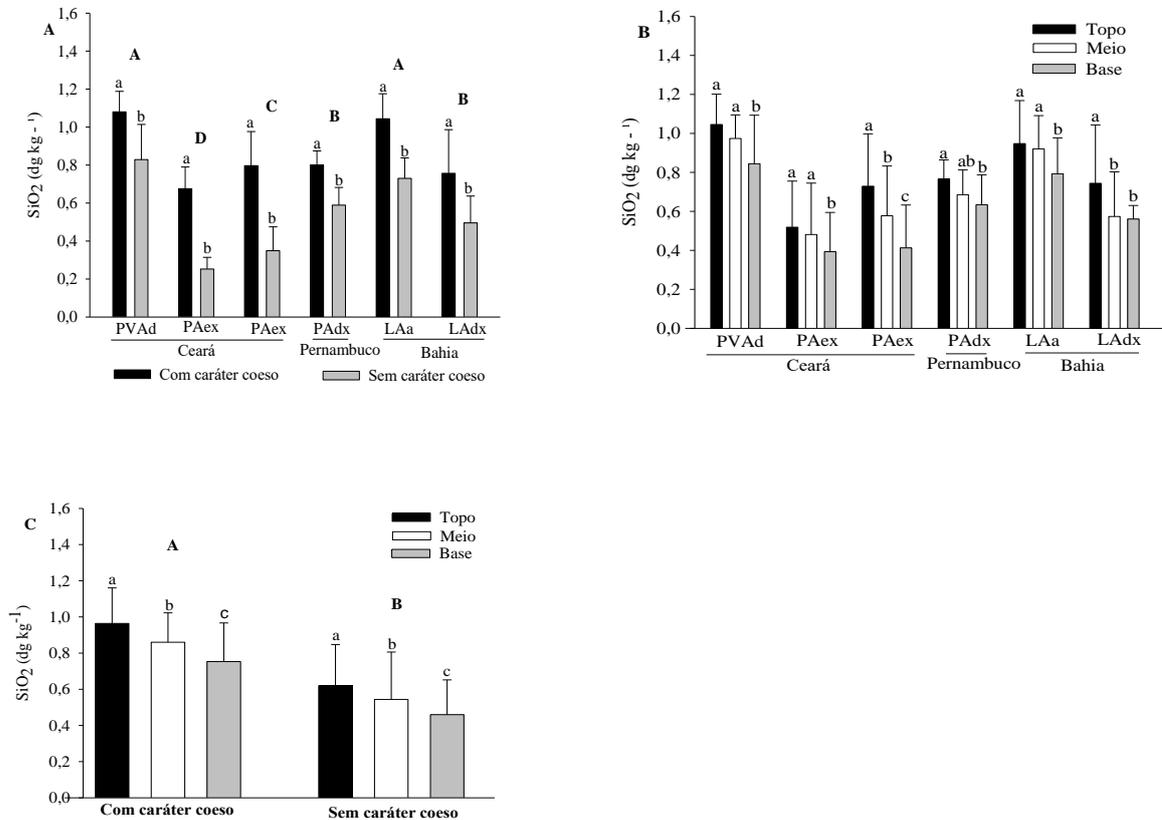
Observando a Figura 12B, tem-se os teores de silício em cada classe de solo nas posições topo, meio e base dentro dos horizontes. Houve diferenças estatísticas significativas nas posições, sendo que topo e meio na maioria dos casos apresentaram-se iguais estatisticamente e com maiores teores de silício. Esse resultado evidencia que existe variação no teor de silício dentro dos horizontes em estudos e que esses teores diminuem do topo à base.

Já na Figura 12C, tem-se todos os dados de silício com a comparação geral dos horizontes com e sem caráter coeso nas posições topo, meio e base. Há diferenças estatísticas significativas entre os horizontes, sendo que os horizontes com caráter coeso apresentaram os maiores teores de silício. No caso das posições (topo, meio e base) ao longo de cada horizonte, também houve diferenças estatística significativa, observando que, a posição topo, obteve os maiores teores de silício com diminuição do topo para a base. Pode-se observar que os teores de silício nas posições topo, meio e base seguiram a mesma tendência da resistência tênsil também nas posições (Figura 10B), podendo-se afirmar que o silício como agente de cimentação concorre também para essa variação da resistência tênsil nas posições avaliadas.

