



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

**ALEXANDRE DOS SANTOS QUEIROZ**

**UMIDADE COMO FATOR À INFERÊNCIA DO *CARÁTER COESO* EM SOLOS DOS  
TABULEIROS COSTEIROS**

**FORTALEZA**

**2021**

ALEXANDRE DOS SANTOS QUEIROZ

UMIDADE COMO FATOR À INFERÊNCIA DO *CARÁTER COESO* EM SOLOS DOS  
TABULEIROS COSTEIROS

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

Orientador: Prof. Jaedson Cláudio Anunciato  
Mota

Coorientador: Prof. Carlos Tadeu dos Santos  
Dias

FORTALEZA

2021

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)

---

Q42u Queiroz, Alexandre dos Santos.  
Umidade como fator à inferência do caráter coeso em solos dos Tabuleiros Costeiros / Alexandre dos Santos Queiroz. – 2021.  
48 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

Coorientação: Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias.

1. Pedometria. 2. Consistência do solo. 3. Adensamento. I. Título.

CDD 631.4

---

ALEXANDRE DOS SANTOS QUEIROZ

UMIDADE COMO FATOR À INFERÊNCIA DO *CARÁTER COESO* EM SOLOS DOS  
TABULEIROS COSTEIROS

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

Orientador: Prof. Jaedson Cláudio Anunciato  
Mota

Coorientador: Prof. Carlos Tadeu dos Santos  
Dias

Aprovado em: 29/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

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

A Deus.

Aos meus pais, Adalberto e Valdenir.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fôlego de vida, pela saúde e por todas as bênçãos a mim concedidas.

Ao meu pai, Francisco Adalberto, e à minha mãe, Maria Valdenir, pela amizade, amor, incentivo e todo esforço realizado para que eu pudesse ter uma educação diferenciada.

Aos meus irmãos, Juliane e Geovani (*In memoriam*), por todo o amor, força e inúmeros momentos de alegrias.

À minha namorada, Adyla Oliveira, pelo companheirismo, compreensão e amor concedidos a mim.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota pela amizade, a boa convivência diária, a disponibilidade em ajudar e a ótima orientação.

Ao Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias, pela coorientação e todo apoio nas análises estatísticas.

Ao Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero pelos ensinamentos, pelas contribuições ao projeto que originou essa dissertação e pela disponibilidade de participação na banca avaliadora.

Ao Prof. Dr. Raul Shiso Toma, pelos ensinamentos, pela participação na minha formação e pela disponibilidade de participação na banca avaliadora.

Ao Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa, pela amizade e pela disponibilidade de participação na banca avaliadora como suplente.

Aos amigos Ms. Sc. Ícaro Vasconcelos e Ms. Sc. Angélica Lopes por todo o valioso auxílio prestado na elaboração dessa dissertação, desde a análises laboratoriais às demais atividades relacionadas a este trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Física/Gênese do Solo, especialmente, Lucas Oliveira e Emanuela Barbosa, pela amizade e toda a ajuda na execução das atividades relacionadas a este trabalho.

Aos colegas da pós-graduação, especialmente, Gabriel Silveira, Lucas Melo, Francisco Lopes, Carlos Galo, Mateus Guimarães, Gilcivan Moreira, Luan Almeida e José Israel pela amizade e a boa convivência durante esta etapa acadêmica.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo, em especial, Francisco José, Deyse de Sousa, Edilson Dote e Marilene Bezerra.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade concedida, pela contribuição com minha formação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

A todos os demais que, de alguma forma, tenham me ajudado na execução deste trabalho.

*“O começo de todas as ciências é o espanto  
de as coisas serem o que são.”* Aristóteles

## RESUMO

O termo *caráter coeso* faz menção a solos nos quais há horizontes minerais subsuperficiais adensados cuja consistência em solo seco varia de *muito dura* a *extremamente dura*, e de *friável* a *firme* em solo úmido. A presença desses horizontes adensados acarreta implicações ao desenvolvimento agrícola principalmente nas estações mais secas do ano. Não se sabe precisamente em que valor de umidade do solo esse atributo pode ser diagnosticado e se ocorre, independentemente do solo, sempre em mesmo valor de resistência tênsil. Portanto, dispor de informações sobre a relação entre umidade e coesão auxilia no diagnóstico do caráter coeso e no planejamento quanto ao manejo de solos. Diante do exposto, para os solos que apresentam o *caráter coeso* as hipóteses foram: i) a consistência *friável* ou *firme* não ocorre em umidade próxima à condição ligeiramente úmida; e ii) a consistência torna-se *muito dura* ou *extremamente dura* antes de a umidade corresponder àquela de solo seco ao ar. Para testá-las, foram coletados blocos de solos em horizontes com *caráter coeso*, com dimensões de 15 × 20 × 10 cm, sendo um solo nos estados do Maranhão, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, e dois no Ceará. Em laboratório, os blocos foram manualmente desfeitos em torrões com diâmetro entre 19 e 25 mm; posteriormente, os torrões foram submetidos ao umedecimento até a capacidade de campo e ao secamento ao ar. Nas duas situações foram medidas as umidades dos agregados/torrões e, em seguida, foram feitas avaliações quanto à resistência tênsil. Um avaliador realizou os testes de consistência em condição de solo úmido e seco; uma fração do torrão foi utilizada para medição da umidade no momento do teste. Os dados obtidos foram analisados utilizando o delineamento inteiramente aleatorizado, com sete tratamentos (sete solos) e dez repetições. Os dados foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, à análise de variância (teste F) e de comparação de médias (teste de Tukey), todos com significância de 5%. Utilizaram-se, também, métodos de estatística multivariada. Parte dos dados foi analisada por regressão, objetivando conhecer os limiares de umidade para a aferição do *caráter coeso* nas condições de solo úmido e seco. Observou-se que, em solo úmido, o efeito da secagem dos agregados/torrões na consistência pôde ser descrito por uma função linear, em que os coeficientes angulares apresentaram valores negativos e significativos a 1%. Ainda em solo seco, foram registradas as consistências *friável*, *firme*, *muito firme* e *extremamente firme*. Em solo seco, constatou-se que, exceto para o solo de Brejo-MA, os coeficientes angulares das funções lineares não foram significativos; Concluiu-se que: i) em solo úmido, a consistência *friável* ou *firme* ocorre em umidade mais próxima à capacidade de campo; ii) em solo seco, a consistência torna-se *muito dura* ou *extremamente dura* antes de o

solo ficar seco ao ar; e iii) é prudente que os sistemas de taxonomia de solos definam o intervalo de umidade em que deva ser feita a avaliação da consistência para fins de aferição do *caráter coeso* em condição de solo úmido.

**Palavras-chave:** pedometria; consistência do solo; adensamento.

## ABSTRACT

The expression cohesive character refers to soil horizons whose consistency ranges from very hard to extremely hard when dry, changing to friable until firm when moist. The presence of cohesive horizons has implications for the agricultural development, especially in the driest periods. However, it is not known the soil moisture value this attribute can be diagnosed and if it occurs, independently of the soil, always at the same tensile strength value. Therefore, having information on the relationship between moisture and cohesion helps in diagnosing the cohesive character and in planning for soil management. Given the above, the hypotheses of this research were: i) in moist soil, in the presence of the cohesive character, the *friable* or *firm* consistency does not occur in moisture corresponding to the slightly moist condition; ii) in dry soil, in the presence of the cohesive character, the consistency becomes *very hard* or *extremely hard* before the value of moisture that corresponds to the air-dried soil. To test them, blocks of soil were collected in horizons with a cohesive character, with dimensions of 15 x 20 x 10 cm in width, length and height, respectively, in the states of Ceará, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, and Maranhão. In the laboratory, the blocks were manually broken into aggregates/clods. The aggregates/clods were moistened until field capacity. After, they were put for air-dried until reach atmospheric equilibrium conditions. In both situations, we measure aggregates/clods moisture. In sequence, tensile strength evaluations were made. After was started consistency qualitative analysis of aggregate/clod by an evaluator. For all tests were measure aggregates/clods moisture. These data were subjected to analysis residues normality by the Kolmogorov-Smirnov test, and F test for analysis of variance, and Tukey test ( $p \leq 0.05$ ) for means comparison. Methods multivariate statistics also were used. Regression analysis was performed between the values of moisture and scores to consistency attributed by the evaluator, to know the moisture thresholds for measuring the cohesive character in wet and dry soil conditions. In wet soil condition, the drying effect of aggregates/clods on consistency could be described by a linear function, in which the angular coefficients presented negative and significant values at 1%. In the moisture range that defines the moist soil were recorded consistencies *friable*, *firm*, *very firm* and *extremely firm*. For the dry soil condition, it was found that, except for the Brejo-MA soil, the angular coefficients of the linear functions were not significant; for the Brejo-MA soil, it was found that in any moisture in the dry soil range (between  $U_{sm}$  and air-dried), the results refer to a score corresponding to a *very hard* or *extremely hard* consistency. It was concluded that: i) in wet soil, the consistencies *friable* or *firm* occurs at moisture closer to field capacity; ii) in dry soil, the consistency becomes *very*

*hard* or *extremely hard* before reaching moisture defined as air-dried soil; and iii) it is prudent that soil taxonomy systems define the moisture range in which the consistency evaluation must be made for the purpose of measuring the *cohesive character* in moist soil condition.

**Keywords:** pedometry; soil consistency; densification.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Locais de coleta dos solos estudados .....	23
Figura 2	– Esquema ilustrativo das coletas do solo em campo e preparo dos agregados/torrões em laboratório .....	25
Figura 3	– Limites de umidade para solo úmido ( $U_{cc}$ umidade gravimétrica na capacidade de campo; $U_u$ , umidade gravimétrica em solo úmido; $U_{lu}$ - $U_{ls}$ , umidade gravimétrica levemente úmido e levemente seco; $U_{ar}$ umidade gravimétrica de solo seco ao ar. $T_1$ , $T_2$ , $T_3$ e $T_n$ são intervalos no tempo para o secamento do solo) .....	26
Figura 4	– Análise de regressão entre teor de argila e umidade na capacidade de campo, em solo seco ao ar e capacidade de água disponível dos solos estudados .....	34
Figura 5	– Valores médios (com os erros-padrão) da densidade do solo .....	35
Figura 6	– Valores médios de resistência tênsil dos torrões secos ao ar .....	36
Figura 7	– Notas para as consistências dos agregados/torrões com umidade entre capacidade de campo e levemente úmidos ( $U_{cc}$ - $U_{lu}$ ) e entre levemente secos e secos ao ar ( $U_{ls}$ - $U_{ar}$ ) para os solos estudados .....	37
Figura 8	– Gráfico biplot com dois componentes principais .....	40
Figura 9	– Análise de agrupamento (SE: Sergipe; MA; Maranhão; CE2: Ceará, Fortaleza; BA: Bahia; AL: Alagoas; PE: Pernambuco; CE1: Ceará, Pacajus) .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição morfológica dos horizontes com <i>caráter coeso</i> nos solos estudados .....	24
Tabela 2 – Análise de variância para os dados de argila, areia, silte, em $\text{g kg}^{-1}$ , teor de água do solo na capacidade de campo ( $U_{cc}$ ) e no solo seco ao ar ( $U_{ar}$ ), em $\text{g g}^{-1}$ , densidade do solo, em $\text{g cm}^{-3}$ , e resistência tênsil, em kPa .....	31
Tabela 3 – Valores médios de argila, areia e silte. Em cada fração, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). (classificação textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) .....	32
Tabela 4 – Valores médios de umidade na capacidade de campo ( $U_{cc}$ ) e em solo seco ao ar ( $U_{ar}$ ). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ) .....	33

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	17
2.1	Locais de ocorrência de solos com caráter coeso .....	17
2.2	O <i>caráter coeso</i> como atributo diagnóstico: aspectos genéticos.....	18
2.3	O <i>caráter coeso</i> e interfaces com outros atributos físicos do solo .....	19
2.4	Umidade do solo versus diagnóstico do <i>caráter coeso</i> .....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	23
3.1	Aspectos descritivo dos solos .....	23
3.2	Procedimentos experimentais .....	25
3.2.1	<i>Definição dos limites de umidade do solo para as consistências entre umidade na capacidade de campo e levemente úmido (<math>U_{cc}</math>-<math>U_{lu}</math>) e entre umidade de solo levemente seco e solo seco ao ar (<math>U_{ls}</math>-<math>U_{ar}</math>).....</i>	25
3.2.2	<i>Descrição da consistência do solo por avaliadores em laboratório .....</i>	27
3.2.3	<i>Medição da resistência tênsil de torrões secos ao ar .....</i>	28
3.2.4	<i>Granulometria.....</i>	28
3.2.5	<i>Densidade do solo .....</i>	29
3.3	Análise estatística dos dados .....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

## 1 INTRODUÇÃO

O termo *caráter coeso* faz menção a solos nos quais há horizontes minerais subsuperficiais adensados e têm como característica a consistência variando de *muito dura* a *extremamente dura* em solo seco, e de *friável* a *firme* em solo úmido.

