



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

**ADEMIR SILVA MENEZES**

**MORFOLOGIA E FUNCIONALIDADE DA REDE POROSA DE HORIZONTES  
COM E SEM CARÁTER COESO EM SOLOS DE TABULEIRO COSTEIRO**

**FORTALEZA**

**2016**

ADEMIR SILVA MENEZES

MORFOLOGIA E FUNCIONALIDADE DA REDE POROSA DE HORIZONTES COM E  
SEM CARÁTER COESO EM SOLOS DE TABULEIRO COSTEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

FORTALEZA

2016

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)

---

- M51m Menezes, Ademir Silva.  
Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de Tabuleiro Costeiro / Ademir Silva Menezes. – 2016.  
76 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota .
1. Estrutura do solo. 2. Porosidade. 3. Micromorfometria. I. Título.

CDD 631.4

---

ADEMIR SILVA MENEZES

MORFOLOGIA E FUNCIONALIDADE DA REDE POROSA DE HORIZONTES COM E  
SEM CARÁTER COESO EM SOLOS DE TABULEIRO COSTEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 14 /07/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

Aos meus pais, Pedro Menezes e Antônia  
Pereira, e a minha segunda mãe de criação  
Izabel Maria. Aos meus avós paternos Manuel  
Cordeiro e Maria José de Menezes (*in  
memorian*).

## AGRADECIMENTOS

À força divina que me concede a coragem para superar alguns entraves que a vida impõe.

Aos que me criaram: Pedro Menezes, Antônia Pereira e Izabel Maria, pelo amor e compreensão do meu afastamento de casa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela excelente orientação, pelos ensinamentos, pela amizade e pelo seu caráter profissional.

Ao colega Magnum de Sousa Pereira por intermediar a nossa entrada na área de estudo no município de Aquiraz, Ceará.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, por me despertar sobre a filosofia científica, homem de exemplo e profissional de boa índole.

Ao Prof. Dr. Raul Shiso Toma, pela colaboração e apoio durante execução da pesquisa no tocante as análises micromorfométricas.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Ciências do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, que com os recursos do Projeto Pró-Integração e do PROAP viabilizaram a realização desta pesquisa.

Aos Professores participantes da banca examinadora, Raimundo Nonato de Assis Júnior e Brivaldo Gomes de Almeida, pelo tempo dedicado, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À amiga Prof.<sup>a</sup> Joziane Paulo pela correção linguística da redação desta Dissertação, e aos amigos Professores José Souza (Zezim) e Franzé Moreira pelo apoio e incentivo durante o Mestrado.

Aos colegas da turma de Mestrado 2014.2: Janete Melo, Hermano Melo, Ítalo Oliveira, Alexandro Lima, Denise Castro e Cícera Juliana, pelo apoio e reflexões durante o Curso.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, Carla Danielle (Carlinha), Thiago Leite, Alcione Guimarães e Arilene Franklin que, de alguma, forma contribuíram para a finalização desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que direto ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento profissional. Obrigado a todos.

“Deve-se evitar toda precipitação e todo preconceito ao se analisar um assunto e só ter por verdadeiro o que for claro e distinto.”

René Descartes (1596 – 1650)

## RESUMO

O conhecimento sobre morfologia e funcionalidade da rede de poros é importante para o manejo de solos na agricultura. Partindo da hipótese de que horizontes com caráter coeso apresentam rede porosa distinta quanto à morfologia e funcionalidade no solo, em decorrência da grande quantidade de poros pequenos e, principalmente, por estarem orientados preferentemente na horizontal, o objetivo deste trabalho foi avaliar a morfologia, funcionalidade e orientação dos poros em horizontes coesos e não coesos de textura franco-argiloarenosa e franco-arenosa em Tabuleiro Costeiro do estado do Ceará, Brasil. Foram coletadas amostras com estrutura preservada nas posições (horizontal e vertical) dos horizontes coeso e não coeso de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd) e Argissolo Amarelo Eutrocoeso abruptico (PAex). Para as análises micromorfométrica as amostras foram coletadas em caixa de papel cartão com dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,04 m. Avaliou-se a granulometria, densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar, comprimento médio de poros, curva de retenção, resistência à penetração e micromorfometria. Foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, em fatorial 2 x 2 (Bt coeso e Bt não coeso; duas posições de coleta: horizontal e vertical) com sete repetições. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk, F e de Tukey, todos com um intervalo de confiança de 95%. A densidade do solo para os coesos foi estatisticamente superior a dos não coesos no PVAd e no PAex. A porosidade em horizontes coesos foi significativamente menor do que a observada para os horizontes não coesos em ambos os solos. Os microporos do horizonte coeso em diferentes posições no PVAd não diferem significativamente entre si. Concluiu-se que horizontes com caráter coeso apresentam rede porosa distinta quanto à morfologia e funcionalidade no solo; a rede porosa dos horizontes coesos é mais eficiente horizontalmente, com predomínio de poros arredondados; os poros nos horizontes com caráter coeso são menos funcionais que os dos horizontes sem caráter coeso.

**Palavras-chave:** Estrutura do solo. Porosidade. Micromorfometria.

## ABSTRACT

The knowledge on morphology and function of the pore network is important for the management of soils in the agriculture. Assuming that horizons with cohesive character have different porous network due to the large amount of small pores and especially for being horizontally oriented, the aim of this work was to compare the morphology, functionality and orientation of the pores in cohesive and non-cohesive horizons of clayey-sandy loam and sandy loam texture in coastal boards of Ceará state, Brazil. Samples of cohesive and non-cohesive horizons were collected from Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd) and Argissolo Amarelo Eutrocoeso abruptico (PAex) with preserved structure in horizontal and vertical positions. For micromorphometric analyzes, the samples were collected in cardboard box with dimensions of 0.12 x 0.07 x 0.04 m. Evaluations of particle size, bulk density, porosity, air permeability, average length of pores, retention curve, penetration resistance and micromorphometrics were made. It was considered a completely randomized design in a factorial 2 x 2 (cohesive Bt and Bt non-cohesive; two collection positions: horizontal and vertical) with seven replicates. The data were submitted to Shapiro-Wilk, F and Tukey tests, all with a 95% confidence interval. The density of the soil for Cohesive was statistically superior to non-cohesive in PVAd and PAex. The porosity in cohesive horizons was significantly lower than that observed for non-cohesive on both soils. The micropores of the cohesive horizon at different positions in PVAd do not differ significantly. It was concluded that horizons with cohesive character have different porous network as the morphology and functionality in the soil; the porous network of cohesive horizons is more efficient horizontally, with a predominance of rounded pores; the pores in the horizons with cohesive character are less functional than the horizons without cohesive character.