Diversos autores afirmam que o silício pode atuar na cimentação de horizontes de solos, apresentando correlações positivas entre este elemento químico e resistência tênsil (FRANZMEIER *et al.*, 1996; MCBURNET; FRANZMEIER, 1997). Pesquisas que buscaram a compreensão sobre a gênese de horizontes endurecidos, apontam o silício como principal atuante na manifestação deste fenômeno, evidenciando correlações positivas entre resistência do solo e silício extraível (DUCAN; FRANZMEIER, 1999).

É interessante mencionar que na presente pesquisa os teores de silício seguiram a mesma tendência da resistência tênsil para as classes PVAd, PAex típico e PAdx (únicos com resultados acima de 50 kPa), em que os horizontes com caráter coeso, que manifestaram as maiores resistências tênsil, também apresentaram os maiores teores de silício em comparação aos horizontes sem o caráter coeso. Por outro lado, o LAa e o LAdx não diferiram quanto à resistência tênsil comparando-se os horizontes com e sem o caráter coeso, mas apresentaram diferenças significativas nos teores de silício.

Figura 12. Valores médios de silício (SiO_2) extraído por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



Os maiores teores de silício sozinhos não explicam o fato de esses solos serem os que apresentam maior resistência tênsil, visto que o LAa e o LAdx apresentaram maiores teores de silício nos horizontes coesos, no entanto apresentaram os menores valores de resistência tênsil. Uma possível explicação para o ocorrido é que os conteúdos de silício aumentaram nos horizontes coesos, acompanhando o aumento dos teores de argila; naturalmente, a argila sozinha impediu que o silício apresentasse expressão no aumento da coesão, uma vez que a correlação da argila com a coesão é direta e positiva, conforme discutido anteriormente (Figura 11). Outros autores estudando solos com caráter coeso no estado da Bahia, mesmo estado onde foram coletados os LAa e o LAdx do presente estudo, também não observaram efeito do silício na resistência tênsil nos referidos horizontes (GIAROLA *et al.*, 2001; MOREAU, 2001).

Na Figura 13A são apresentados os teores de ferro em cada solo e dentro dos horizontes com e sem o caráter coeso. Observa-se que apenas o PAdx, LAa e o LAdx apresentaram diferenças estatísticas significativas comparando-se os dois horizontes em estudo, com o horizonte sem o caráter coeso apresentando os maiores teores de ferro. Comparando os solos,

todos apresentaram diferenças estatísticas significativas para o teor de ferro associado com formas mal cristalizadas.

Na Figura 13B observa-se os teores de ferro dentro de cada solo no topo, meio e base. Percebe-se que somente o PAdx e o LAa apresentaram diferenças estatísticas referente ao teor do elemento nas posições.