A distribuição de solos com *caráter coeso* é relatada ao longo da costa brasileira a uma unidade geomorfológica denominada de Tabuleiros Costeiros. As áreas dessa unidade geomorfológica apresentam grande importância econômica e social, pois correspondem a uma área de alta densidade populacional e potencial de produção de alimentos, sendo relatada na literatura a exploração agrícola, com destaque para a cultura da cana-de-açúcar, fruticultura e pecuária, atividades que ocupam expressiva parcela desses solos.

A presença desses horizontes adensados acarreta implicações ao desenvolvimento agrícola, pois esses horizontes podem executar função de barreira física ao fluxo de ar, água e ao crescimento de raízes.

No campo, a aferição do *caráter coeso* é feita por meio da descrição da consistência em umidade correspondente às condições de solo úmido e seco (neste caso, ao ar), quando deve ser, respectivamente, *friável* ou *firme* e *muito dura* ou *extremamente dura*. Vale salientar que são escassas na literatura informações de faixas de umidade para as quais o *caráter coeso* possa ser reconhecido, tornando a avaliação com possibilidade de elevada variabilidade, visto que a manifestação de forças coesivas é dependente da umidade do solo.

Nos últimos anos, trabalhos científicos foram realizados com o intuito de relacionar o *caráter coeso* com outros atributos do solo, com destaque à resistência do solo à penetração e à resistência tênsil de agregados/torrões, sendo essa definida como a força necessária para causar a ruptura de um agregado pelo seu plano de fraqueza.

A resistência tênsil tem-se mostrado um atributo sensível à inferência do *caráter coeso* e está diretamente relacionada com a umidade do solo. Logo, uma vez conhecidas a umidade do solo e o valor de resistência tênsil em que a coesão deixa de ser um impedimento ao desenvolvimento radicular, é possível manejar a água a fim de suprir a demanda hídrica das culturas e tornar o solo friável – logicamente, não desconsiderando a necessidade de manter poros de aeração suficientes para as trocas gasosas.

Diante do exposto, para os solos que apresentam o *caráter coeso* as hipóteses foram: i) a consistência *friável* ou *firme* não ocorre em umidade próxima à condição ligeiramente úmida; e ii) a consistência torna-se *muito dura* ou *extremamente dura* antes de a umidade corresponder àquela de solo seco ao ar.

Assim, objetivou-se com esta pesquisa: i) determinar as faixas de umidade para a consistência de solos com *caráter coeso* para, então, identificar quando o referido atributo pode ser aferido; e ii) traçar para os solos estudados as curvas de *consistência x umidade do solo*.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Locais de ocorrência de solos com caráter coeso

O termo *caráter coeso* é designado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS) para caracterizar horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração da faca, com a consistência variando de *muito dura* a *extremamente dura* quando secos, passando de *friáveis* a *firmes* quando úmidos. Estes horizontes podem apresentar uma estrutura maciça com tendência à formação de blocos (SANTOS *et al.*, 2018).

A ocorrência de solos com o referido caráter está relacionada com depósitos sedimentares argilosos e argiloarenosos associados à Formação Barreiras, pertencente à unidade geomorfológica denominada de Tabuleiros Costeiros. Os solos dos Tabuleiros Costeiros estão distribuídos, principalmente, por uma grande extensão da costa brasileira, englobando as regiões Norte, Nordeste e Sudeste, estendendo-se desde o estado do Amapá ao Rio de Janeiro (JACOMINE, 2001).

Apesar da extensa área, os solos dos Tabuleiros Costeiros têm similaridades em propriedades físicas, químicas e morfológicas. Em geral, são solos de baixa fertilidade natural, baixa capacidade de troca catiônica e, por causa do *caráter coeso*, podem apresentar uma camada endurecida que se torna uma limitação ao desenvolvimento radicular em períodos secos, além de exercer a função de barreira física para o fluxo de água nos períodos chuvosos, o que pode aumentar a susceptibilidade à erosão do solo caso essa camada esteja próxima da superfície ou, se em profundidades maiores, favorecer que o solo continue úmido por maior tempo.

Em geral, o atributo é observado nos horizontes transicionais AB e/ou, BA, entre 30 cm e 70 cm da superfície do solo, podendo prolongar-se até o Bw ou coincidir com o Bt, no todo ou em parte (SANTOS *et al.*, 2018). Também já foram identificados horizontes com caráter coeso em profundidades maiores que 1 m e, associados ao horizonte Bt (LIMA *et al.*, 2004; VIEIRA *et al.*, 2012).

As principais classes de solos encontradas nos Tabuleiros Costeiros são os Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. São relatadas também a ocorrência de Espodossolos, Argissolos Acinzentados, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos, nessa unidade geomorfológica, porém em menor expressão (EMBRAPA, 1995; JACOMINE, 1996; CORRÊA *et al.*, 2008a).

Ressalta-se que a ocorrência desse caráter não está limitada às áreas dos Tabuleiros Costeiros. Ramos *et al.* (2013) relataram a presença de horizontes coesos em solos da Formação Macacu, no estado do Rio de Janeiro. Esta difere da Formação Barreiras devido ao seu período de origem ser mais antigo – período Eoceno.

Autores como Corrêa *et al.* (2008b) discorrem acerca de solos com a presença do *caráter coeso* oriundos de outras formações geológicas, desenvolvidos de granito-gnaiss, como em Argissolos Vermelhos, no sul da Bahia e norte do Espírito Santo. Silva *et al.* (2009) relataram a ocorrência de um solo com evidências da presença do atributo coeso em uma pequena área da região sudeste do Paraná. Além disso, alguns trabalhos evidenciam a presença desses horizontes adensados no continente africano (BREUER; SCHWERTMANN, 1999; MATERECHERA, 2009).

## **2.2 O caráter coeso como atributo diagnóstico: aspectos genéticos**

A gênese do *caráter coeso* é de natureza pedogenética, resultante de vários fatores associados (LIMA NETO *et al.*, 2009). Algumas hipóteses foram postas para explicar a ocorrência do atributo no solo. Ainda na década de 1960, Oliveira *et al.* (1968) atribuíram o adensamento de algumas camadas de solos à translocação de partículas coloidais minerais e orgânicas, provocando assim a obstrução dos macroporos. Anjos (1985) levantou a hipótese de que a formação desses horizontes adensados era causada pela própria condição dos sedimentos que os originou e, em subsuperfície, se dava por meio da compressão causada pelas camadas superiores.

Posteriormente, Franzmeier, Chartres e Wood (1996) estudando os solos australianos denominados *Hardsettings*, com algumas semelhanças aos solos coesos do Brasil (GIAROLA; SILVA, 2002), demonstraram que esse atributo poderia ser resultado da cimentação temporária de partículas com sílica amorfa, dependendo do conteúdo de água no solo.

A condição reversível de polimerização e precipitação desses compostos silicatados no período seco, com a respectiva despolimerização no período úmido também tem sido apontada por outros autores como um dos mecanismos relacionados à gênese do *caráter coeso* (ARAÚJO FILHO; CARVALHO; SILVA, 2001), assim como o adensamento por acúmulo de materiais mais finos e arranjo massivo entre as partículas do solo.

Moreau *et al.* (2006) não encontraram diferenças estatísticas nos teores de agentes cimentantes em horizontes classificados com o caráter coeso em comparação a horizontes sem

este caráter. Além disso, os autores sugeriram que a manifestação de tal atributo é devida o formato placóide da caulinita, o que favorece o arranjo laminar (face-a-face) e se desfaz de acordo com aumento da umidade do solo. No entanto, Vieira *et al.*, (2012) verificaram diminuição da resistência à penetração em alguns perfis de uma topossequência após a remoção do material amorfo, sugerindo a importância desses compostos na gênese do *caráter coeso*.

Entretanto, Giarola *et al.* (2009) verificaram grau de ordenamento da caulinita semelhante em horizontes coesos e não coesos, inferindo que o empacotamento face-a-face da fração argila não está associado com a ocorrência do *caráter coeso* nestes solos.

Ainda em relação às partículas coloidais, Lima Neto *et al.* (2009) constataram maior teor de argila muito fina em horizontes coesos, fato observado devido o maior valor de superfície específica nesses horizontes.

Mais recentemente, Bezerra *et al.*, (2014), Araújo *et al.* (2018) e Silva *et al.*, (2020a) constataram que a má seleção da fração areia concorre para a coesão dos solos, pois nos horizontes subsuperficiais, o maior teor de areia fina tende a ocupar os espaços deixados pelas partículas maiores, e assim, proporcionar adensamento natural desses horizontes, o que, indiretamente, propicia o acúmulo de argila iluvial.

É notório que existe uma diversidade de hipóteses quanto à gênese do *caráter coeso* em solos, algumas até contraditórias. Atualmente, considera-se que a manifestação desse atributo tem causas múltiplas, e sua intensidade dependerá das condições morfopedológicas do meio (SILVA *et al.*, 2020a).

### **2.3 O *caráter coeso* e interfaces com outros atributos físicos do solo**

Os solos com *caráter coeso*, quando no período de sua máxima expressão, implicam em limitações ao desenvolvimento de culturas (RAMOS *et al.*, 2013). De modo que o seu reconhecimento em campo pode auxiliar no planejamento agrícola.

Alguns estudos foram realizados a fim de se obter correlação entre a manifestação desse atributo com propriedades físicas do solo, e assim, facilitar seu reconhecimento. Atualmente, sabe-se que esses horizontes com *caráter coeso* possuem porosidade total reduzida, maiores valores de densidade do solo e maior resistência à penetração. Sendo esse último considerado um parâmetro ideal na caracterização do horizonte coeso (LIRA *et al.*, 2016).

Outro atributo que pode ser utilizado para constatar a ocorrência do *caráter coeso* é a resistência tênsil definida como a força necessária por unidade de área para causar o

rompimento de agregados do solo (DEXTER; KROESBERGEN, 1985). Queiroz *et al.* (2018), comparando a ocorrência do *caráter coeso* baseada na percepção humana com valores de resistência tênsil obtidas por um dinamômetro, verificaram que essa ocorrência se dá em agregados de solos com resistência tênsil a partir de 50 kPa. Segundo os autores, esse valor pode ser considerado como limiar para a ocorrência do *caráter coeso* em solos. Mota *et al.* (2021) também verificaram boa correlação entre a resistência tênsil e o *caráter coeso*.

Uma vez que a resistência tênsil está relacionada com a estrutura do solo, ela torna-se um indicador potencial na avaliação da qualidade física do solo. Além disso, apesar de um pouco questionada, esse indicador mostra-se indiretamente ligado com aspectos agronômicos desejáveis, a saber: emergência de plântulas e penetração radicular.

Sabe-se que a resistência tênsil é influenciada por vários fatores. Imhoff *et al.* (2002) relataram um aumento na resistência tênsil decorrente do aumento do teor de argila, que segundo os autores, esse incremento proporcionou maior número de cargas elétricas aptas a formar ligações com partículas minerais e/ou orgânicas.