**Keywords:** Soil structure. Porosity. Micromorphometrics.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação da localização dos perfis (PVAd e PAex) de coleta das amostras no município de Aquiraz, Ceará ..... 24
- Figura 2 – Representação das posições de coleta (horizontal e vertical) das amostras nos horizontes Bt coeso e Bt não coeso dos perfis (PVAd e PAex)..... 25

## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Distribuição das areias por tamanho nos horizontes com e sem caráter coeso do PVAd (A e B) e do PAex (C e D), respectivamente. 35
- Gráfico 2 – Médias e desvio-padrão dos valores de densidade do solo nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostras nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 36
- Gráfico 3 – Médias e desvio-padrão dos valores de porosidade total nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 38
- Gráfico 4 – Médias e desvio-padrão dos valores de macroporosidade nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 39
- Gráfico 5 – Médias e desvio-padrão dos valores de microporosidade nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 41
- Gráfico 6 – Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) e os potenciais mátricos aplicados ( $\phi m$ ) nas amostras de solo de horizontes com e sem caráter coeso coletadas nas posições horizontal (H) e vertical (V) no PVAd e no PAex ..... 42
- Gráfico 7 – Médias e desvio-padrão dos valores de permeabilidade intrínseca do solo ao ar nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex, sob os potenciais mátricos

---

	de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	44
Gráfico 8 –	Médias e desvio-padrão dos valores referentes ao índice de continuidade de poros nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex, sob os potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	45
Gráfico 9 –	Relação linear entre $\text{Log } K_{ar}$ e $\text{Log } \varepsilon_{ar}$ das amostras de solo de horizontes com e sem caráter coeso, coletadas nas posições: horizontal (H) e vertical (V) do PVAd e PAex .....	46
Gráfico 10 –	Curva característica de retenção de água no solo para os horizontes com e sem caráter coeso coletados em diferentes disposições no PVAd e PAex.....	49
Gráfico 11 –	Médias e desvio-padrão dos valores de comprimento médio de poros nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	52
Gráfico 12 –	Médias e desvio-padrão dos valores de resistência do solo à penetração nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	53
Gráfico 13 –	Distribuição da porosidade total (PT) dos horizontes com e sem caráter coeso de acordo com a forma e tamanho dos poros no PVAd e imagens bidimensionais em que os poros são de cor branca e os agregados em preto	55

---

.....  
Gráfico 14 – Distribuição da porosidade total (PT) dos horizontes com e sem o caráter coeso de acordo com a forma e tamanho dos poros no PAex e imagens bidimensionais em que os poros são de cor branca e os agregados em preto  
.....

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição das classes de forma dos poros.....	32
Tabela 2 – Granulometria nos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAd) e Argissolo Amarelo (PAex) .....	33
Tabela 3 – Médias dos parâmetros da equação de regressão de $\text{Log } K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e da porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ) para os horizontes com e sem caráter coeso coletados em duas posições: horizontal e vertical no PVAd e PAex.....	47
Tabela 4 - Valores médios dos parâmetros de ajuste ( $\alpha$ , $m$ e $n$ ) da equação de van Genuchten (1980) para os horizontes com e sem caráter coeso dos solos PVAd e PAex.....	51
Tabela 5 – Quantidade de poros distribuídos na horizontal e na vertical dos horizontes coesos e não coesos para o PVAd e PAex.....	58

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Importância agrícola dos solos dos Tabuleiros Costeiros.....	16
2.2 Caráter coeso em solos: aspectos genéticos .....	17
2.3 Atributos físicos de horizontes com caráter coeso.....	18
2.3.1 <i>Textura do solo</i> .....	18
2.3.2 <i>Porosidade do solo</i> .....	19
2.3.3 <i>Densidade do solo</i> .....	20
2.3.4 <i>Resistência à penetração</i> .....	20
2.3.5 <i>Retenção de água no solo</i> .....	21
2.3.6 <i>Continuidade de poros no solo</i> .....	22
2.4 Análise micromorfométrica em horizontes com caráter coeso.....	22
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
3.1 Local do experimento e caracterização das áreas experimentais .....	24
3.2 Amostragem.....	25
3.3 Atributos avaliados .....	25
3.3.1 <i>Densidade do solo</i> .....	25
3.3.2 <i>Densidade das partículas</i> .....	26
3.3.3 <i>Granulometria</i> .....	26
3.3.4 <i>Argila dispersa em água</i> .....	26
3.3.5 <i>Grau de Flocculação</i> .....	26
3.3.6 <i>Porosidade total</i> .....	27
3.3.7 <i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar</i> .....	27
3.3.8 <i>Índice de continuidade de poros</i> .....	28
3.3.9 <i>Curva característica de retenção de água no solo</i> .....	28
3.3.10 <i>Resistência do solo à penetração</i> .....	29
3.4 Análise dos dados .....	30
3.5 Análises micromorfométricas dos horizontes coesos e não coesos.....	30
3.5.1 <i>Procedimento e preparo das amostras</i> .....	30
3.5.2 <i>Porosidade do solo pelo método de análise de imagens</i> .....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
4.1 Textura do solo, argila dispersa em água e grau de flocculação.....	33
4.2 Densidade do solo e de partículas.....	35
4.3 Porosidade do solo.....	37
4.3.1 <i>Macroporosidade</i> .....	38
4.3.2 <i>Microporosidade</i> .....	40
4.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar .....	42
4.5 Índice de continuidade de poros .....	44
4.6 Curva característica de água no solo .....	48
4.7 Comprimento médio de poros .....	51
4.8 Resistência mecânica do solo à penetração .....	52
4.9 Porosidade dos horizontes com e sem caráter coeso obtida pela micromorfometria .....	54
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A interpretação da capacidade do solo desempenhar bem as suas funções no ambiente se torna possível a partir do conhecimento do manejo e principalmente de atributos do solo que sejam associados ao funcionamento. Nessa perspectiva, há os indicadores de qualidade que possibilitam o monitoramento das alterações que ocorrem no solo, sejam por causas naturais e/ou antrópicas, constituindo-se, portanto, meio para o diagnóstico quando do planejamento do manejo do solo em áreas agricultáveis e fazer o seu uso de forma racional.

Em termos de qualidade do solo, vários estudos foram aventados em solos de Tabuleiros Costeiros no Brasil em virtude das interferências na produtividade agrícola nesta unidade geomorfológica, principalmente, do ponto de vista químico do solo.

Os Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro têm grande importância social e econômica para a maioria dos estados dessa região, em virtude da diversidade de exploração das terras para a agricultura e pelas concentrações urbanas, pelo potencial produtivo, além da infraestrutura de transporte (rodoviário e marítimo) para o escoamento da produção agrícola.

Nos solos dos Tabuleiros Costeiros predominam os Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. Nestas classes de solo, é comum a ocorrência de horizontes com caráter coeso entre 0,30 e > 1,0 m abaixo da superfície do solo. Nos Argissolos é comum nos horizontes de transição AB ou BA, podendo se prolongar até o Bt, e em Latossolos pode aparecer no Bw. Estes solos têm apresentado algumas limitações (químicas e físicas) para a agricultura, entre as quais, baixa fertilidade natural, baixa capacidade de troca catiônica e a ocorrência dos horizontes com caráter coeso, estes apresentando elevada resistência à penetração de raízes quando secos e porosidade reduzida.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013) conceitua o caráter coeso como “horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração de faca ou martelo pedológico e que são de muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos”. Esses horizontes, por serem adensados, apresentam limitações à distribuição da água no perfil, bem como a aeração da matriz do solo, ou seja, restringindo o pleno funcionamento da rede porosa.

Tendo em conta a ocorrência do adensamento natural nos horizontes com caráter coeso, há elevada densidade, redução do espaço poroso, resultando em maior quantidade de microporos, portanto, dificultando a penetração das raízes, trocas gasosas e a infiltração da água no solo, acarretando problemas como tombamentos das plantas e escoamento superficial, sendo que este último contribui severamente para erosão hídrica. Como consequência, há

perdas de solo e de nutrientes, dificultando o desenvolvimento completo das culturas agrícolas nestes solos.