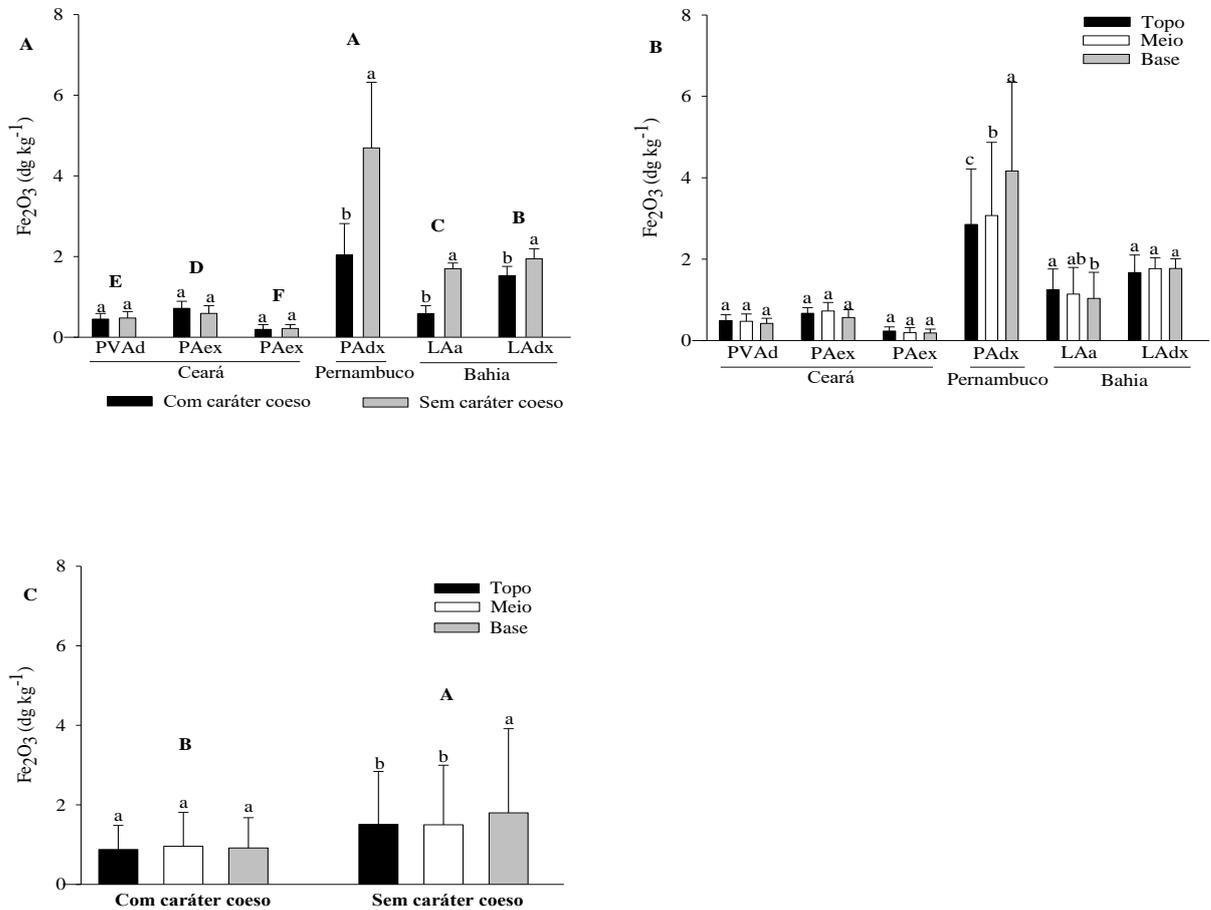
Observando a Figura 13C, tem-se a comparação dos teores de ferro para os horizontes com e sem o caráter coeso dentro das posições em estudo (topo, meio e base). Verifica-se que não há diferenças estatísticas significativas para as posições no horizonte com caráter coeso, no entanto há diferença estatística significativa das posições para o horizonte sem caráter coeso, sendo que apenas a base diferiu das demais posições, tendo os maiores teores de (Fe_2O_3).

De modo geral, pode-se afirmar que todos os solos avaliados nesta pesquisa apresentaram reduzidos teores de ferro, sempre abaixo ou próximos de 2 dg kg^{-1} , com exceção apenas para o horizonte sem o caráter coeso do PAdx. Esse resultado corrobora Lima Neto *et al.* (2009), que também encontraram baixos teores do mesmo elemento ao avaliarem a gênese do caráter coeso em Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas. Os baixos teores de ferro encontrados na costa litorânea em ambientes da Formação Barreiras estão associados à pobreza do elemento no material de origem (RIBEIRO, 1998).

Os solos são tão mais coesos e endurecidos quanto menores os teores de ferro (Fe_2O_3), ou seja, existe uma relação inversa entre o aumento de ferro, especialmente o de ferro livre, e o grau de coesão do solo. Ocorre que a presença de óxidos de ferro juntamente com óxidos de alumínio e matéria orgânica tende a desorganizar as partículas do solo em escala microscópica e, conseqüentemente, concorrer para uma estrutura mais próxima do tipo granular, diminuindo assim a coesão do solo (FERREIRA *et al.*, 1999; MOREAU, 2001).

Observando os teores de ferro e os valores de resistência tênsil no presente estudo, tem-se que para o PVAd, PAex abruptico, PAex típico e o PAdx foram encontradas relações inversas, ou seja, quanto menores teores de ferro (Figura 13A) maiores os valores de resistência tênsil (Figura 10A).

Figura 13. Valores médios de ferro (Fe_2O_3) extraído por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).