O próprio teor de água no solo é um fator que influencia diretamente a resistência tênsil de agregados. Ley *et al.* (1993) verificaram o adensamento das partículas dos solos após sucessivos ciclos de secagem e umedecimento, o que provocou maior coesão entre as partículas no período seco, resultando em uma maior resistência à ruptura dos agregados.

Tormena *et al.* (2008) verificaram aumento da resistência tênsil proporcional à redução dos teores de carbono orgânico sob sistemas distintos de uso da terra, onde áreas de mata e pousio apresentaram menores valores de resistência tênsil quando comparadas a uma área com histórico de preparo convencional cultivada com milho, com menor teor de carbono. Por outro lado, Guimarães *et al.* (2009) observaram que o maior teor de carbono proporcionou aumento de resistência tênsil, segundo os autores, esse efeito é explicado pelo elevado teor de argila + silte, tornando matéria orgânica humificada a responsável pela cimentação entre as partículas minerais do solo.

A resistência tênsil também é influenciada pelo manejo do solo. Bavoso *et al.* (2010) verificaram valores de resistência tênsil menores em solos sob pastejo, quando comparado aos solos utilizados em sistemas de plantio direto, que apresentaram maiores valores de resistência tênsil. Os autores explicam que este resultado é decorrente do intenso tráfego de maquinário agrícola no segundo sistema, além do não revolvimento do solo.

Outros atributos físicos que influenciam a resistência tênsil são a mineralogia das argilas e a densidade do solo. Quanto à mineralogia, solos cauliníticos tendem a formar horizontes mais adensados por conta da organização das partículas do solo definir

empacotamento mais fechado, sendo essa organização facilitada pelo formato laminar da caulinita (LIMA *et al.*, 2005).

#### **2.4 Umidade do solo versus diagnóstico do caráter coeso**

O diagnóstico do *caráter coeso* deve levar em consideração o conteúdo de água no solo, pois esse influencia a consistência do solo. De fato, todas as hipóteses citadas no tópico anterior acerca da gênese do atributo coeso são dependentes do teor de água, uma vez que o solo quando úmido retorna normalmente à condição de friabilidade.

São escassas na literatura informações relacionadas ao conteúdo de água regendo a manifestação do *caráter coeso*, porém considera-se que a condição hidráulica é fundamental no processo de endurecimento do solo (LAMOTTE *et al.*, 1997). Alguns autores demonstraram que a consistência do solo tende a ficar mais dura à medida que ocorre aumento do potencial mátrico do solo, ou seja, quanto mais seco ele se torna (FRANZMEIER; CHARTRES; WOOD, 1996; LEY *et al.*, 1993).

Lira *et al.* (2016), ao comparar atributos físicos de solos de mata nativa com solos que apresentam o *caráter coeso*, verificaram que há necessidade de se manter a umidade maior no segundo caso, para que os efeitos de resistência do solo ao crescimento radicular fossem reduzidos.

Uma vez que o solo está seco, a consistência no mínimo muito dura dos horizontes com *caráter coeso* pode ser limitante ao desenvolvimento radicular. Além disso, podem resultar no surgimento de uma zona saturada com condições limitantes à respiração radicular, afetando negativamente o desenvolvimento das plantas. (LIBARDI; MELO FILHO, 2001). Essa zona saturada quando ocasionada por horizontes adensados situados próximos a superfície pode favorecer a erosão do horizonte superficial. Por outro lado, quando situados em maior profundidade pode, indiretamente, auxiliar no armazenamento de água no perfil. Essas diferenças na profundidade desse horizonte adensado implicará diferenciação no desenvolvimento das culturas (CINTRA; PORTELA; NOGUEIRA, 2004).

Um exemplo da influência da presença do *caráter coeso* sobre fatores agrícola pode ser verificado no trabalho de Dias *et al.* (2016), no qual os autores verificaram um aumento no intervalo hídrico ótimo (IHO) em solos cultivados com cana-de-açúcar, que após serem submetidos à subsolagem tinham seu horizonte coeso rompido, promovendo maior amplitude do IHO. Além disso, Queiroz (2018) verificou que solos com o *caráter coeso* tendem a diminuir

levemente a faixa de friabilidade do solo, porém sem impor restrições à mecanização desde que a umidade esteja adequada.

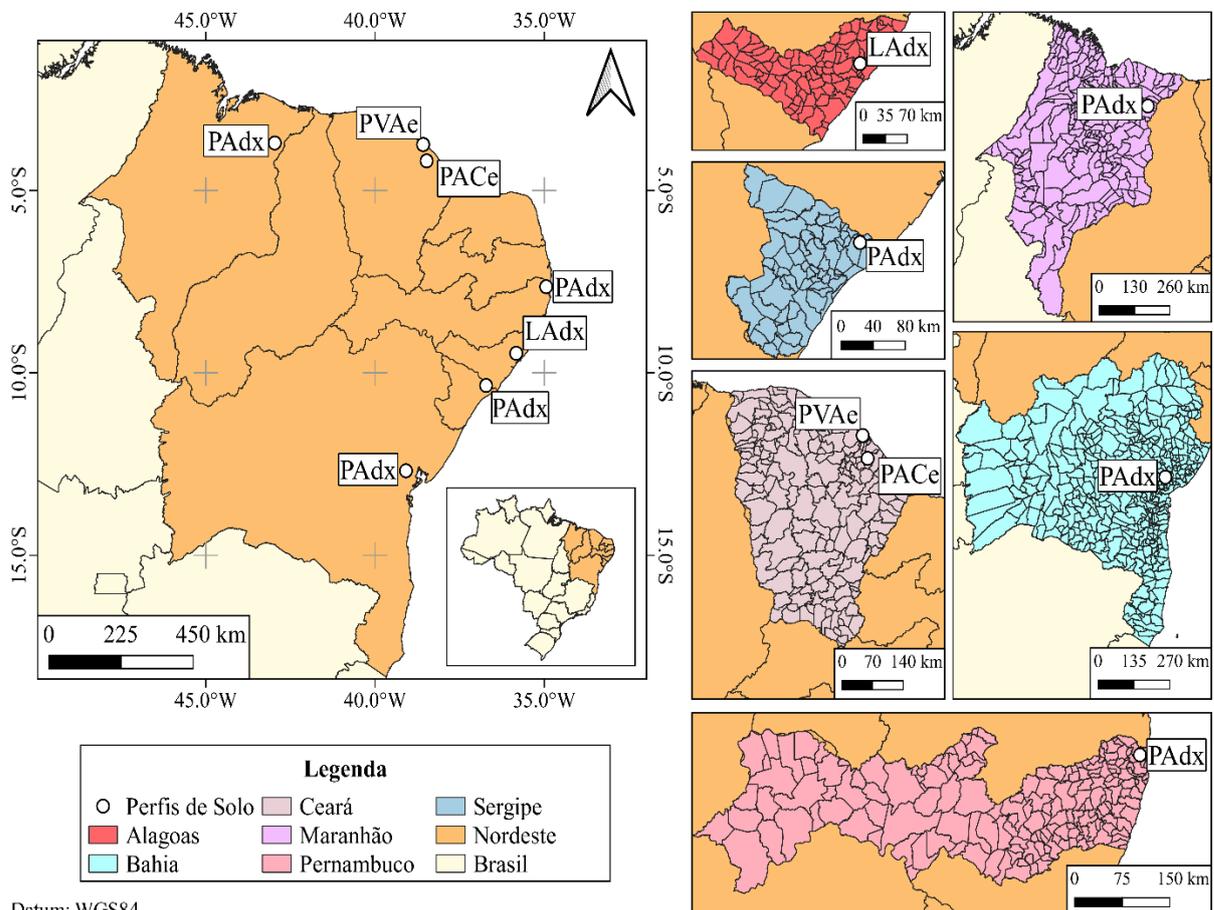
Dessa forma, do ponto de vista agrônômico, é interessante o conhecimento da faixa de umidade em que o atributo coeso se manifesta, pois com o advento das novas tecnologias agrícolas, principalmente na área de irrigação, é possível monitorar e manejar a água no solo para que essa faixa de umidade seja evitada.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Aspectos descritivo dos solos

O experimento foi realizado com sete solos que apresentam o *caráter coeso* em pelo menos um de seus horizontes, a saber: um Argissolo Amarelo em Brejo-MA; um Argissolo Amarelo em Fortaleza-CE; um Argissolo Acinzentado em Pacajus-CE; um Argissolo Amarelo em Goiana-PE; um Latossolo Amarelo em Rio Largo-AL; um Argissolo Amarelo em Neópolis-SE; e um Argissolo Amarelo em Cruz das Almas-BA (Figura 1).

Figura 1 - Locais de coleta dos solos estudados



Todos os solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018). O descritivo morfológico está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição morfológica dos horizontes com *caráter coeso* nos solos estudados.

Local	Solo	Horizonte	Descrição morfológica
Brejo-MA	Argissolo Amarelo <sup>1</sup>	AB	43-60 cm, bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco), mosqueado ocasional (raro), pequeno e médio, distinto, bruno-avermelhado-claro (5YR 6/4); maciça e fraca pequena e média blocos subangulares e angulares; muito dura a extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
Fortaleza-CE	Argissolo Vermelho - Amarelo <sup>2</sup>	Bt1	96-145cm; vermelho- amarelado (5YR 5/8 úmido), amarelo avermelhado (5 YR 6/8 seco); maciça com tendência a formação de blocos subangulares; extremamente duro, friável a firme, plástica e pegajosa; transição irregular e gradual.
Pacajus-CE	Argissolo Acinzentado <sup>3</sup>	Bt	125-156 cm+; cinzento-claro (10YR 7/2 úmido), amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, seco) mosqueado bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4), abundante, grande, distinto; maciça com tendência a formação de blocos subangulares; muito duro; friável, não plástico e não pegajoso.
Goiana-PE	Argissolo Amarelo <sup>4</sup>	Bt	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.
Neópolis-SE	Argissolo Amarelo <sup>5</sup>	Bt1	25-50 cm; bruno-forte (7,5YR 5/6, úmido), amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, seco); fraca pequena e média blocos angulares e subangulares e partes maciças; muito duro a extremamente duro, friável, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
Rio Largo-AL	Latossolo Amarelo <sup>5</sup>	BA	35-60 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); mosqueado pouco, pequeno a médio e difuso bruno forte (7,5YR 5/6, seco); fraca pequena a média bloco angular a subangular e parte maciça; friável a firme, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
Cruz das Almas-BA	Argissolo Amarelo <sup>6</sup>	Bt1	114-148 cm; bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciças; duro a muito duro, friável, plástico e pegajoso, transição plana e difusa.

<sup>1</sup>Silva et al., 2020b; <sup>2</sup>Vieira (2012); <sup>3</sup>Vieira *et al.* (2013); <sup>4</sup>Araújo Filho *et al.* (2014); <sup>5</sup>Araújo Filho e Lopes (2019); <sup>6</sup>Melo Filho e Araújo Filho (1996), Costa e Lima (2019).

## 3.2 Procedimentos experimentais

### 3.2.1 Definição dos limites de umidade do solo para as consistências entre umidade na capacidade de campo e levemente úmido ( $U_{cc}$ - $U_{lu}$ ) e entre umidade de solo levemente seco e solo seco ao ar ( $U_{ls}$ - $U_{ar}$ )

Nos horizontes com *caráter coeso*, foram coletadas amostras de solo em forma de bloco com dimensão de  $15 \times 20 \times 10$  cm de largura, comprimento e altura, respectivamente. Os blocos, ainda em campo, foram envoltos em filmes plásticos para manter a integridade durante o transporte. Em laboratório, foram postos sobre esponja (com aproximadamente dois centímetros de espessura) em bandeja contendo água suficiente para umedecê-los por capilaridade. Umedecidos, os blocos foram separados manualmente em torrões pela aplicação de uma força mínima, contudo suficiente para separá-los, sendo em seguida passados através da peneira com abertura da malha de 25 mm e retidos na de abertura da malha de 19 mm (ALMEIDA, 2008). O esquema da coleta em campo até o preparo dos agregados/torrões está ilustrado conforme a Figura 2.

Figura 2 - Esquema ilustrativo das coletas do solo em campo, e o preparo dos agregados/torrões em laboratório.