Desse modo, aventou-se a hipótese de que horizontes com caráter coeso apresentam rede porosa distinta quanto à morfologia e funcionalidade no solo, em decorrência da grande quantidade de poros pequenos e, principalmente, por estarem orientados preferentemente na horizontal. Portanto, objetivou-se avaliar a morfologia, funcionalidade e orientação dos poros em horizontes coesos e não coesos de textura franco-argiloarenosa e franco-arenosa em Tabuleiro Costeiro do estado do Ceará.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Importância agrícola dos solos dos Tabuleiros Costeiros

Os Tabuleiros Costeiros são uma unidade geomorfológica que compreende a faixa costeira do litoral brasileiro desde o estado do Rio de Janeiro até o estado do Amapá (MELO *et al.* 2014), ocupando uma área em torno de 200.000 km<sup>2</sup> (JACOMINE, 1996). Aproximadamente 16% dessa área estão na região Nordeste, com cerca de dez milhões de hectares (GIAROLA e SILVA, 2002), distribuídas em sete estados, a saber: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas e Bahia (SOUZA *et al.*, 2001). No estado do Ceará, os Tabuleiros Costeiros ocupam pouco mais de 10.000 km<sup>2</sup> (LIMA, 2004).

A proximidade dessa unidade geomorfológica ao litoral brasileiro impôs às terras grande pressão por ocupação (SILVA, 2012) em virtude da facilidade para escoar a produção. Assim, o agronegócio tem ocupado os solos dos Tabuleiros Costeiros com a fruticultura irrigada, com a cultura da laranjeira e principalmente com a do coqueiro-anão-verde, sendo que esta última representa uma das principais vocações agrícolas, contribuindo para a geração de emprego e renda na zona rural (CINTRA *et al.*, 2009).

No Sudeste brasileiro, mais precisamente no Rio de Janeiro, as áreas de Tabuleiros Costeiros são cultivadas há mais de 50 anos com a cultura da cana-de-açúcar, pastagens e, mais recente, com fruticultura (FONTANA *et al.*, 2001). Entretanto, o fato de alguns solos dos Tabuleiros Costeiros apresentarem camadas coesas, aliado à má distribuição de chuvas em algumas regiões, tem contribuído para a baixa produtividade agrícola (CINTRA e LIBARDI, 1998).

As grandes áreas produtoras de alimentos e madeira estão localizadas nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. No entanto, os solos desta unidade geomorfológica possuem algumas limitações para a agricultura, em virtude do relevo, que pode ser definido por vales estreitos, encostas suaves, da baixa disponibilidade de nutrientes, deficiência de água, já que horizontes com caráter coeso limitam a infiltração quando ocorrem na parte mais superficial, além dos fatores químicos do solo como a alta acidez ativa e elevada saturação por alumínio (CORRÊA *et al.*, 2008; JACOMINE, 1996; MELO *et al.*, 2014; SANTANA *et al.*, 2006).

## 2.2 Caráter coeso em solos: aspectos genéticos

Os solos com caráter coeso ocorrem comumente no Brasil em solos derivados de sedimentos terciários da Formação Barreiras, predominantes nas zonas costeiras nas regiões Sudeste e Nordeste (GIAROLA *et al.*, 2001; LIMA NETO *et al.*, 2009). Conforme Lima Neto *et al.* (2010), as classes de solos dos Tabuleiros Costeiros tais como Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Latossolos Amarelos no Nordeste brasileiro apresentam horizontes subsuperficiais adensados e têm ocorrência significativa do caráter coeso.

Os horizontes com caráter coeso têm os espaços porosos reduzidos e, além disso, são duros a extremamente duros quando secos, e firmes quando úmidos, com predominância de caulinita (EMBRAPA, 2013; RIBEIRO R, 2001; RIBEIRO *et al.*, 2012). Resende *et al.* (1992) e Bezerra *et al.* (2014) sugerem que a má seleção da fração areia contribui para a ocorrência da coesão, considerando que a não homogeneidade dessa fração é responsável pelo empacotamento após o arranjo das partículas.

No tocante à gênese do caráter coeso ainda há muita discussão, pois há relatos de que está relacionada à migração da fração argila com diâmetro  $< 0,2 \mu\text{m}$  das camadas superficiais do solo para as camadas mais profundas no processo de argiluviação (CORRÊA *et al.* 2008), bem como à forte instabilidade estrutural, à presença de sílica secundária, à argila dispersa nos microporos e ao adensamento por dessecação oriunda da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem (GARIOLA e SILVA, 2002; LIMA NETO *et al.*, 2009; RIBEIRO P, 2001; VIEIRA *et al.*, 2012; VIEIRA, 2013). Para Araújo Filho *et al.* (2001), a sílica e outros aluminossilicatos podem atuar como agentes cimentantes no período de secamento do solo.

Quanto à estrutura do solo, pode ser afetada pela iluviação de argila fina ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ), e por uma possível perda de ferro na parte superior (LIMA NETO *et al.*, 2009). Esse processo provoca adensamento do horizonte iluvial, acarretando também um ajuste face a face da caulinita, considerando que a predominância deste mineral na fração argila pode contribuir para coesão dos solos nos Tabuleiros Costeiros (LIMA NETO *et al.*, 2010).

O adensamento natural do material que constitui os horizontes coesos, oriundo da acumulação de materiais finos e do arranjo das partículas, que aumenta a microporosidade, limita a permeabilidade e favorece a precipitação de alguns agentes cimentantes temporariamente, principalmente a argila (GIAROLA e SILVA, 2002). Corrêa *et al.* (2008) consideram que a gênese dos horizontes coesos se deve à iluviação de argila muito fina ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) causando obstrução da rede porosa.

## 2.3 Atributos físicos de horizontes com caráter coeso

Os atributos físicos do solo são importantes para melhor esclarecimento e identificação dos horizontes com caráter coeso. Assim, Santana *et al.* (2006) estudaram algumas características físicas, como granulometria, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração em dois solos típicos de Tabuleiros Costeiros (Latosolo Amarelo e Argissolo Acinzentado) do estado da Bahia, ambos os solos com caráter coeso. Os autores concluíram que aqueles atributos são parâmetros sensíveis que ajudam na identificação de horizontes com caráter coeso.

Lima *et al.* (2004), com o intuito de comparar as características físicas e químicas dos solos coesos do estado do Ceará com os solos coesos de outros estados brasileiros, concluíram que a resistência à penetração e a densidade também ajudam na identificação dos horizontes coesos.

### 2.3.1 Textura do solo

A textura do solo é uma característica física associada à distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais no solo (FERREIRA, 2010). Os horizontes com caráter coeso apresentam textura média, argilosa ou até muito argilosa (IBGE, 2007). Segundo Vieira (2013), os horizontes com caráter coeso apresentam, geralmente, textura franco-arenosa ou mais fina. Vieira *et al.* (2012) verificaram que horizontes coesos tiveram sua textura variando de franco-argilo-arenosa a franco-arenosa (Bt1) no estado do Ceará.

A textura média a argilosa dos solos coesos está relacionada com depósitos sedimentares da Formação Barreira bastante intemperizados (LIMA NETO *et al.*, 2009). Essa assertiva é válida tanto para os Argissolos Amarelos quanto para os Latossolos Amarelos, como classes de solos predominantes nos Tabuleiros Costeiros. Por isso, aqueles autores ao estudarem Argissolos e Latossolos com horizonte coeso, registraram incremento de argila em profundidade, cuja classe textural do coeso variou de franco argiloarenosa a argiloarenosa. Conforme Jacomine (1996), esse incremento de argila ou mudança textural mais pronunciada para os Argissolos Amarelos contribui para a ocorrência do coeso em profundidades superiores a 0,9 m.

Vale ressaltar que o atributo textura é importante na definição da retenção de água no solo. Conforme Melo *et al.* (2014), horizontes de textura fina como o horizonte BA coeso apresenta maior capacidade de retenção de água em função de a sua porosidade total possuir

uma fração maior de microporos.