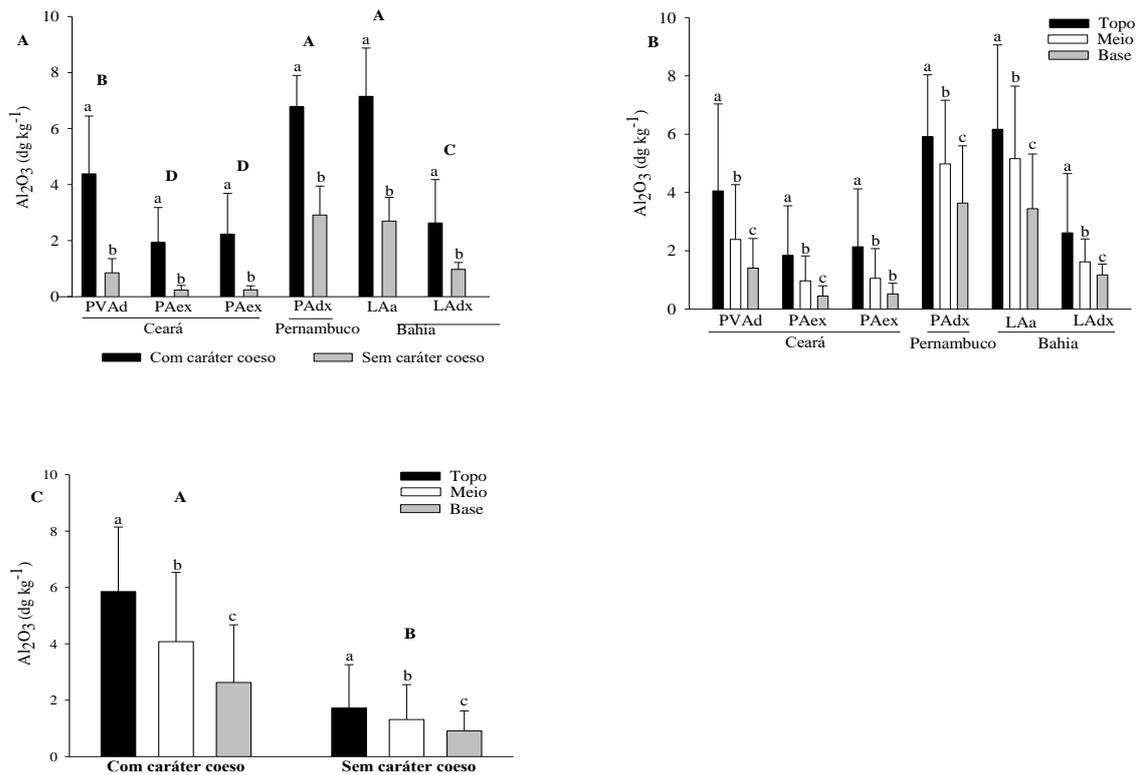


Na Figura 14A observa-se os teores de alumínio em cada classe de solo dentro dos horizontes avaliados. Comparando-se os teores médios de alumínio dos dois horizontes em estudo em cada solo, têm-se diferenças estatísticas significativas entre os horizontes com e sem o caráter coeso, sendo que os horizontes com caráter coeso se destacaram com os maiores teores de alumínio. Comparando-se os teores médios de alumínio entre os solos, o PAex abruptico e o PAex típico foram iguais estatisticamente, assim como o PAdx e o LAa, foram restando apenas o PVAd e o LAdx com diferenças estatísticas quanto aos teores de alumínio em relação aos demais solos.

Verificando a Figura 14B, observa-se os teores médios de alumínio em cada classe de solo levando em consideração as posições topo, meio e base. Todas as posições dentro de cada solo diferiram estatisticamente, com redução do teor de alumínio do topo para base.

Na Figura 14C estão apresentados todos os dados médios, com a comparação dos teores de alumínio entre os horizontes avaliados (com e sem o caráter coeso) nas posições topo, meio e base. Foram evidentes as diferenças estatísticas significativas entre os horizontes, bem como nas posições.