Fonte: O autor

Para a quantificação da umidade à base de massa (Umidade gravimétrica,  $U$ ) dos torrões na *capacidade de campo* ( $U_{cc}$ ) e *secos ao ar* ( $U_{ar}$ ), foram tomados 20 torrões de cada horizonte, os quais foram postos sobre esponja (com aproximadamente dois cm de espessura)

em bandeja contendo água suficiente para permitir que se atingisse umidade, por capilaridade, na capacidade de campo. Após essa condição, os torrões foram mantidos ao ar livre para a secagem lenta até o equilíbrio com as condições do ar atmosférico. Em ambas as situações foram obtidas as umidades com dez repetições por meio da equação 1:

$$U, g\ g^{-1} = \frac{(\text{Massa de solo úmido} - \text{Massa de solo seco a } 105\ ^\circ\text{C})}{\text{Massa de solo seco a } 105\ ^\circ\text{C}} \quad (\text{Eq. 1})$$

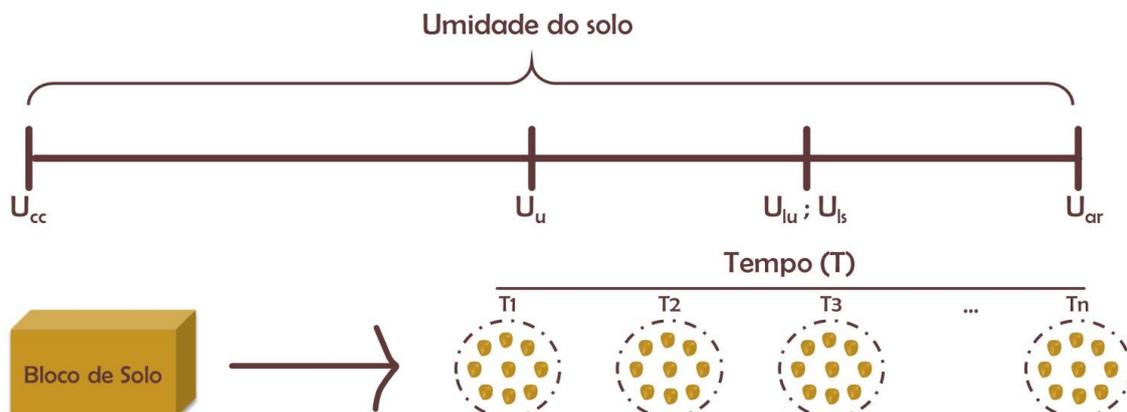
Considerando que a consistência do solo na faixa de umidade entre *capacidade de campo* e *solo seco ao ar*, os estados de umidade com seus respectivos valores foram estabelecidos conforme a Figura 3. Para tanto, os torrões tiveram a umidade determinada na condição de *capacidade de campo*,  $U_{cc}$  – quando estavam umedecidos na esponja em bandeja com água, conforme descrito anteriormente – e na condição de *secos ao ar*,  $U_{ar}$ . Na sequência, considerando que solo úmido ( $U_u$ ) é a umidade intermediária entre capacidade de campo e seco ao ar (Soil Survey Division Staff, 2017), tem-se que, pela equação 2:

$$U_u = U_{cc} - \frac{(U_{cc} - U_{ar})}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

De igual modo, levando em consideração a abordagem de Kiehl (1979), o limiar entre solo *levemente úmido* ( $U_{lu}$ ) e *levemente seco* ( $U_{ls}$ ) foi definido seguindo a equação 3:

$$U_{lu} : U_{ls} = U_u - \frac{(U_u - U_{ar})}{2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Figura 3 - Limites de umidade para solo úmido ( $U_{cc}$  umidade gravimétrica na capacidade de campo;  $U_u$ , umidade gravimétrica em solo úmido;  $U_{lu}$  -  $U_{ls}$ , umidade gravimétrica levemente úmido e levemente seco;  $U_{ar}$  umidade gravimétrica de solo seco ao ar. T1, T2, T3 e Tn são intervalos no tempo para o secamento do solo).



Fonte: O autor

### 3.2.2 Descrição da consistência do solo por avaliadores em laboratório

Partindo da umidade próxima à capacidade de campo, na medida em que os torrões foram secando ao ar, um avaliador com experiência em descrição da consistência fez a classificação segundo os termos contidos em Santos *et al.* (2013), atribuindo notas, a saber: 1 - *solta* (não coerente), 2 - *muito friável* (o material do solo esboroa-se com pressão muito leve, mas agrega-se por compressão posterior), 3 - *friável* (o material do solo esboroa-se facilmente sob pressão fraca e moderada entre o polegar e o indicador e agrega-se por compressão posterior), 4 - *firme* (o material do solo esboroa-se sob pressão moderada entre o indicador e o polegar, mas apresenta resistência distintamente perceptível), 5 - *muito firme* (o material do solo esboroa-se sob forte pressão; dificilmente esmagável entre o indicador e o polegar), e 6 - *extremamente firme* (o material do solo somente se esboroa sob pressão muito forte, não pode ser esmagado entre o indicador e o polegar e deve ser fragmentado pedaço por pedaço).

A descrição da consistência foi feita considerando dez torrões; de cada torrão foi tomada uma fração para aferição da umidade, a qual foi calculada por meio da equação 1. Assim, na medida em que foram secando, foram obtidos pares de valores (notas e umidade à base de massa) desde solo *muito úmido* até *levemente úmido*.

Partindo da umidade de solo *levemente seco*, na medida em que os torrões foram secando ao ar, o mesmo avaliador fez a classificação da consistência segundo os termos contidos em Santos *et al.* (2013), atribuindo notas, a saber: 1 - *solta* (não há coesão), 2 - *macia* (fraca coesão, se fragmenta sob leve pressão), 3 - *ligeiramente dura* (rompe-se facilmente entre os dedos indicador e polegar), 4 - *dura* (moderadamente resistente à pressão, podendo ser quebrado nas mãos, sem dificuldade, mas dificilmente quebrável entre o indicador e o polegar), 5 - *muito dura* (muito resistente à pressão; somente com dificuldade pode ser quebrado nas mãos; não é quebrável entre o indicador e o polegar), e 6 - *extremamente dura* (não se rompe entre as mãos).

A descrição da consistência também foi feita considerando dez torrões; de cada torrão foi tomada uma fração para aferição da umidade gravimétrica, também obtida por meio da equação 1. Assim, na medida em que os torrões foram secando, foram obtidos pares de valores (notas e umidade à base de massa) desde solo *levemente seco* até *seco ao ar*.

### 3.2.3 Medição da resistência tênsil de torrões secos ao ar

Os ensaios de resistência tênsil (RT) foram realizados em equipamento com atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de  $0,03 \text{ mm s}^{-1}$  (Tormena *et al.*, 2008). Foram considerados dez torrões de cada solo estudado.

Anteriormente ao ensaio de RT, cada torrão teve sua massa aferida em balança analítica. O torrão foi 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 200 N. O valor da carga empregado para a ruptura tênsil foi conhecido por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Depois de cada procedimento de ruptura, uma porção da amostra do torrão teve sua massa mensurada em balança analítica para, posteriormente, ser submetida à secagem em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas, para o cálculo da umidade.

A RT foi avaliada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), por meio da equação 4:

$$RT = (0,576 P)/D^2 10^3, \quad (\text{Eq. 4})$$

em que  $RT$  é a resistência tênsil do torrão (kPa),  $0,576$  a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do torrão,  $P$  a força aplicada (N), e  $D$  o diâmetro efetivo do torrão (m),  $10^3$  fator de conversão de Pa para kPa. O diâmetro efetivo do torrão foi mensurado pela equação 5 (WATTS; DEXTER, 1998).

$$D = D_m (M/M_o)^{0,333}, \quad (\text{Eq. 5})$$

sendo  $D_m$  o diâmetro médio dos torrões [ $(25 + 19)/2$ , em mm], explicado pela média dos tamanhos da abertura das peneiras,  $M$  a massa do torrão individual seco a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  (g), e  $M_o$  a massa média dos torrões secos a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  (g).

### 3.2.4 Granulometria

Foi realizada seguindo o método da pipeta para a determinação da fração argila (Gee e Or, 2002). Foram consideradas dez amostras com massas de 20 g de Terra Fina Seca em Estufa (TFSE), cada uma em béquer com capacidade para 250 mL, aos quais foram adicionados

100 mL de água destilada e 10 mL do dispersante químico (NaOH 1 M), deixando o material em repouso pelo período de 12 a 16 horas, período em que ocorria a dispersão química.

Em seguida, realizou-se a dispersão física em agitador vertical (12.000 rpm por cinco minutos para material arenoso, dez minutos para material argiloso). Na sequência, as areias foram separadas em peneira com abertura da malha de 0,053 mm e expressas como porcentagem da amostra total. O remanescente, argila e silte, foi coletado em cilindro de sedimentação com capacidade volumétrica de 1 L. O cilindro teve o seu volume completado com água destilada, agitando a suspensão com bastão de vidro para promover a homogeneização da suspensão contendo argila e silte. O tempo necessário para a sedimentação das partículas na profundidade  $h = 5$  cm foi calculado segundo a Lei de Stokes.

Decorrido o tempo de sedimentação, coletou-se a alíquota de 25 mL na profundidade de 2,5 cm da suspensão (considerou-se  $h/2$ , seguindo sugestão de Mota *et al.*, 2019), transferindo-a para béquer com capacidade volumétrica de 30 mL e, em seguida, à estufa (105 °C, até massa constante) a fim de se determinar a massa da fração argila + dispersante. Utilizou-se prova em branco para determinar a massa de dispersante presente na suspensão. A equação 6 foi empregada para determinar a porcentagem de argila. O conteúdo de silte foi determinado por diferença entre o total da TFSE e a soma dos conteúdos de argila e areia, seguindo a equação 6.

$$\% \text{ argila} = \left( \frac{V_t}{V_p} \right) \times \left( \frac{M_a - M_b}{M_{tfse}} \right) \times 100, \quad (\text{Eq. 6})$$

em que  $V_t$  é o volume total (1000 mL),  $V_p$  o volume pipetado (25 mL),  $M_a$ , a massa seca (105 °C) de argila em 25 mL da suspensão (g);  $M_b$ , a massa seca (105 °C) da prova em branco em 25 mL desta solução (g); e  $M_{tfse}$ , a massa (g) de terra fina seca em estufa (105 °C).

### 3.2.5 Densidade do solo

Foi determinada pelo método do torrão parafinado (Almeida *et al.*, 2009; Al-Shammery *et al.*, 2018), que consiste na coleta de torrões de volume variável, secos ao ar, e impermeabilizado em parafina líquida. Foram utilizados 10 agregados/torrões de massa conhecida e com diâmetro entre 19 e 25 mm, os quais foram amarrados com linha (também com massa conhecida) e imersos em parafina com temperatura entre 60 e 65 °C. 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 o volume do agregado/ torrão.

### 3.3 Análise estatística dos dados

Cada solo foi comparado quanto às umidades pré-estabelecidas no tópico 3.2.1, de modo que foram realizados seis monitoramentos em solo úmido, e três em solo seco. Os dados foram analisados utilizando o delineamento inteiramente aleatorizado (DIA), com sete tratamentos (sete solos) e dez repetições. Em todas as situações, os dados foram submetidos à análise de normalidade dos resíduos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, à análise de variância (teste F) e de comparação de médias (teste de Tukey). Também foram feitas análises de homogeneidade de variâncias e pontos discrepantes e necessidade de transformação pelo método potência ótima de Box-Cox. As análises foram executadas utilizando o software Statistical Analysis System (SAS) University version (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2012–2018).

Para cada solo, os dados das notas atribuídas pelo avaliador à consistência e das respectivas umidades foram analisados por regressão a fim de conhecer os limiares de umidade para a aferição do *caráter coeso* nas condições de solo úmido e seco. Em todas as situações foram consideradas dez repetições em cada monitoramento.