No leste do Maranhão, Dantas *et al* (2014) constataram comportamento homogêneo na textura dos solos com caráter coeso, sendo a textura franco-arenosa a mais comum para o horizonte A, e a franco-argilo-arenosa para os horizontes AB, BA e Bt1.

### **2.3.2 Porosidade do solo**

A porosidade do solo é importante para caracterizar o armazenamento de água nele e, sobretudo, o movimento desta, além da possibilidade do desenvolvimento de raízes das plantas. Como as partículas variam em tamanho, forma e regularidade, a geometria das partículas do solo determina a quantidade de poros existentes (FERREIRA, 2010). No espaço poroso do solo é onde ocorrem os processos dinâmicos relacionados ao ar e à solução do solo (HILLEL, 2004). A divisão dos poros do solo, de acordo com Richards (1965), se dá em macroporos (diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) e microporos (diâmetro  $< 50 \mu\text{m}$ ).

Quanto ao movimento da água no solo, esta depende principalmente da quantidade, da continuidade, do tamanho dos poros (BEUTLER *et al.* 2001). Ou seja, em horizontes com caráter coeso, o adensamento pode comprometer a continuidade dos poros, conseqüentemente, reduzindo a sua permeabilidade ao ar e à água. Vale salientar que o efeito da coesão sob a continuidade dos poros pode apresentar efeito contrário, isto é, tornar os poros mais contínuos, evidentemente, a depender do arranjo das partículas e do tipo de empacotamento (aberto ou fechado).

De acordo com Corrêa *et al.* (2008), partículas finas dispersas podem migrar e se depositar nos poros causando sua obstrução, inclusive aumentando a coesão dos solos. Esses autores, estudando horizontes coesos em Tabuleiros Costeiros no Sul da Bahia, verificaram que os valores de macroporosidade dos horizontes coesos foram significativamente menores do que nos horizontes não coesos, com poros pouco conectados, confirmando a obstrução dos poros em decorrência da iluviação das argilas, verificado pela técnica de micromorfologia utilizando lâminas delgadas.

Lima *et al.* (2006), ao estudarem as características físicas e químicas de solos com caráter coeso em Tabuleiros Costeiros no estado do Ceará, verificaram que a área adensada do horizonte coeso apresentava uma forte orientação preferencial dos poros alongados, tendendo para a horizontal. Para os autores, a continuidade horizontal dos poros gera fluxo preferencial da água no solo, sendo que este fluxo não é descendente em virtude da predominância de poros pequenos e dos poros alongados de orientação horizontal em decorrência do

adensamento verticalmente, formando empacotamento dos poros (fechado).

### **2.3.3 Densidade do solo**

Segundo Klein (2014), o arranjo das partículas sólidas do solo representa a estrutura e, conseqüentemente, a densidade do solo. A densidade do solo é um atributo importante na qualidade estrutural do solo, sendo que seus valores variam de acordo com as alterações ocorridas no sistema solo. Os horizontes com caráter coeso, apesar de sua gênese ainda obscura, têm apresentado valores de densidade do solo elevada, de modo a afetar a funcionalidade da rede porosa, ou seja, as propriedades físico-hídricas.

Deste modo, a densidade do solo também é considerada um parâmetro na avaliação de horizontes com caráter coeso, já que esses horizontes apresentam valor elevado em relação aos horizontes não coesos (CINTRA *et al.*, 2009). Conforme Araújo Filho *et al.* (2001), tal parâmetro em horizontes coesos está entre 1,5 e 1,8 g cm<sup>-3</sup> em solos de textura média.

No estado de Alagoas, em horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros, Lima Neto *et al.* (2010) verificaram que a presença de argila dispersa foi mais significativa no horizonte coeso Bt do Argissolo, o que justificou a elevada densidade do solo no horizonte Bt em relação aos horizontes de transição AB e BA coesos daquela classe de solo. Os autores afirmam que a iluviação de argila no horizonte coeso em um Latossolo Amarelo contribui para elevar a densidade do solo e reduzir a porosidade total, evidenciando a migração de argilas na gênese desses horizontes.

Para Santana *et al.* (2006), a granulometria pode interferir nos valores de densidade durante a identificação dos horizontes coesos. Neste caso, a relação entre a densidade e a granulometria pode resultar em valores elevados de densidade do solo e levar a interpretações enganosas. Como exemplo, os autores citam horizontes Ap1 e Ap2, não coesos, arenosos, com densidade de 1,65 e 1,81 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, semelhantes aos valores de densidade dos horizontes coesos BA e Bt1.

### **2.3.4 Resistência à penetração**

Esse atributo físico também tem grande importância na compreensão e identificação de horizontes com caráter coeso. Além disso, esse atributo influencia na penetração das raízes das plantas e na dinâmica da água no solo com horizonte coeso e não

coesos.

A resistência do solo à penetração em horizontes com caráter coeso se manifesta à medida que a umidade do solo diminui, deste modo, considerando as características dos coesos, com grau de consistência variando de duro a extremamente duro, este comportamento compromete a penetração das raízes em profundidade, fato que dificulta o desenvolvimento pleno do sistema radicular das plantas cultivadas, conforme constatado em estudos com solos coesos no estado de Alagoas (LIMA NETO *et al.*, 2009).

Estudos realizados por Giarola *et al.* (2001), em um Latossolo Amarelo coeso em Cruz das Almas na Bahia, consideram a resistência à penetração como um atributo quantitativo de grande importância para a identificação dos horizontes com caráter coeso. Vieira (2013) acrescenta que tal atributo associado à densidade e à porosidade é útil na caracterização do comportamento de solos com caráter coeso.

Estudo referente ao comportamento físico de solos coesos no estado Ceará, realizado por Lima (2004), demonstrou que os valores de resistência à penetração foram mais elevados (> 25 MPa) do que em coesos de outros estados brasileiros, como exemplo na Bahia, (4,5 MPa) para o mesmo teor de água no solo (0,10 a 0,15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

### **2.3.5 Retenção de água no solo**

A retenção de água no solo é representada pela curva característica de água no solo. Esta descreve a quantidade de água retida no solo em equilíbrio a um dado potencial mátrico e é considerada importante ferramenta no estudo físico-hídrico dos solos (MELO *et al.*, 2014).

Os poros dos tipos canais e cavidades em horizontes com caráter coeso não são contínuos, com microfissuras não comunicantes nas áreas mais adensadas podem se comportar como reservatório de água do solo (LIMA, 2004).

Para Fonseca *et al.* (2007), o adensamento nos horizontes coesos pode formar uma zona de acumulação de água, de modo a disponibilizá-la às plantas. Outro fator que contribui para a retenção de água nos horizontes coesos, é a porção maior dos poros de menor diâmetro (< 50 µm), assim concluiu Lima *et al.*, (2005).

Horizontes coesos em solos de Tabuleiros Costeiros na região Nordeste do Brasil, por serem adensados, provocam alterações no movimento da água ao longo do perfil e, conseqüentemente, no desenvolvimento e na produtividade das culturas (CINTRA *et al.*, 2009). Considerando que o movimento da água na agricultura começa com a infiltração no

solo, aqueles autores, então, compararam volumes de água de irrigação, analisando o movimento e distribuição de água em Argissolo Amarelo coeso em Tabuleiros Costeiros na cultura do coqueiro-anão-verde, e concluíram que ao mensurar a umidade do solo até 1,2 m de profundidade esta foi reduzida na camada coesa.