Figura 14. Valores médios de alumínio (Al_2O_3) extraídos por oxalato de amônio nos horizontes com e sem caráter coeso de cada solo (A), nas posições topo, meio e base de cada solo (B) e nas posições topo, meio e base dos horizontes com e sem o caráter coeso (C).



É importante mencionar que os teores de alumínio foram superiores (média dos coesos: $4,18 \text{ dg kg}^{-1}$; média dos não coesos: $1,32 \text{ dg kg}^{-1}$) aos teores de silício e ferro. Vieira *et al.* (2012) encontram resultados semelhantes. Ribeiro (1998) explica que estes maiores teores de alumínio resultam de sua baixa mobilidade no solo. Pode-se observar que os teores de alumínio seguiram a mesma tendência dos teores de silício, ou seja, apresentaram diferenças estatísticas significativas em todos os solos, de modo que os horizontes com caráter coeso se destacaram com os maiores teores desses elementos quando comparados aos horizontes sem caráter coeso.

De acordo com Moreau (2001), o alumínio não pode ser negligenciado na contribuição de mecanismos de endurecimento no solo, visto que este elemento se encontra associado ao silício em condições ambientais e pela sua interação com este elemento na adsorção. Em solos com soluções ricas em alumínio e silício ocorre co-precipitação de ambos os elementos, os

quais, devido às suas afinidades químicas, podem formar aluminossilicatos e hidroxialuminossilicatos (DOUCET *et al.*, 2001).

No presente estudo o alumínio associado a compostos mal cristalizados apresentou atuação relevante nos horizontes com caráter coeso, tendo em vista que foram esses horizontes que apresentaram os maiores valores de resistência tênsil em comparação com os horizontes sem o referido atributo. Outros autores também realizaram trabalhos em áreas dos Tabuleiros Costeiros e concluíram que o alumínio (extraído por oxalato) também contribuiu significativamente na manifestação dessa cimentação (ARAÚJO FILHO, 2001; ROMERO, 2003).

5 CONCLUSÕES

A resistência tênsil é diretamente associada à coesão do solo.

A granulometria não explica sozinha a gênese do caráter coeso; no entanto, a má seleção de grãos da fração areia concorre para a coesão dos agregados/torrões.

Os teores de silício e alumínio associados a compostos mal cristalizados contribuem para a gênese da coesão como atributo diagnóstico.

Os teores de ferro associados a compostos mal cristalizados não contribuíram para a gênese da coesão como atributo diagnóstico.

Há variabilidade da resistência tênsil, principalmente nos horizontes descritos com o caráter coeso, com redução da coesão do topo para a base do horizonte.

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 Ciência do Solo**, [S.I.], 22: 1-9, 1998.
- ACHÁ-PANOSO, L. Latossolo Vermelho-Amarelo de “Tabuleiro” do Espírito Santo: Formação, características e classificação. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1976. 116p. (**Tese de Livre Docência**).
- ALMEIDA, B.G.; SILVA, A. P. ; RAINE, S.R. ; FIGUEIREDO, G.C. Evaluation of automotive varnish as a coating for density measurements of soil clods. **Soil Science Society of America Journal**, [S.I.], v. 73, p. 449, 2009.
- ALMEIDA, B.G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Piracicaba, 2008. 103p. Tese (**Doutorado**). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, 2008.
- 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.
- ANJOS, L.H.C. Caracterização, gênese, classificação e aptidão agrícola de uma seqüência de solos do Terciário na região de Campos, RJ. 1985. 194f. **Dissertação (Mestrado em Ciência do solo)** - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Iraguaí, 1985.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123-142.
- ARAÚJO, A.M.S.S.; MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; SILVA, C.P.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; ALMEIDA, B.G.; MOTA, J.C.A. Tensile strength in horizons with and without cohesive charater: variability and relation with granulometry. **Catena**, [S.I.], v. 166, p. 290-297, 2018.
- BARROS, L.C.; VALENÇA, L.M.M.; MANSO, V.A.V.; MADRUGA FILHO, J.D.; OLIVEIRA, J.A.R. Textura, composição e arredondamento dos sedimentos da plataforma continental interna adjacente às desembocaduras sul do canal de Santa Cruz e do rio Timbó, Norte do estado de Pernambuco. **Revista Estudos Geológicos**, [S.I.], v. 17, p. 58-70, 2007.
- BARTOLI, F.; BURTIN, G.; GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. **Geoderma**, [S.I.], v. 54, p. 259-274, 1992.