Foram utilizados métodos multivariados com objetivo de entender as relações entre os atributos físicos do solo, entre os sete solos e entre os atributos e os solos e a similaridades entre os solos. Os atributos considerados para os sete solos foram: areia, silte, argila, densidade dos solos, umidade na capacidade de campo e em solo seco ao ar, resistência tênsil e notas atribuídas à consistência. O conjunto de dados, com distribuição normal, foi padronizado ( $\mu = 0$ ;  $\sigma^2 = 1$ ) para se dar o mesmo peso a cada variável. Após este procedimento, utilizou-se a técnica de análise dos componentes principais (ACP) e a análise de agrupamentos (AA). Para a análise de agrupamento utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos atributos estudados (Tabela 2) constatou diferenças estatísticas significativas para todas as variáveis a 1% de significância. Quanto a granulometria, restou evidente a ocorrência do *caráter coeso* em variadas proporções das três frações componentes do solo, corroborando o que afirmou Jacomine (2001). Para os dados de densidade do solo e resistência tênsil, observou-se que pelo menos um dos horizontes avaliados é distinto dos demais quanto a estes atributos.

Tabela 2 - Análise de variância para os dados de argila, areia, silte, em  $\text{g kg}^{-1}$ , teor de água do solo na capacidade de campo ( $U_{cc}$ ) e no solo seco ao ar ( $U_{ar}$ ), em  $\text{g g}^{-1}$ , densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ , e resistência tênsil, em kPa.

Variável	Fonte de variação	GL <sup>1</sup>	SQ <sup>2</sup>	QM <sup>3</sup>	F <sup>4</sup>
Argila	Tratamentos	6	0,873869	0,145644	1977,5**
	Resíduo	63	0,004640	0,000074	
	Total	69	0,878508		
CV = 2,78%					
Silte	Tratamentos	6	0,047594	0,007932	149,18**
	Resíduo	63	0,003350	0,000532	
	Total	69	0,050944		
CV = 9,76%					
Areia	Tratamentos	6	0,811434	0,135239	2073,01**
	Resíduo	63	0,004110	0,000065	
	Total	69	0,815544		
CV = 1,31%					
$U_{cc}$ <sup>5</sup>	Tratamentos	6	0,100755	0,016793	88,74**
	Resíduo	63	0,011921	0,000189	
	Total	69	0,112676		
CV = 8,05%					
$U_{ar}$ <sup>6</sup>	Tratamentos	6	0,000666	0,000111	62,00**
	Resíduo	63	0,000113	0,000002	
	Total	69	0,000779		
CV = 22,63%					
Densidade do solo	Tratamentos	6	0,481509	0,080251	55,93**
	Resíduo	63	0,090400	0,001435	
	Total	69	0,571909		
CV = 2,31%					
Resistência tênsil	Tratamentos	6	47.260,55	7.876,76	19,73**
	Resíduo	63	25.152,57	399,247	
	Total	69	72.413,12		
CV = 38,66%					

<sup>1</sup>Graus de liberdade; <sup>2</sup>Soma de quadrados; <sup>3</sup>Quadrados médios; <sup>4</sup>Teste F; \*\* significativo a 1%.

Após a comparação de médias (Tabela 3), constatou-se que, exceto para o solo de Cruz das Almas-BA, há predomínio da fração areia, fato esse que está de acordo com a literatura

relacionada à solos com *caráter coeso*. Esse predomínio pode ser relacionado com material de origem de rochas mais ácidas, ou seja, rochas ricas em quartzo. A Formação Barreiras tem como característica possuir sedimentos que foram depositados praticamente ao longo de toda a costa brasileira que são constituídos por diversos materiais de origem, e em variadas condições de relevo, o que proporcionou a formação de solos com composição variada em seus constituintes (NUNES; SILVA; VILAS BOAS, 2011). Os dados para a granulometria estão em conformidade com o relatado por Corrêa *et al.* (2008a), segundo os quais, os horizontes com *caráter coeso* normalmente apresentam classes texturais franco arenosa, franco argiloarenosa e argiloarenosa.

Ainda acerca da fração areia em solos dos Tabuleiros Costeiros, Bezerra *et al.* (2015), Araújo *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2020a) observaram a influência desta fração para a coesão dos torrões, pois, segundo os autores, geralmente há predomínio de areias com grãos mal selecionados – o que concorre para empacotamentos mais fechados e, conseqüentemente, para o aumento da resistência tênsil dos torrões.

Tabela 3 - Valores médios de argila, silte e areia. Em cada fração, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). (classificação textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos).

Local	Horizonte	Argila	Silte	Areia	Classe textural
		----- $g\ kg^{-1}$ -----			
Brejo – MA	AB	250 d	100 b	650 d	Franco argilo-arenosa
Fortaleza – CE	Bt2	330 c	100 b	570 e	Franco argilo-arenosa
Pacajus – CE	Bt	180 f	60 cd	760 a	Franco-arenosa
Goiana – PE	Bt	240 d	50 de	710 b	Franco argilo-arenosa
Rio Largo – AL	BA	450 b	40 e	510 f	Argilo-arenosa
Neópolis – SE	Bt1	220 e	110 a	670 c	Franco argilo-arenosa
Cruz das Almas - BA	Bt1	500 a	60 c	440 g	Argila

Ainda em relação às propriedades físicas do solo, a análise de variância dos dados para os teores de água em cada solo quando na capacidade de campo e seco ao ar (Tabela 2) evidenciou diferenças estatísticas significativas quanto a estes atributos, apesar de em todos os solos ter sido constatado o *caráter coeso*, o que evidencia a influência de outros fatores além da granulometria na umidade, por exemplo, a própria natureza da argila e presença de material orgânico.

Na Tabela 4 estão apresentados os dados de umidade dos solos na capacidade de campo e em condição de secos ao ar. É importante ressaltar que a estrutura do solo tem relevância para definir a umidade na capacidade de campo, enquanto a textura expressa maior influência na umidade do solo seco ao ar. Na capacidade de campo predominam os efeitos da capilaridade, enquanto em solo seco ao ar a umidade residual é resultante basicamente de forças de adsorção entre água e argilas - partículas que adsorvem água em potenciais mátricos muito baixos (LIBARDI, 2018). Pelos resultados obtidos, os solos de Rio Largo-AL e de Cruz das Almas-BA foram os que obtiveram os maiores valores de umidade entre a capacidade de campo e seco ao ar.

Tabela 4 - Valores médios de umidade na capacidade de campo ( $U_{cc}$ ) e em solo seco ao ar ( $U_{ar}$ ). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ).

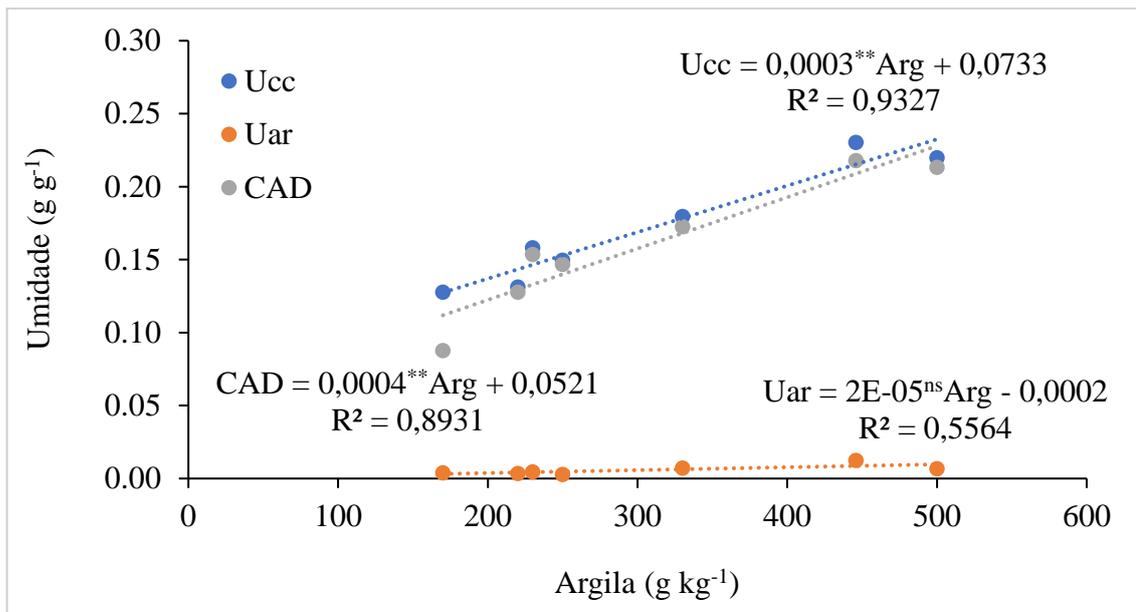
<b>Local</b>	<b><math>U_{cc}</math></b>	<b><math>U_{ar}</math></b>	<b><math>U_{cc} - U_{ar}</math></b>
	----- g g <sup>-1</sup> -----		
Brejo-MA	0,1496 cd	0,0028 c	0,1468
Fortaleza-CE	0,1797 b	0,0072 b	0,1725
Pacajus-CE	0,1277 e	0,0040 c	0,1237
Goiana-PE	0,1581 c	0,0046 c	0,1535
Rio Largo-AL	0,2303 a	0,0125 a	0,2178
Neópolis-SE	0,1312 de	0,0035 c	0,1277
Cruz das Almas-BA	0,2199 a	0,0068 b	0,2131

Sobre a umidade na capacidade de campo obtida considerando o procedimento descrito no Material e Métodos, há coerência com os valores relatados na literatura para alguns dos solos utilizados nesta pesquisa: por exemplo, Santos (2014) encontrou umidade de 0,136 g g<sup>-1</sup> no horizonte Bt em Pacajus-CE, Andrade (2014) encontrou 0,159 g g<sup>-1</sup> no horizonte Bt em Goiana-PE, o que ratifica a boa qualidade dos dados de capacidade de campo obtidos pelo protocolo adotado nesta pesquisa.

A análise de regressão entre teor de argila e umidade na capacidade de campo, umidade em solo seco ao ar e água disponível considerando todos os solos estudados, Figura 4, evidencia que não há variação significativa de umidade em função do teor de argila, componente importante na formação de unidades estruturais que estão relatadas no descritivo da estrutura (visto que não é de todo maciça, Tabela 1) – levando à interpretação de que as variações na estrutura e na granulometria dos solos são insignificantes para a umidade na capacidade de campo, em solo seco ao ar e água disponível. No entanto, chama a atenção o fato de no descritivo da morfologia apresentado na Tabela 1 (no item Material e Métodos), a

estrutura não ser a mesma para os solos, de modo que as alterações entre solos deveriam se refletir também na umidade, pelo menos na capacidade de campo e água disponível.

Figura 4 - Análise de regressão entre teor de argila e umidade na capacidade de campo, em solo seco ao ar e capacidade de água disponível nos solos estudados.



Fonte: O autor.