### **2.3.6 Continuidade de poros no solo**

Para Ball *et al.* (1994), a conexão entre os poros é definida a partir da razão entre a permeabilidade do solo ao ar e a porosidade de aeração. O movimento da água no solo depende tanto da textura quanto da estrutura, mas é preciso que ocorra uma interligação dos poros com a superfície do solo e entre si em profundidade. O processo de aeração no solo depende da quantidade, tamanho e continuidade dos poros e, além disso, do manejo aplicado ao solo, pois este, quando inadequado, provoca alterações físicas, como a compactação, que pode reduzir a continuidade de poros no solo, impedindo, portanto, o funcionamento regular do sistema (SILVEIRA JUNIOR, *et al.*, 2012).

A continuidade de poros no solo é um indicador do movimento tridimensional da água e do ar (SILVEIRA JUNIOR *et al.*, 2012). A continuidade de poros é mais importante do que a porosidade, já que poros obstruídos não contribuem para realização da troca de gases entre o solo e a atmosfera (STRECK, 2007).

Como os horizontes subsuperficiais dos solos com caráter coeso são adensados, o manejo inadequado do solo aumenta os riscos de erosão e compactação das terras agricultáveis; conseqüentemente, há aumento da densidade e da resistência à penetração das raízes, com redução da porosidade total, da continuidade de poros, da diminuição da permeabilidade e da disponibilidade de água e nutrientes, diminuindo significativamente a produção agrícola em solos de Tabuleiros Costeiros, já que os mesmos apresentam baixa CTC e baixo teor de matéria orgânica (OLIVEIRA, 2008).

### **2.4 Análise micromorfométrica em horizontes com caráter coeso**

Uma técnica de avaliação da estrutura dos horizontes coesos é a da análise micromorfométrica, que permite a obtenção de informações, por imagem, das modificações estruturais do solo, como exemplo da iluviação das argilas e seu comportamento na estrutura do solo, além da quantificação e classificação dos poros (SOUZA, 2013).

O uso da micromorfologia nos estudos de solo é importante para esclarecer alguns

aspectos relacionados à gênese e ao manejo dos solos agricultáveis, sobretudo, esclarecer o comportamento morfológico atípico, por exemplo, no caso dos horizontes com caráter coeso. A técnica da microscopia ótica permite observações micromorfológicas de alta precisão, por exemplo, como os componentes do solo no seu arranjo espacial natural. Além disso, permite avaliar as alterações do sistema de manejo de forma quantitativa e qualitativamente relacionado aos atributos físicos do solo (SOUZA, 2013).

Em Argissolos Vermelhos, Argissolos Amarelos e Argissolo Acinzentado com caráter coeso em áreas de Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia e norte do Espírito Santo, ao serem estudados física e micromorfológicamente por Corrêa *et al.* (2008), ficou indicado que a gênese dos horizontes coesos se dá pelo maior conteúdo de argilas muito finas, entre horizontes ou dentro do mesmo horizonte como argilas dispersas. Os autores concluíram que a maior coesão foi observada em Argissolo Amarelo, fato associado ao clima mais seco, à sua textura menos argilosa e também à maior quantidade de feições de iluviação das argilas.

Com a técnica da micromorfometria na estrutura do solo, a porosidade do solo, ganhou dimensão quantitativa com o uso da análise de imagens, a qual permite a medição da estrutura em seções 2-D das amostras com estrutura preservada (COELHO, 2011). O espaço poroso do solo é verificado pelas imagens em computador com auxílio de software, assim, possibilitando à caracterização morfológica dos poros no solo e quantitativamente.

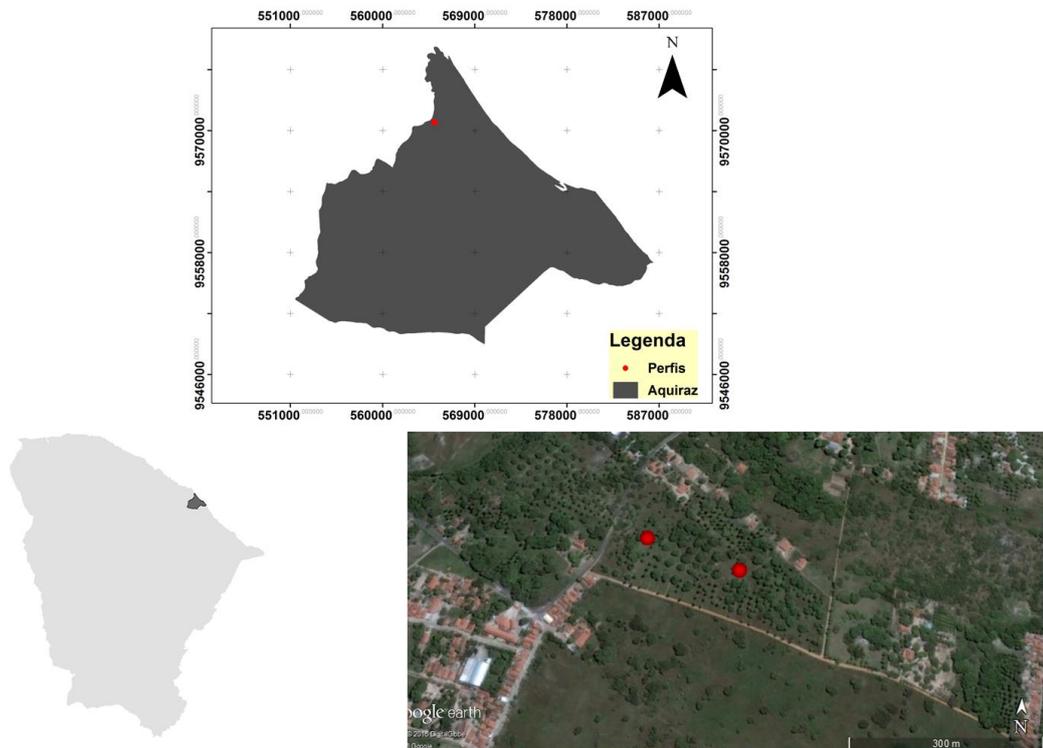
Vale ressaltar que a quantificação da porosidade total obtida por análise de imagens considera a área total da imagem obtida da relação entre número de pixels da fase porosa e o número total de pixels da imagem binária (COELHO, 2011). De acordo com Cooper (1999), os poros obtidos por imagens podem ser classificados em classes de tamanho e tipos de forma.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local do experimento e caracterização das áreas experimentais

O estudo foi realizado em área de Tabuleiro Costeiro no município de Aquiraz, Ceará (Figura 1). Os dois solos avaliados apresentam horizonte Bt com classe textural franco-argiloarenosa (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – PVAd) e franco-arenosa (ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso abruptico – PAex). Os horizontes coesos estão localizados a 81 cm e a 107 cm abaixo da superfície terrestre, para o PVAd e PAex, respectivamente. Quanto aos horizontes não coesos estudados, foi escolhido o primeiro horizonte subjacente ao coeso em cada solo. As descrições morfológicas estão apresentadas nos ANEXOS I e II. O critério para a seleção dos referidos solos foi de que, necessariamente, no mesmo pedon, pelo menos um horizonte apresentasse caráter coeso.

Figura 1 – Representação da localização dos perfis (PVAd e PAex) de coleta das amostras no município de Aquiraz, Ceará.