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

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of American Journal**, [S.I.], v. 69, p. 1472-1481, 2005.

BLANCO-MOURE, N., MORET-FERNÁNDEZ, D.; LÓPEZ, M.V. Dynamics of aggregate destabilization by water in soils under long-term conservation tillage in semiarid Spain. **Catena**, [S.I.], 99, 34-41, 2012.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 716 p

CHADWICK, O.A.; HENDRICKS, D.M.; NETTLETON, W.D. Silica in duric soils. **Science Society of American Journal**, [S.I.], v. 54, p. 1060-1067, 1987.

CHAN, K.Y. Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia. **Soil Tillage Res.**, [S.I.], 34:105–113, 1995.

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**, [S.I.], v. 54, p. 1060-1067, 1990.

CHARTRES, G.J.; MULLINS, C.A.; LAL, R. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. **Soil Tillage Research**, [S.I.], v. 28, p. 1-13, 1993.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do Tabuleiro Costeiro. **Sciencia Agricola**, [S.I.], v. 55, p. 367-378, 1998.

CINTRA, F.L.D.; RESENDE, R.S.; LEAL, M.L.S.; PORTELA, J.C. Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 33, n. 4, p. 1041-1051, 2009.

CORNELIS, J.T.; DELVAUX, B.; GEORG, R.B.; LUCAS, Y.; RANGER, J.; OPFERGELT, S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, [S.I.], v. 8, p. 89-112, 2011.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CAMÊLO, D. L. Formas de ferro, silício e, ou, alumínio na gênese de fragipãs e horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, [S.I.], v. 39, p. 940-949, 2015.

CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRE, T.C.P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 32, p. 297-313, 2008.

DEXTER, A.R.; CHAN, K.Y. Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations. **Journal Soil Sciencia**, [S.I.], v. 42, p. 219-226, 1991.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2. ed. New York, Marcelo Dekker, 2000. p. 401-430.

DOUCET, F.J.; SCHNEIDER, C.; BONES, J. S.; KRETCHMER, A.; MOSS, I.; TEKELY, P.; EXLEY, C. The formation of hydroxyaluminosilicates of geochemical and biological significance. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [S.I.], v. 65, N. 15, p. 2461-2467, 2001.

DUARTE, M.N.; CURI, N.; PEREZ, D.N.; KAMPF, N.; CLAESSEN, M.E.C. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.I.], 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**, [S.I.], v. 63, p. 923- 929, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Reunião de classificação, correlação e aplicação de levantamento de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23. Rio de Janeiro, 1995. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. 157p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 306 p. 2006

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília-DF: Embrapa, 2018.

FERREIRA, A.O.; SÁ, J.C.M.; GIAROLA, N.F.B.; HARMS, M.G.; MIARA, S.; BAVOSO, M.A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C.Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], 35:437-445, 2011.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 23, p. 507-514, 1999.

FIGUEREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B; MORAES, S.O; ALMEIDA, B.G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático; modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 35, p. 389-409, 2011.

FOLK, R.L; WARD, W.C. Brazos river bar: A study on the significance of grain-size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S.I.], v. 27, p. 3-26, 1957.

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**, [S.I.], v. 60, p.1178-1187, 1996.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle - size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil Analysis. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 383-411, (**Agronomy Monography**), 1986.

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**, [S.I.], v.33, p.33-40, 2009.

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

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

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

GUÉRIF, J. Determination of the tensile-strength of soil aggregates – review and proposal for an improved technique. **Agronomie**, Paris, v. 8, p. 281-288, 1988.

GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an Oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agricola**, [S.I.], v. 66, p. 499-505, 2009.

HARRIS, W.L. The soil compaction process. In: BARNES, K.K., org. **Compaction of Agricultural Soils**. St. Joseph, ASAE, 1971. p.9-44.

IBARRA, S. Y.; McKYES, E.; BROUGHTON, R.S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 15-23, 2005.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, [S.I.], v. 66, p. 1656-1661, 2002.

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: **Reunião técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, Embrapa, CPATC; CNPMF; IGUFBA, p. 13-26, 1996.

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, p. 19-46. 2001.