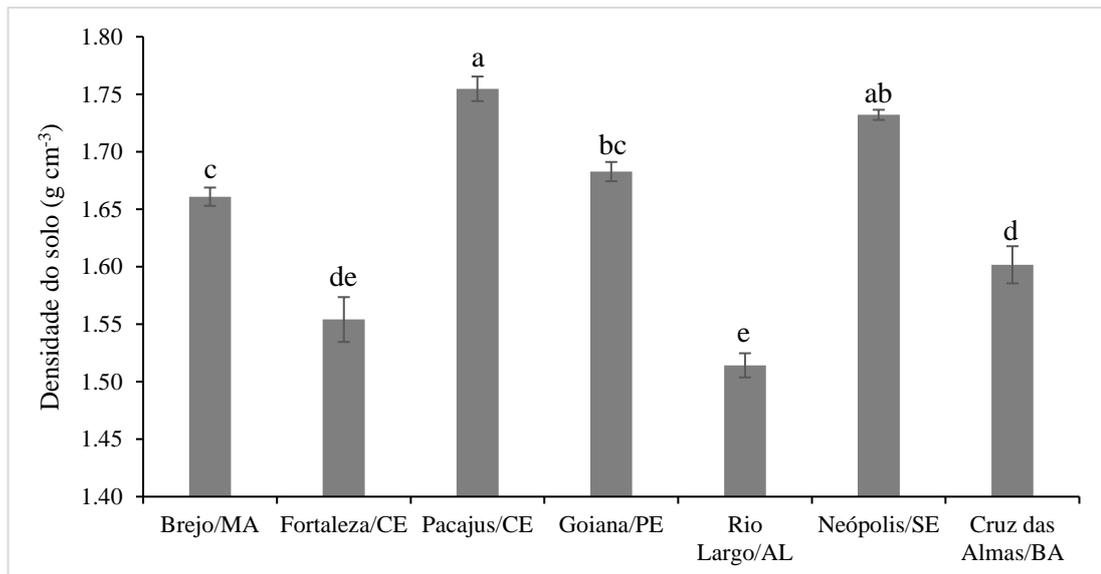
Constata-se que o Latossolo de Rio Largo-AL e Argissolo de Cruz das Almas-BA diferem significativamente dos outros solos no que se refere à umidade na capacidade de campo – em que os referidos solos contêm mais água nas três situações analisadas (capacidade de campo, seco ao ar e água disponível), evidenciando os efeitos da fração argila, por estar em maior quantidade, na retenção de água. Particularmente para o solo de Rio Largo-AL, embora apresentando menos argila que o solo de Cruz das Almas-BA, vale destacar que se trata de um Latossolo e, pelo que consta no descritivo morfológico (Tabela 1), a estrutura não é totalmente maciça, de modo que se pode especular sobre a possibilidade de microestruturas contribuindo também para a maior retenção de água.

Constata-se que de fato, há variação da umidade dos solos na capacidade de campo e da água disponível com a variação no teor de argila e, por consequência, na formação de unidades estruturais (ainda que a estrutura predominante nos horizontes com *caráter coeso* seja maciça) - levando à interpretação de que as variações na estrutura e na granulometria dos solos são significantes para a umidade na capacidade de campo e água disponível. Adicionalmente,

persiste a evidência de que na faixa de valores encontrados para a fração argila não há efeito significativo na umidade residual (quando os torrões estão secos ao ar).

No tocante a densidade dos solos avaliados, embora o teste de comparação de médias tenha evidenciado diferenças estatísticas (Figura 5), os valores foram condizentes com os expressos na literatura – que para os horizontes com *caráter coeso* varia, em média, entre 1,5 a 1,8 g cm<sup>-3</sup> (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001; VIEIRA *et al.*, 2012). Os dois maiores valores de densidade do solo foram observados nos solos de Pacajus-CE e Neópolis-SE, explicados, em parte, pelos maiores teores de areia e silte, respectivamente, haja visto o predomínio dessas frações proporcionar o desenvolvimento de macroporos em detrimento da porosidade total.

Figura 5 - Valores médios (com os erros-padrão) da densidade do solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ).



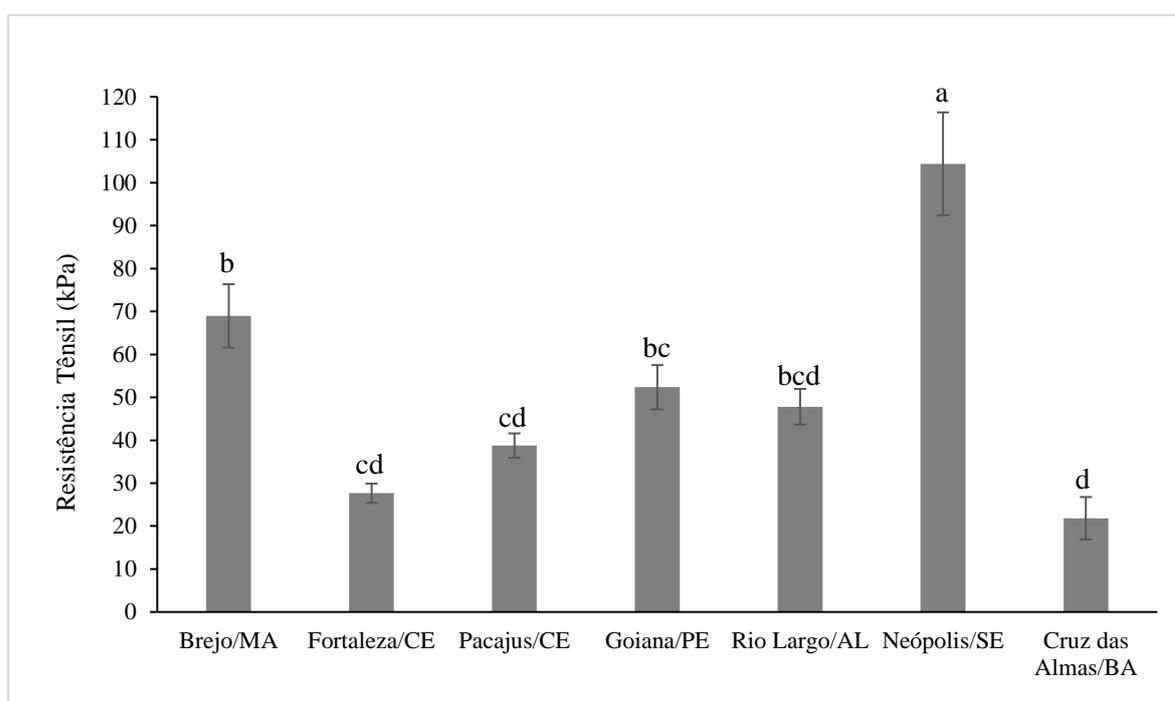
Fonte: O autor

Após teste de comparação de médias, observou-se que as maiores médias de resistência tênsil – atributo bastante útil para auxiliar no diagnóstico do *caráter coeso* em solos, foram observadas para os solos de Neópolis-SE e Brejo-MA, complementando as informações/análises de consistências obtidas no campo (Figura 6)

Nesse contexto, nos últimos anos alguns autores propuseram faixas de resistência tênsil para classes de consistência do solo. Queiroz *et al.*, (2018) consideraram o valor limiar de 50 kPa no diagnóstico do *caráter coeso*. Mais recentemente, Oliveira *et al.*, (2020) utilizando um dinamômetro portátil, o qual permite reproduzir a percepção da consistência realizada pelo pedólogo no campo, propuseram o valor limiar de 65 kPa para a consistência *muito dura* em

solo seco, consistência utilizada para diagnosticar o *caráter coeso* em solo. Assim, seguindo essas propostas já registradas na literatura, somente alguns solos estariam classificados com a ocorrência do caráter coeso, visto que apresentaram valores médios de resistência tênsil maior ou igual a 50 kPa – isso enseja, inclusive, a possibilidade de se propor ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos a categorização da coesão em classes (por exemplo, *fracamente coeso*, *moderadamente coeso*, *fortemente coeso*), aspecto ainda não contemplado no sistema taxonômico vigente (SANTOS *et al.*, 2018).

Figura 6 - Valores médios de resistência tênsil dos torrões secos ao ar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ).



Fonte: O autor

Na Figura 7 estão apresentados os resultados para a regressão considerando os valores de umidade dos agregados/torrões com as respectivas notas de consistências atribuídas por ocasião da avaliação da consistência. Quanto aos coeficientes de correlação (raiz quadrada do coeficiente de regressão,  $R^2$ ) em solo úmido, em seis solos foram classificados como fortes e muito forte para o solo de Goiana-PE. De acordo com Callegari-Jacques (2009), a correlação entre variáveis é forte quando  $0,6 > R \geq 0,9$  e muito forte quando  $0,6 > R \geq 0,9$ . Em todos os casos, os coeficientes indicaram correlação inversa – em que aumentos nas notas atribuídas à consistência decorrem da diminuição da umidade do solo. Para a situação de solo seco, os

coeficientes de correlação foram classificados como fracos a desprezíveis - indicando que as variações de umidade não se correlacionam com as notas atribuídas para a consistência.

Figura 7 - Notas para as consistências dos agregados/torrões com umidade entre capacidade de campo e levemente úmidos ( $U_{cc}$ – $U_{lu}$ ) e entre levemente secos e secos ao ar ( $U_{ls}$ – $U_{ar}$ ) para os solos estudados.

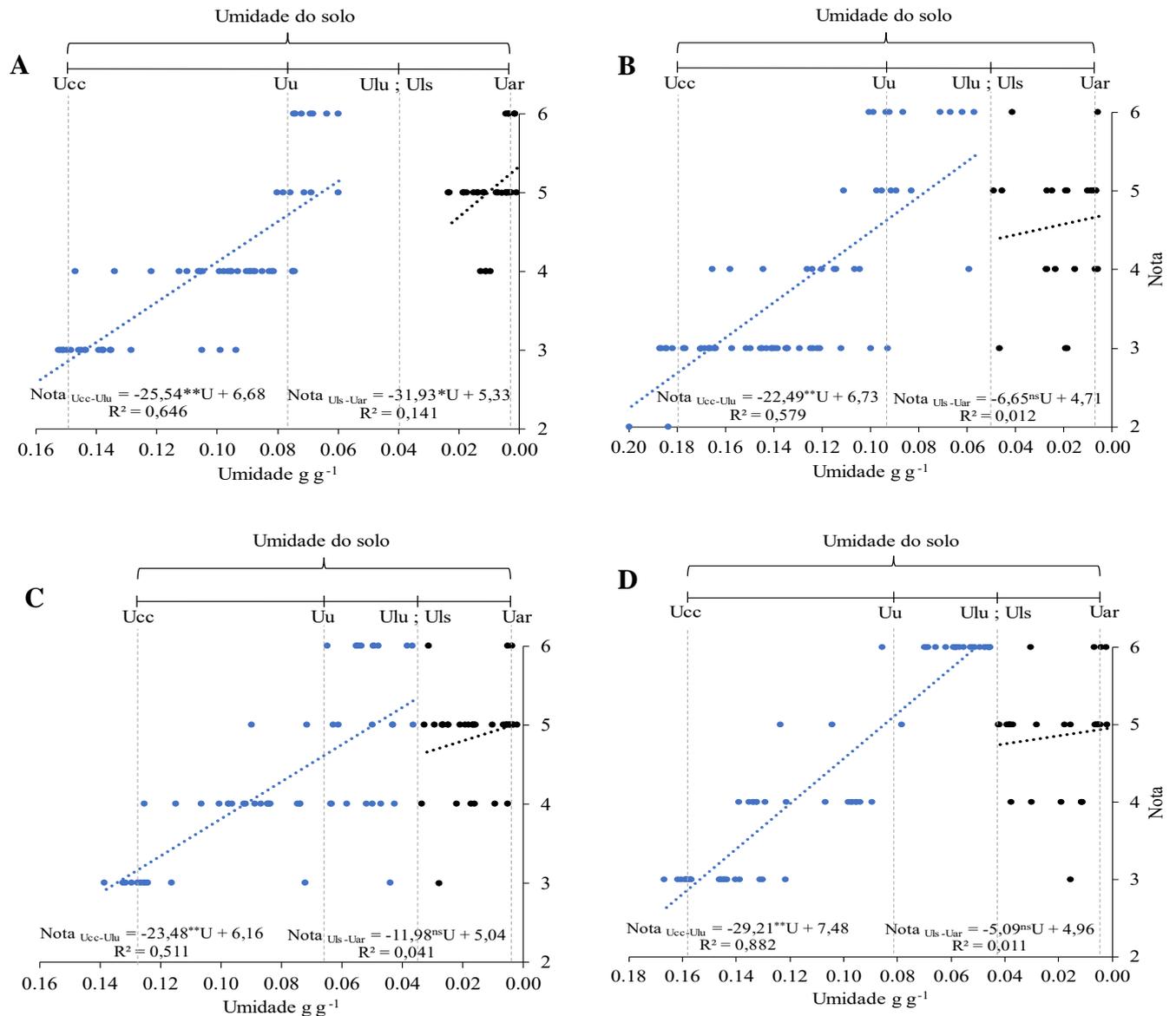
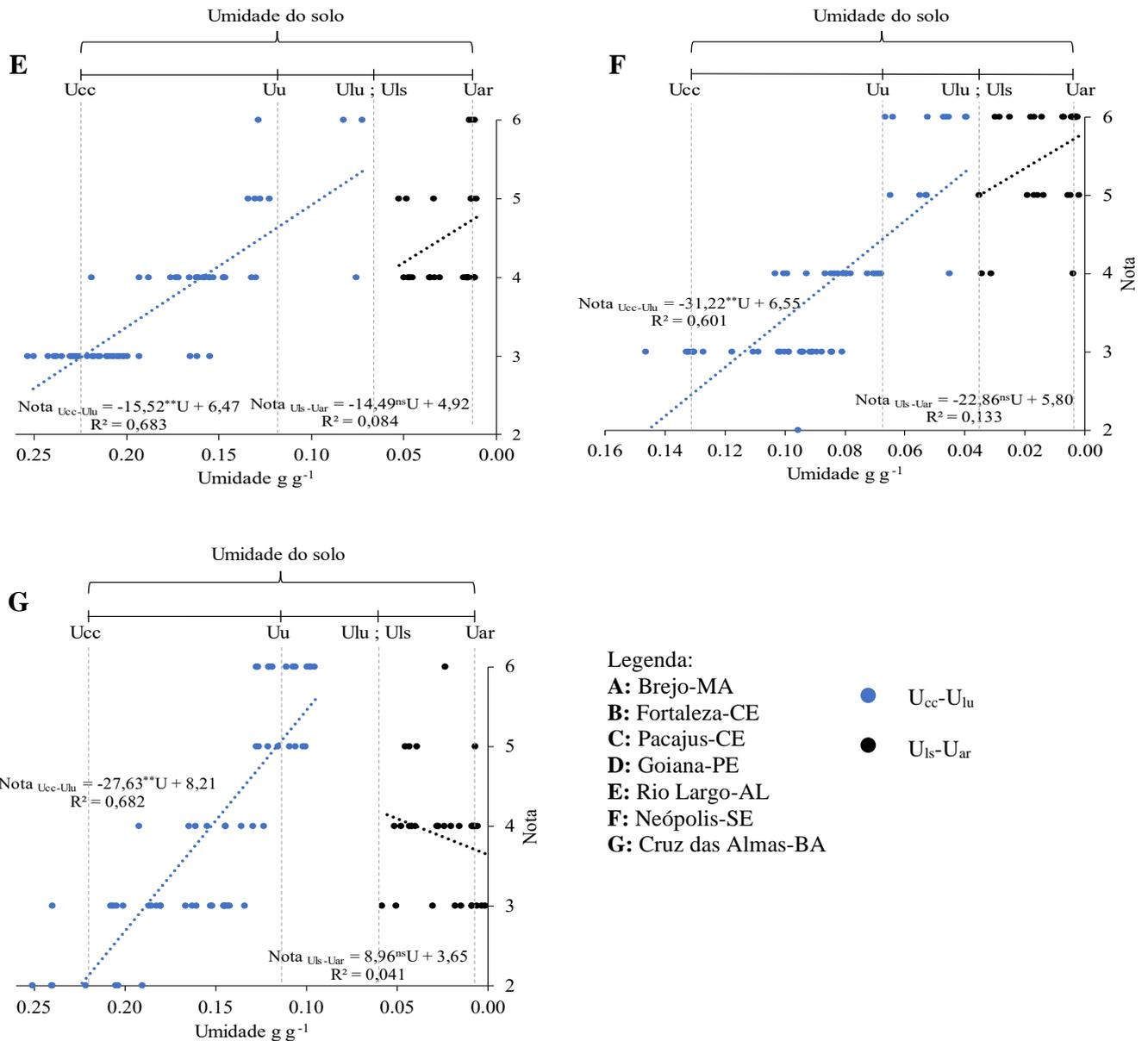