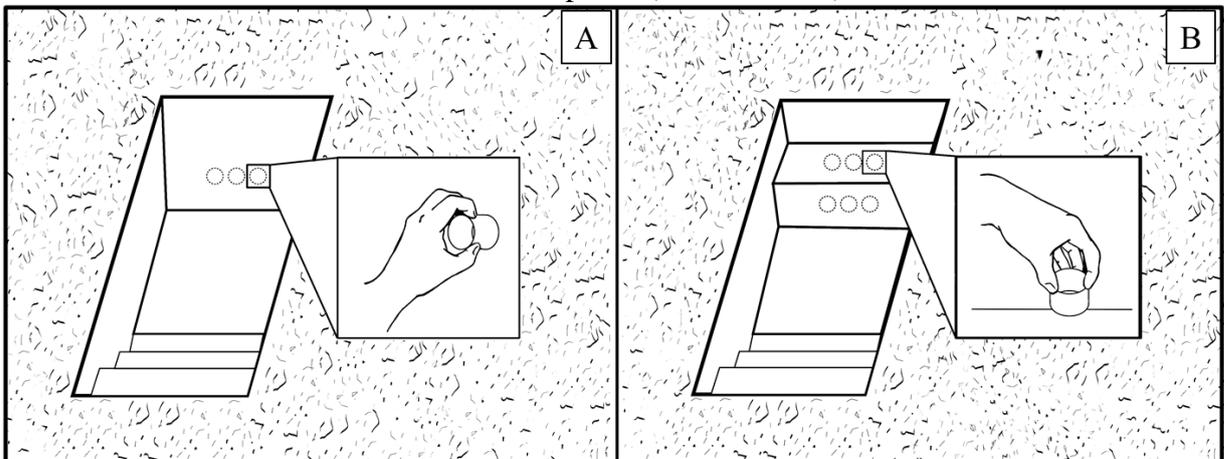


Fonte: Oliveira, D. P. (2016).

### 3.2 Amostragem

Para fins de avaliação da morfologia e funcionalidade da rede de poros, foram coletadas amostras de solos de horizontes Bt com e sem caráter coeso em cada solo, com sete repetições, considerando a estrutura preservada e não preservada. As amostras com estrutura preservada foram coletadas em anéis de aço com dimensões de 0,05 m de altura e diâmetro, considerando duas posições de coleta: horizontal (H) e vertical (V), conforme Figura 2. Quanto às posições de coleta dos horizontes no pedon, coletaram-se amostras com anéis volumétricos primeiramente na horizontal; em seguida, verticalmente, após a retirada dos horizontes sobrejacentes aos horizontes (Bt1 – coeso e Bt2 – não coeso) do PVAd e PAex. As análises físicas foram realizadas no laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará.

Figura 2 – Representação das posições de coleta (horizontal – A e vertical – B) das amostras nos horizontes Bt coeso e Bt não coeso dos perfis (PVAd e PAex).



Fonte: Passos Filho, F. Q. (2016).

### 3.3 Atributos avaliados

#### 3.3.1 Densidade do solo

Foi determinada a partir de amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de volume conhecido, e secas a 105 °C até massa constante (BLAKE e HARTGE, 1986b).

### ***3.3.2 Densidade das partículas***

Foi determinada pelo método do balão volumétrico, a partir de amostra com estrutura não preservada. Neste procedimento, o princípio é determinar o volume de álcool utilizado para completar um balão volumétrico de 50 mL que contenha 20 g de terra fina seca em estufa (BLAKE e HARTGE, 1986a).

### ***3.3.3 Granulometria***

O hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L<sup>-1</sup> foi utilizado para a dispersão química das partículas. A areia foi quantificada por peneiramento, a argila foi pelo método da pipeta. O silte foi quantificado por diferença, considerando a amostra inicial de solo menos o somatório de areia e argila (GEE e BAUDER, 1986).

Para o fracionamento da areia foram consideradas quatro classes de tamanho ( $\leq 2$  mm a  $> 1$  mm;  $\leq 1$  mm a  $> 0,5$  mm;  $\leq 0,5$  mm a  $> 0,25$  mm;  $\leq 0,25$  mm a  $> 0,053$  mm). Os dados da distribuição granulométrica da fração areia foram trabalhados estatisticamente por meio do programa de computador 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 [ $\phi = -\log_2 D$  (mm)]. Com a transformação dos diâmetros das classes em mm para escala phi, tem-se  $\phi$  de  $\leq 2$  a  $> 1$  mm =  $\phi$  de  $\leq -1$  a  $> 0$ ;  $\phi$  de  $\leq 1$  a  $> 0,5$  mm =  $\phi$  de  $\leq 0$  a  $> 1$ ;  $\phi$  de  $\leq 0,5$  a  $> 0,25$  mm =  $\phi$  de  $\leq 1$  a  $> 2$ ;  $\phi$  de  $\leq 0,25$  a  $> 0,053$  mm =  $\phi$  de  $\leq 2$  a  $> 4,24$ .

### ***3.3.4 Argila dispersa em água***

Determinada com procedimento adotado na análise granulométrica, distinguindo daquele por não utilizar o dispersante químico e desconsiderar as frações areia e silte.

### ***3.3.5 Grau de Floculação***

Foi calculado a partir da argila total e da argila dispersa em água, de acordo com a equação

$$GF = \left( \frac{\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}}{\text{argila total}} \right) \quad (1)$$

### 3.3.6 Porosidade total

Foi obtida a partir da densidade do solo e de partículas, de acordo com a equação

$$\alpha = \left( 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (2)$$

sendo  $\alpha$  a porosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\rho_p$  e  $\rho_s$  as densidades de partículas e do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), respectivamente. A determinação da microporosidade (poros com diâmetro  $< 50 \mu\text{m}$ ) foi realizada mediante a aplicação de potencial mátrico de -6 kPa no funil Haines, até que a água que ocupava os poros com diâmetro igual ou superior a  $50 \mu\text{m}$  fosse drenada (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986). A macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A distribuição do tamanho de poros foi efetuada considerando a equação da capilaridade de acordo com o diâmetro dos poros, obtido a partir da curva característica de retenção de água no solo.

### 3.3.7 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

Foi determinada segundo o princípio do método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946;). Pelo anel volumétrico contendo amostra de solo com estrutura preservada, equilibrada nos potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33, e -100 kPa, se fez passar uma quantidade de ar correspondente à pressão de 1 kPa no reservatório. Durante o procedimento foi mensurado eletronicamente o decaimento da pressão no tempo, até atingir o equilíbrio com a pressão atmosférica, utilizando o software PermeAr v.1.0 (SILVEIRA *et al.*, 2011). O coeficiente de permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ) foi determinado a partir da equação

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (3)$$

sendo  $K_{ar}$  o coeficiente de permeabilidade ao ar ( $\text{m}^2$ ),  $V$  o volume de ar que passa pelo cilindro ( $\text{m}^3$ ),  $\eta$  a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s),  $L$  a altura do anel volumétrico (m),  $A$  a secção transversal da amostra de solo ( $\text{m}^2$ ),  $P_{atm}$  a pressão atmosférica local (Pa) e  $S$  o coeficiente angular da regressão linear da pressão ( $\ln$  da pressão) em função do tempo.