JONG VAN LIER, Q.; VIDAL-TORRADO, P. PHI: Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria de sedimentos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 16, p. 277-281, 1992.

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**, [S.I.], v. 487, p. 117-128, 2003.

LI, X., COLES, B.J., RAMSEY, M.H., THORNTON, I. Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. **Chemical Geology**, [S.I.], v. 124, p. 109-123, 1995.

LIMA NETO, J.A. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos da região dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas Recife. 2008. 83p. **Dissertação (Ciências do Solo)** - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2008.

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

LIMA NETO, J.A.; RIBEIRO, M.R.; CORRÊA, M.M.; SOUZA JUNIOR, V.S.; ARAUJO FILHO, J.C.; LIMA, J.F.W.F. 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**, [S.I.], 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, 85p. **(Tese de Doutorado)**, 2004

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; JACOMINE, P.T.K.; ROMERO, R.E.; LIBARDI, P.L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], 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, L.S. Aspectos sobre o uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 22, p. 34-39, (Boletim Informativo), 1997.

McBURNETT, S.L; FRANZMEIER, D.P. Pedogenesis and cementation in calcareous till in Indiana. **Soil Science Society of America Journal**, [S.I.], v.61, p. 1098-1104, 1997.

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., DAY, J.H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. **Canadian Journal Soil Science**, [S.I.], v. 46, p. 13-22, 1966.

MELO FILHO, H.F.R.; ARAÚJO FILHO, J.O. Descrição de perfil (1984). In: **REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**. Anais... Cruz das Almas, p 7-10, 1996.

MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SINGH, B.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 26, p. 53-64, 2002.

MENEZES, A. S. Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de Tabuleiro Costeiro. 2016, 76p. Dissertação (Solos e Nutrição de plantas) UFC, Fortaleza, 2016.

MORAIS, R.M.O.; MELLO, C.L.; COSTA, F.O.; SANTOS, P.F. Fácies Sedimentares e Ambientes Depositionais Associados aos Depósitos da Formação Barreiras no Estado do Rio de Janeiro. Revista do Instituto de Geociências –USP. **Geol. USP Sér. Cient.**, São Paulo, v.6, n.2, p. 19-30, 2006.

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, 138 p. (**Tese de Doutorado**), 2001.

MOREAU, A.M.S.S.; KER, J.C.; COSTA, L.M.; GOMES, F.H. Caracterização de solos de duas topossequências em Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 30, p. 1007-1019, 2006.

MOTA, J.C.A. Descrição morfológica de um Latossolo Amarelo Alumínico argissólico. Fortaleza: UFC, 2016 (**informação pessoal**).

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. Hardsetting. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. Methods for assesment of soil degradation. **Advances in soil science**. New York, CRC Press, p. 09-128. 1997.

MULLINS, C.E.; MACLED, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M.; YOUNG, I.M. Hardsetting soils: Behaviour, occurrence and management. **Advances in Soil Science**, [S.I.], v. 11, p. 37-108, 1990.

MULLINS, C.E.; YOUNG, I.M.; BENGHUH, A.G.; LEY, G.J. Hardsetting soils. **Soil Use and Management**, [S.I.], v.3, p. 79-83, 1987.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P.; RASMUSSEN, K.J. No-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. **Soil and Tillage Research**, [S.I.], v. 62, p.1-14, 2001.

OLIVEIRA, L.B.; DANTAS, H.S.; CAMPELO, A.B.; GALVÃO, S.J.; GOMES, I.F. Caracterização de adensamento no subsolo de uma área de tabuleiro da Estação Experimental do Curado, Recife. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, p. 207-214, 1968.

PANAYIOTOPOULOS, K.P.; MULLINS, C.E. Packing of sands. **Journal of Soil Science**, [S.I.], v. 36, p. 129-139, 1985.

PANAYIOTOPOULOS, K.P. Packing of sands – A review. **Soil Tillage Research**, [S.I.], v. 13, p. 101-121, 1989.

PERFECT, E.; KAY, B.D.; SILVA, A.P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. **Soil Science Society American Journal**, [S.I.], v. 59, p. 532-537, 1995.