Figura 7 - Notas para as consistências dos agregados/torrões com umidade entre capacidade de campo e levemente úmidos ( $U_{cc}-U_{lu}$ ) e entre levemente secos e secos ao ar ( $U_{ls}-U_{ar}$ ) para os solos estudados (continua).



Fonte: O autor

Na condição de solo úmido, o efeito da secagem dos agregados/torrões na consistência pôde ser descrito por uma função linear. Para todos os solo, constatou-se que os coeficientes angulares da função linear apresentaram valores negativos e significativos a 1%, indicando aumento na nota atribuída à consistência na medida em que a umidade dos agregados/torrões era diminuída. Os resultados já eram esperados – embora o comportamento da consistência em função da umidade até então não fosse descrito matematicamente – pois,

como se sabe, a consistência do solo decorre da manifestação das forças de adesão e de coesão e, portanto, está diretamente dependente do conteúdo de água no solo.

Observou-se que, em geral, os solos mostraram-se friáveis quando o conteúdo de água estava próximo ou na capacidade de campo, fato também verificado por Hossne García *et al.* (2012). No campo, é muito provável que seja essa a condição de umidade dos agregados/torrões atingida após o processo de umedecimento feito pelo pedólogo quando vai avaliar a consistência em solo úmido.

Consideradas as funções lineares que tão bem descreveram o comportamento do solo quanto à consistência em solo úmido, e considerando que o avaliador decerto atribuiria a consistência *friável* (correspondente à nota 3) no intervalo de nota entre  $> 2,5$  e  $3,5$  e, de igual modo, a consistência *firme* (correspondente à nota 4) no intervalo de nota entre  $> 3,5$  a  $4,5$  – portanto consistências que satisfazem o que está descrito para o conceito de *caráter coeso* em solo úmido (Santos *et al.*, 2018) – constata-se que para os perfis de Brejo-MA, Fortaleza-CE, Pacajus-CE, Goiana-PE, Rio Largo-AL, Neópolis-SE e Cruz das Almas-BA a ocorrência dessas consistências se dá com umidade, respectivamente, entre  $0,150$  e  $0,086 \text{ g g}^{-1}$ , entre  $0,180$  e  $0,100 \text{ g g}^{-1}$ , entre  $0,128$  e  $0,071 \text{ g g}^{-1}$ , entre  $0,158$  e  $0,102 \text{ g g}^{-1}$ , entre  $0,230$  e  $0,127 \text{ g g}^{-1}$ , entre  $0,129 \text{ g g}^{-1}$  e  $0,066 \text{ g g}^{-1}$ ,  $0,206$  e  $0,135 \text{ g g}^{-1}$ , portanto entre  $U_{cc}$  e acima de  $U_u$ . Adicionalmente ainda em solo úmido, abaixo da umidade citada anteriormente e até  $U_{lu}$  outras situações de consistência (*muito firme* e *extremamente firme*) foram registradas, porém estas não são contempladas, por exemplo, pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) para o conceito do *caráter coeso*

Pelo que foi observado para os solos estudados, na faixa de umidade que define o solo *úmido* foram registradas as consistências *friável*, *firme*, *muito firme* e *extremamente firme*. Estes resultados ensejam que o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) defina o intervalo de umidade em que deva ser feita a avaliação da consistência para fins de aferição do *caráter coeso* em condição de solo úmido – ou, por outro lado, considere a possibilidade de os solos com a ocorrência do referido caráter admitirem as consistências *muito firme* e *extremamente firme*.

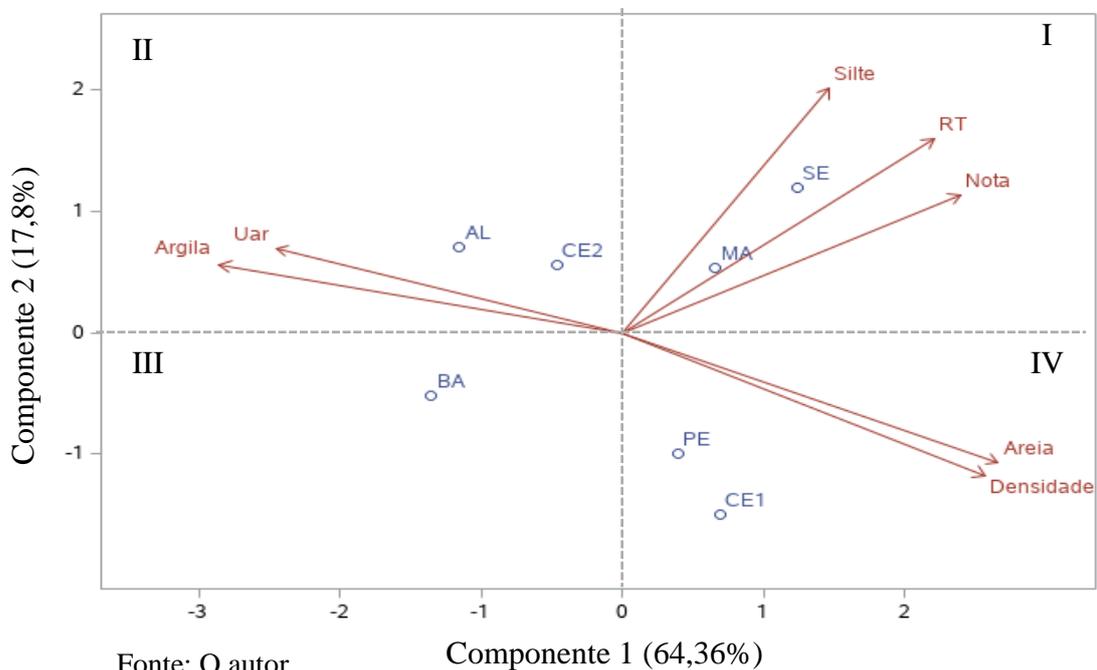
É importante relatar que agregados com consistência *muito firme* ou *extremamente firme* são requeridos para a constatação dos horizontes *fragipãs* ou *duripãs*, e que o horizonte com *caráter coeso* tem torrões que esboroam-se facilmente quando submersos em água, o que o diferencia dos dois primeiros horizontes endurecidos (SANTOS *et al.*, 2018). Obviamente, os resultados obtidos nesta pesquisa devem ensejar o aprofundamento de estudos que gerem mais informações que auxiliem no diagnóstico do *caráter coeso* em solos.

Para a condição de solo seco, constatou-se que, exceto para o solo de Brejo-MA, os coeficientes angulares das funções lineares não foram significativos, evidenciando que a variação das notas atribuídas à consistência do solo não foram dependentes da variação da umidade – a faixa de umidade entre solo levemente seco e seco ao ar é tão estreita que as variações não foram correlacionadas com as alterações nas notas; ou seja, a diversidade de notas atribuídas à consistência foi influenciada por outros fatores não estudados nesta pesquisa. Considerada a função linear obtida para o solo de Brejo-MA, constata-se que em qualquer umidade na faixa de solo seco (entre  $U_{1s}$  e seco ao ar), os resultados remetem para nota correspondente à consistência *muito dura* ou *extremamente dura*.

A semelhança do que ocorreu para solo úmido, tal resultado sugere que o SiBCS (Santos et al., 2018) defina o intervalo de umidade em que deva ser feita a avaliação da consistência para fins de aferição do *caráter coeso* em condição de solo seco – ou, por outro lado, considere a possibilidade de os solos admitirem a consistência *dura*, como já ocorreu em edição anterior do SiBCS (Embrapa, 1999).

Consta na Figura 8 o gráfico biplot da análise de componentes principais. Para facilitar a interpretação, o gráfico foi dividido em quatro quadrantes. Como é possível observar, os dois primeiros componentes principais explicaram 82,16% da variação total dos dados e, portanto, seguindo a proposta de Joliffe (1986), não se faz necessária a análise dos demais componentes visto que a variação total explicada foi maior que 60%.

Figura 8 – Gráfico biplot com dois componentes principais (CE1: Pacajus; CE2: Fortaleza; RT: resistência tênsil; Uar: umidade de solo seco ao ar).