### 3.3.8 Índice de continuidade de poros

Neste procedimento, os valores obtidos da permeabilidade intrínseca do solo ao ar foram relacionados aos valores de porosidade de aeração ( $\varepsilon_{ar}$ ) por meio da equação Kozeny-Carman, de um modo análogo ao de AHUJA *et al.* (1984),

$$K_{ar} = M\varepsilon_{ar}^N, \quad (4)$$

em que  $M$  (intercepto) e  $N$  (inclinação) são constantes empíricas. O expoente  $N$ , segundo os autores, é considerado como um índice de continuidade de poros, uma vez que  $N$  reflete o aumento de  $K_{ar}$  com incremento de  $\varepsilon_{ar}$  (porosidade de aeração) ou um decréscimo na tortuosidade de poros, e incremento de área superficial com o acréscimo na fração de poros disponíveis para o fluxo de ar. A porosidade de aeração  $\varepsilon_{ar}$  foi calculada pela diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água em cada potencial mátrico estabelecido. A equação (4), ajustada para forma logarítmica, resulta em

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}. \quad (5)$$

A partir da regressão linear da relação de  $\log \varepsilon_{ar}$  versus  $\log K_{ar}$ , os valores de  $M$  e  $N$  foram, então, estimados. O intercepto da reta linear com a abscissa no gráfico que relaciona a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração no eixo  $\log \varepsilon_{ar}$  pode ser utilizado como medida da porosidade obstruída,  $\varepsilon_b$ , que corresponde ao valor de  $\varepsilon_{ar}$  abaixo da qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração. Partindo da equação (5),  $\varepsilon_b$  é expressa como sendo

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N}. \quad (6)$$

O índice de continuidade de poros ( $K_1$ ), sugerido por Groenevelt, Kay e Grant, (1984) também foi avaliado. Este índice foi determinado a partir da razão entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e a porosidade de aeração, isto é,

$$K_1 = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}}. \quad (7)$$

### 3.3.9 Curva característica de retenção de água no solo

Determinada nas amostras com estrutura preservada. No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo; para os pontos de baixa tensões (0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa) o funil de Haines foi utilizado para estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo; para os demais pontos (33,

100, 300, 700 e 1500 kPa), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). Obtidos os valores de umidade do solo em todos os pontos de tensão, efetuou-se o ajuste dos dados ao modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), a partir da equação

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (8)$$

em que  $\theta$  corresponde ao conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\phi_m$  o potencial mátrico da água no solo (kPa),  $\alpha$  um escalonador do  $\phi_m$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva. Os dados foram ajustados utilizando o programa Soil Water Retention Curve – SWRC, versão 3.0 Beta (DOURADO NETO *et al.*, 2001), sendo as variáveis  $\theta_s$  e  $\theta_r$  fixadas com valores, respectivamente, de conteúdo de água no solo correspondente à saturação e tensão de 1500 kPa, ambos mensurados em laboratório. O ajuste dos parâmetros  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  seguiu o método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro  $m$  com o  $n$ .

A partir da curva característica de água no solo foi calculado o comprimento médio dos poros, equação 9,

$$CMP = \frac{V_{ss}}{A_p}, \quad (9)$$

em que  $CMP$  é o comprimento médio de poros, mm;  $V_{ss}$  é o volume da solução do solo ( $\text{mm}^3$ ) coletado entre dois sucessivos potenciais mátricos (kPa); e  $A_p$  é a área média do poro,  $\text{mm}^2$  ( $\pi \cdot r_m^2$ , sendo  $r_m$  o raio médio do poro (mm) para o intervalo entre os dois sucessivos potenciais mátricos).

### 3.3.10 Resistência do solo à penetração

Determinada em amostras com estrutura preservada, com teor de água correspondente ao potencial mátrico de -10 kPa (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Para tanto, foi utilizado um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e ângulo de 60° e área de 12,566  $\text{mm}^2$ , com velocidade de penetração de 1  $\text{cm min}^{-1}$ , registro de uma leitura por segundo, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados por software próprio do equipamento, conforme descrito por Tormena, Silva e Libardi (1998a). O procedimento compreendeu três repetições por amostra, sendo 180 leituras por repetições, totalizando 540

leituras em cada amostra (é importante ressaltar que o primeiro e o último centímetro da amostra de solo foram desconsiderados). A resistência à penetração foi representada pela média das 540 leituras.

### **3.4 Análise dos dados**

Os dados para cada perfil de solo foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 2 (horizontes: Bt coeso e Bt não coeso; duas disposições de coleta das amostras em cada horizonte: horizontal e vertical, com sete repetições). Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade, ao teste F para a análise de variância e ao teste de Tukey para a comparação de médias, todos a 5% de probabilidade, utilizando o software XLSTAT, versão gratuita (XLSTAT, 2014).

### **3.5 Análises micromorfológicas dos horizontes coesos e não coesos**

#### ***3.5.1 Procedimento e preparo das amostras***

Foram coletadas quatro amostras de solo, sendo duas no horizonte Bt coeso e duas no Bt não coeso de cada solo estudado. Foi esculpido no solo um bloco para coleta em caixa de papel cartão nas dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,04 m. Após a coleta, cada bloco foi envolto em filme plástico para manter a integridade da estrutura.

As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Microscopia do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Procedeu-se a secagem em temperatura ambiente e depois em estufa a 40° C, durante 30 dias, para a retirada de toda água livre. Decorrido esse tempo, efetuou-se a impregnação utilizando a resina Cristal 1.0 # 08 e monômero de estireno na mesma proporção, juntamente com o pigmento fluorescente Uvitex OB (Giba-Geigy®) e o catalisador Butanox M-50, todos bem misturados e colocados em recipiente plástico mantendo a amostra de solo submersa e endurecida. Assim, ficaram até dois meses para a evaporação do monômero e secagem da resina. Após o endurecimento, as amostras foram cortadas com serra adiamantada, em seguida, lixadas e polidas com pó de carborundum de granulometria variada.

### 3.5.2 Porosidade do solo pelo método de análise de imagens

Os blocos foram analisados para a aquisição das imagens 2-D, estas obtidas por uma câmera digital em cores (Sony®, modelo DFWX700), em sistema “charged couple device” (CCD), conectada a uma lupa com polarizador (Zeiss®). A partir das imagens (fotomicrografias) aleatórias de 12 mm x 15 mm, foram definidas a porosidade total, a classe e tamanho dos poros.

A identificação dos poros foi obtida por imagens processadas pelo software Noesis® Visilog 5.4. A partir delas, o tamanho dos poros e sua distribuição foram determinados conforme o critério sugerido por Stoops (2003). A quantificação da porosidade se deu considerando poros com diâmetro entre 20 µm e >1000 µm.

A porosidade total foi calculada considerando a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total da imagem, em porcentagem. A classificação e a quantidade dos poros foram determinadas seguindo os critérios definidos por Cooper e Vidal-Torrado (2005). Os poros foram divididos em três grupos, de acordo com sua forma: arredondados, alongados e complexos. Para isso, foram calculados dois índices conforme sugestão de Juhász (2006) e Souza *et al.* (2006). O índice de forma (Tabela 1) foi obtido pelas equações 10 e 11, em que o  $I_1$  separa os poros arredondados dos poros alongados e o  $I_2$  entre alongados e complexos.

$$I_1 = \frac{P^2}{4\pi A}, \quad (10)$$

em que  $P$  é o perímetro do poro e  $A$  é sua área;

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (DF) j}, \quad (11)$$

em que  $m$  é o número de  $i$  direções e  $n$  é o número de  $j$  direções nas quais é calculado o  $N_i$ , que é o número de interceptos de um objeto na direção  $i$  ( $i = 0, 45, 90$  e  $135^\circ$ );  $DF$  é o diâmetro de Féret de um objeto na direção  $j$  ( $j = 0$  e  $90^\circ$ ). O índice  $I_2$  é utilizado como complemento ao índice  $I_1$  para obter melhor precisão na separação entre os grupos de formas arredondadas, alongadas e complexas (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005; SOUZA *et al.*, 2006; TOMA, 2012).

Tabela 1 – Definição das classes de forma dos poros.

Forma de poros	Índice de Forma	
	$I_1$	$I_2$
Arredondados	$I_1 \leq 5$	---
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$I_1 > 5$	$> 2,2$

Fonte: Cooper e Vidal-Torrado (2005).