PONTE, C.M.; RIBEIRO, L.P. Estudo da gênese de horizontes coesos em uma topossequência na área do Candeal. Escola de Agronomia da UFBA. Salvador: IGEO/ UFBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 239-247, 2001.

POWERS, M. C. Size analysis of sands by a sedimentation technique. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S.I.], v. 27, p. 460-468. 1953.

QUEIROZ, A. S. Estimativa da friabilidade de solos com dados de resistência tênsil. 2018. 33p **Monografia (Ciência do Solo)** – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.

QUEIROZ, A.S.; SILVA, C.P.; ALENCAR, T.L.; ROMERO, R.E.; MOTA, J.C.A. Resistência tênsil: variabilidade no horizonte e valor limiar para o caráter coeso em Argissolos do Ceará. XXXVII Encontro de Iniciação Científica. **Anais dos Encontros Universitários da UFC**, 2018.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, [S.I.], v. 54, p. 145-153, 2000.

RAMOS, M.R.; CURCIO, G.R.; DEDECEK, R.A.; MELO V.F.; UHLMANN, A. Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos da formação Macacu, no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 37, p. 837-845, 2013.

RESENDE, M.; CARVALHO FILHO, A.; LANI, J.L. Características do solo e da paisagem que influenciam a susceptibilidade à erosão. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO. Goiânia, 1990. **Anais...** Campinas, Fundação Cargil, p.32-93, 1992

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, S.A. Pedologia: Base para distinção de ambientes. 4.ed. Viçosa, MG, **NEPUT**, 2002. 338 p.

REZENDE, J.O. Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: Limitações agrícolas e manejo. Salvador, **SEAGRI**, 2000. 117 p. (Série Estudos Agrícolas, 1), 2000.

RIBEIRO, L.P. Sílica em horizontes coesos de solos da Bahia. **Universitas**, Salvador, n. 38, out/dez, p. 59-80, 1986.

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; CNPMF; EAUFBA; IGUFBA I.A deposicional model. **Soil Science Society of American Journal**, [S.I.], v. 51, p. 975-982, 1987.

RIBEIRO, L.P. Premiers resultas sur la gênese des sols a horizons indures dans la region du Cruz das Almas, BA, Brésil. In: TABLE RONDE SUR LO RGANIZATION ET DINAMIQUE INTERNE DE LA CORVERTUNE PEDOLOGIQUE, 1991, Caen. **Anais...** Caen: CNRS, 1991.

RIBEIRO, L.P. Gênese, evolu o e degrada o dos solos amarelos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju, EMBRAPA-CPATC & CNPMF/EAUFBA/IGUFBA, 1996. p. 27-35.

RIBEIRO, L.P. Os Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano: Gênese, evolu o e degrada o. Salvador, **Seplantec**, CADCT. 99 p, 1998.

RIBEIRO, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 161-168.

RIBEIRO, K.D; MENEZES, S.M; MESQUITA, M.G.B.F; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciada pela distribui o de poros de seis classes de solos da região de Lavras- MG. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.I.], v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.

ROMERO, R.E. Gênese e degrada o de duripãs em uma toposseq ncia dos Tabuleiros Costeiros, Conde - Bahia. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2003. 144p. (**Tese de Doutorado**).

SANTANA, M.B.; SILVA, L.S.; SOUZA, L.D.; FONTES, L.E.F. Atributos físicos do solo e distribui o do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de tabuleiros costeiros do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 30, p. 1-12, 2006.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; MERMUT, A.R.; BENKE, M.B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-a o car em Latossolos Amarelos Coesos do estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 22, p. 515-525, 1998.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, [S.I.], v. 78, p. 93-111, 1997.

SOUZA, L.S. Uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1996. p. 36-75. SSSA, 1986.p. 69-97.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A.C.P.S.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FLEXOR, J.M.; AZEVEDO, A.E.G. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.I.], v. 15, p. 273-286, 1985.

TESSIER, A., CAMPBELL, P.G.C., BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. **Analytical Chemistry**, [S.I.], v. 51, p. 844-851, 1979.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 32, p. 33-42, 2008.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **European Journal Soil Science**, [S.I.], v. 32, p. 203-213, 1981.

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

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, [S.I.], v. 49, p. 73-84, 1998.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, [S.I.], v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, [S.I.], v. 31:263-175, 1994.