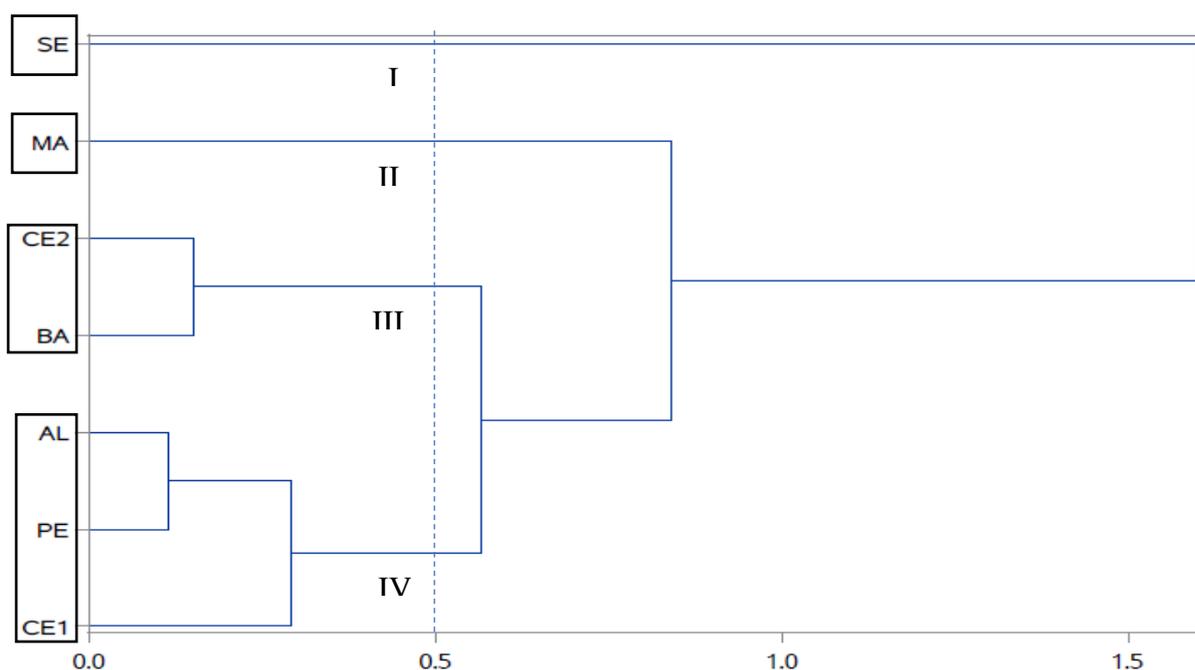


Observando-se o quadrante I, os solos do Maranhão e Sergipe foram caracterizados dos demais pelas variáveis silte, notas atribuídas pelo avaliador e a resistência tênsil (RT); as variáveis Nota e RT se correlacionaram positivamente, sendo próximas, o que sugere maior correlação entre ambas, o que de fato ocorreu, tendo em vista que os solos com maior valor de RT também eram classificados quanto à consistência seca com as maiores notas.

No quadrante II, os solos de Fortaleza-CE e Rio Largo-AL caracterizaram-se pelos valores de argila e umidade do solo seco ao ar. A proximidade dessas duas variáveis é explicada pelo fato de que a umidade residual dos solos é basicamente função do conteúdo de argila. Além disso, essas duas variáveis são inversamente correlacionadas com as variáveis areia e densidade do solo, no quadrante IV, tendo em vista que solos arenosos, em geral, são mais densos e retêm menos água, sendo, portanto, as variáveis responsáveis pela caracterização dos solos de Goiana-PE e Pacajus-CE.

Após a análise de componentes principais realizou-se a análise de agrupamentos. Atribuindo-se o valor 0,50 para a distância de ligação no dendrograma, observou-se a formação de quatro grupos (Figura 9). Os grupos I e II, constituídos por solos de Sergipe e Maranhão, respectivamente, caracterizaram-se por maior coesão de seus agregados/torrões, com maiores médias de resistência tênsil e densidade do solo, sendo esta última levemente maior para o solo de Sergipe, o que pode ter ocasionado a divisão desses dois solos em grupos distintos.

Figura 9 – Análise de agrupamento (SE: Sergipe; MA; Maranhão; CE2: Ceará, Fortaleza; BA: Bahia; AL: Alagoas; PE: Pernambuco; CE1: Ceará, Pacajus).



Fonte: O autor

Por sua vez, o grupo III, constituído pelos solos de Fortaleza-CE e Cruz das Almas-BA, foi caracterizado por solos com valores de resistência tênsil mais baixos, além de valores de densidade de agregados/torrões próximos a  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , coincidentemente, o limite inferior da média de densidade do solo encontrada em horizontes com *o caráter coeso*, como citado anteriormente.

Por fim, o grupo IV, constituído pelos solos de Pacajus-CE, Rio Largo-AL e Goiana-PE, caracterizou-se principalmente pela composição granulométrica mais semelhante, sendo mais visível nos solos de Pernambuco e Alagoas, os quais não apresentaram diferenças estatísticas em nenhuma das frações granulométricas e estão na mesma classe textural (Tabela 3).

## 5 CONCLUSÕES

Em solo úmido, a consistência *friável* ou *firme* não ocorre em umidade próxima à condição ligeiramente úmida, sendo observada em umidade mais próxima à capacidade de campo.

Em solo seco, a consistência torna-se *dura*, *muito dura* ou *extremamente dura* antes de o solo ficar seco ao ar.

É prudente que os sistemas de taxonomia de solos definam o intervalo de umidade em que deva ser feita a avaliação da consistência para fins de aferição do *caráter coeso* em condição de solo úmido.

## REFERÊNCIAS

- 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**, Madison, v. 73, n. 2, p. 449–452, 2009.
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.
- AL-SHAMMARY, A. A. G., KOUZANI, A. Z., KAYNAK, A., KHOO, S. Y., NORTON, M., GATES, W. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. **Pedosphere**, [S.I.], v. 28, n. 4, p. 581–596, 2018.
- ANDRADE, K. R. **Atributos físico-hídricos de solos coesos da Zona da Mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Departamento de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.
- ANJOS, L. H. C. **Caracterização, gênese, classificação e aptidão agrícola de uma sequência de solos do terciário na região de Campos**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1985.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; LOPES, A. S. Descrição morfológica de um Argissolo Amarelo e Latossolo Amarelo. Fortaleza: UFC, 2019. (Informação pessoal).
- ARAÚJO, S. S. A. M.; MENEZES, A. S.; ALENCAR, T. L.; SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M.C. G.; ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, Cremlingen, v. 166, n. 1, p. 290–297, 2018.
- ARAÚJO FILHO, J. O.; ALMEIDA, B. G.; ANDRADE, R. K. Descrição morfológica de um Argissolo Amarelo. In: ANDRADE, K. R. **Atributos físico-hídricos de solos coesos da Zona da Mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Departamento de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- 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: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. (Eds.). **Anais do workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123–142.
- BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F. B.; FABIOLA, N.; TORMENA, C. A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: Efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 227–234, 2010.

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.

BLAKE, G. BULK DENSITY. IN: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods**. 1. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 374–390.

BREUER, J.; SCHWERTMANN, U. Changes to hardsetting properties of soil by addition of metal hydroxides. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, p. 657-664, 1999.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações** (Tradução). Porto Alegre: Artmed, 2009.

CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C.; NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos Tabuleiros Costeiros no distrito de Irrigação Platô de Neópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 45-50, 2004.

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**, Viçosa, v. 32, p. 297-313, 2008a.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F.; CURI, N. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.1857-1872, 2008b.

COSTA, O. D. V.; LIMA, A. V. Revisão da descrição do perfil da Reunião Técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, publicado nos Anais, realizada em Cruz das Almas em 1996. Informação pessoal. Cruz das Almas: BA, 2019.

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

DIAS, C. B.; ROCHA, G. C.; ASSIS, I. R.; FERNANDES, R. B. A. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 6, p. 868-878, 2016.

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.

FRANZMEIER, D. P; CHARTRES, C. J; WOOD, J.T. Hardsetting Soils in Southeast Australia: Landscape and Profile Processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1178-1187, 1996.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size Analysis. In: DANE, J.; TOPP, G. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, part 4, physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Book Series Nº 5, 2002. p. 255–293.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 613-620, 2002.

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

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 Agrícola**, Piracicaba, v. 66, p. 499-505, 2009.

HOSSNE GARCÍA, A. J. H.; JAIME, Y. N. M; ZASILLO CONTRERAS, Á. M.; BASTARDO, L.D.S.; LLOVERA, F. A. S. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship. **Revista Científica UDO Agrícola, [S.I.]**, v. 12, n. 2, p. 324–337, 2012.

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

JACOMINE, P. T. K. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: NOGUEIRA, L. R. Q.; NOGUEIRA, L. C. (Eds.). **Anais da Reunião Técnica Sobre Solos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas: EMBRAPA-CPATC, 1996. p. 13–25.

JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. (Eds.). **Anais do workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros**, Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 19–46.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis, Second Edition**. New York: Springer, 1986.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relação solo-planta**. Piracicaba: Ceres, 1979.

LAMOTTE, M.; BRAUND, A.; HUMBEL, F. X.; HERBILLON, A. J.; RIEU, M. A hard sandy-loam soil from semi-arid northern Cameroon: Fabric of the groundmass. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 48. p. 213-225, 1997.

LEY, 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.

LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Influência dos horizontes coesos na dinâmica da água no solo. **Anais do workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros. Aracaju**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001, p. 193-207.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. São Paulo: Edusp, 2018.

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**, Viçosa, v. 28, p. 467-476, 2004.

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

LIMA 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**, Viçosa, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIRA, R. A.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; MARCELO, V. F. Uso agrícola e atributos físico-hídricos de solo coeso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Viçosa, v. 9, n. 7, p. 2277–2289, 2016.

MATERECHERA, S. A. Aggregation in a surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. **Soil & Tillage Research**, [S.I.], v. 105, p. 251-259, 2009.

MELO FILHO, H. F. R.; ARAÚJO FILHO, J. O. Descrição de perfil (1984). In: NOGUEIRA, L. R. Q.; NOGUEIRA, L. C. (Eds.). **Anais da Reunião Técnica Sobre Solos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas: EMBRAPA- CPATC, 1996. p. 13–25.

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

MOTA, J. C. A., SILVA, C.P.; ALMEIDA, B. G., ROMERO, R. E., ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, L. S.; COSTA, M. C. G. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in Northeast of Brazil: Relationship of tensile strength with silicon, aluminum and iron from poorly crystalline compounds. **Geoderma Regional**, [S.I.], v. 24, p. e00361, 2021.

MOTA, J. C. A.; FEITOSA, C. E. L.; OLIVEIRA, L. S.; PINHEIRO, J. I.; SOUSA, A. M.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; QUEIROZ, A. S.; NASCIMENTO, Í. V. Pipette Method: Errors Resulting From Aliquot Collection Depth in Soil Clay Quantification. **Journal of Agricultural Science**, Ontario, v. 11, n. 2, p. 244, 2019.

NUNES, F.C.; SILVA, E.F.; VILAS BOAS, G. S. Grupos Barreiras: Características, Gênese e Evidências de Neotectonismo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 194**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011.

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**, Brasília, v. 3, p. 207-214, 1968.

OLIVEIRA, L. S.; NUNES, M. R.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; ALENCAR, T. L.; MOTA, J. C. A Tensile strength values for the degrees of soil

consistency using human perception and TS-Soil device. **Catena**, Cremlingen, v. 190, p. 1–6, 2020.

QUEIROZ, A.S. **Estimativa da friabilidade de solos com dados de resistência tênsil**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – 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.

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**, Viçosa, v. 37, p. 837-845, 2013.

SANTOS, C. L. A. **Curva característica de água no solo: relações com estrutura e volume da amostra**. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas) - Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 531 p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SAS STUDIO - University Edition, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2012-2018.

SILVA, L.; EMER, A. A.; BORTOLINI, C. E.; ARRUDA, J. H. Estudo de um Nitossolo Vermelho com evidência de caráter coeso da Região Sudoeste do Paraná. **Synergismus Scyentifica**, Paraná, v. 4, p. 301-304, 2009.

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

SILVA, M. B.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. Á de. (ed.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington, D.C.: USDA Handbook 18. Government Printing Office, 2017.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 943–952, 2008.

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

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

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