Para obter a quantidade de poros que estão orientados na horizontal e na vertical aplicou-se condição lógica no software Excel utilizando como dados de entrada os valores do Diâmetro de Féret ( $DF$ ) calculados pelo software Noesis® Visilog 5.4. Saliente-se que os ângulos para o  $DF$  variam entre 0 a 90°. Portanto, para obter a quantidade de poros nas posições horizontal e vertical foram considerados ângulos  $j$  entre 0 e 90°; em que ângulos  $> 45^\circ$  correspondem à posição vertical e ângulos  $\leq 45^\circ$  à posição horizontal.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Textura do solo, argila dispersa em água e grau de flocculação

Os resultados da análise granulométrica do solo e a classificação textural dos horizontes estudados estão apresentados na Tabela 2. Observou-se que a textura é franco-argiloarenosa para os horizontes coeso e não coeso do ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd) e franco arenosa para os horizontes coeso e não coeso do ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso abrupto (PAex).

Tabela 2 – Granulometria nos horizontes com e sem caráter coeso do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAd) e Argissolo Amarelo (PAex).

<b>Horizontes</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	<b>Argila natural</b>	<b>GF</b>	<b>Classe Textural</b>
	..... g kg <sup>-1</sup> .....				%	
<b>PVAd</b>						
<b>Coeso</b>	656	91	253	6	98	Franco-argiloarenoso
<b>Não Coeso</b>	683	87	230	2	99	Franco-argiloarenoso
<b>PAex</b>						
<b>Coeso</b>	743	61	196	6	97	Franco arenoso
<b>Não Coeso</b>	757	58	185	5	97	Franco arenoso

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observou-se nos dois solos a dominância da fração areia (Tabela 2), apesar de esses horizontes serem de subsuperfície. Solos em áreas de Tabuleiros Costeiros tendem a ser arenosos e com granulometria heterogênea (DANTAS *et al.* 2014), predominando o mineral caulinita na fração argila (LIMA NETO *et al.*, 2009) e quartzo (RESENDE, 2000) na fração areia. Segundo Lima (2004), os solos de Tabuleiros Costeiros são mais arenosos no Ceará, corroborando as classes texturais encontradas para os solos desta pesquisa e as registradas por Vieira *et al.* (2012) em Argissolos com caráter coeso no Ceará.

Quanto à argila dispersa em água, ou argila natural, notou-se que os valores são menores em relação aos horizontes superficiais, pelo fato das amostras de solos com e sem caráter coeso serem dos horizontes Bt, ou seja, horizontes com maior agregação das partículas em relação aos horizontes superficiais. Outro fator está relacionado com a presença de agentes cimentantes, como óxidos de ferro e de alumínio, os quais colaboram com agregação das partículas sólidas, diminuindo a dispersão das argilas.

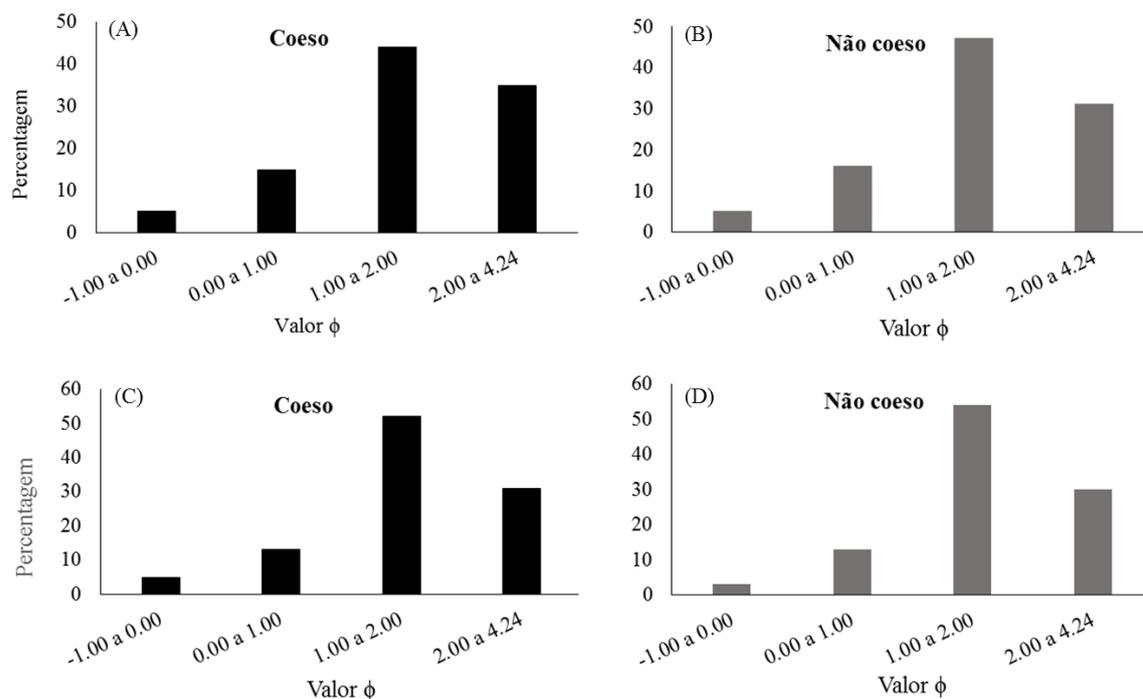
A flocculação mais expressiva ocorre nos horizontes B (MOREAU *et al.* 2006).

Por isso, o grau de flocculação das argilas nos horizontes com e sem caráter coeso é próximo a 100% (Tabela 2). Os resultados são semelhantes aos encontrados por aqueles autores em estudo com Argissolos Amarelos na Bahia. Isso significa maior capacidade de agregação desses horizontes, o que implica no tamanho dos poros do solo (microporos), sobretudo, na funcionalidade dos mesmos. Esse grau de flocculação se deve ao fato da atração eletrostática entre as cargas negativas e positivas das argilas, neste caso, a caulinita, bem como a presença de óxidos no horizonte B textural dos perfis estudados.

A partir do Gráfico 1, observou-se que tanto os coesos quanto os não coesos apresentam tamanho das partículas diferentes, nos dois solos estudados, fato que corrobora a heterogeneidade da fração granulométrica dos horizontes (Tabela 2). Constatou-se ainda a dominância da fração areia de tamanho médio ( $\phi = 1.00$  a  $2.00$ ), em seguida variando de finos a muito finos ( $\phi = 2.00$  a  $4.24$ ). Conforme Folke e Ward (1957), a interpretação que se dá, de modo geral, as areias nos horizontes (coesos e não coesos) para às duas classes de solos, são moderadamente selecionadas e aproximadamente simétricas. Tal fato facilita o empacotamento fechado dos poros, isto é, um arranjo das partículas com menor espaço poroso, incrementado pela ocorrência do adensamento natural em horizontes com caráter coeso.

Com relação ao grau de seleção e homogeneidade da fração areia, em se tratando de gênese dos coesos, alguns autores como Resende *et al.* (1992) e Bezerra *et al.* (2014) sugerem que o pobre grau de seleção da fração areia pode contribuir para com o fenômeno da coesão, uma vez que a heterogeneidade no tamanho dos constituintes dessa fração resulta em arranjo das partículas com empacotamento mais adensado. Além disso, as argilas translocadas, por menor quantidade que seja, são o suficiente para ocasionar a obstrução e/ou redução do espaço poroso, como resultado da estrutura maciça no horizonte coeso. Deste modo, as partículas menores preenchem os espaços porosos entre as maiores, de modo a contribuir com o adensamento natural.

Gráfico 1 – Distribuição das areias por tamanho nos horizontes com e sem caráter coeso do PVAd (A e B) e do PAex (C e D), respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Densidade do solo e de partículas

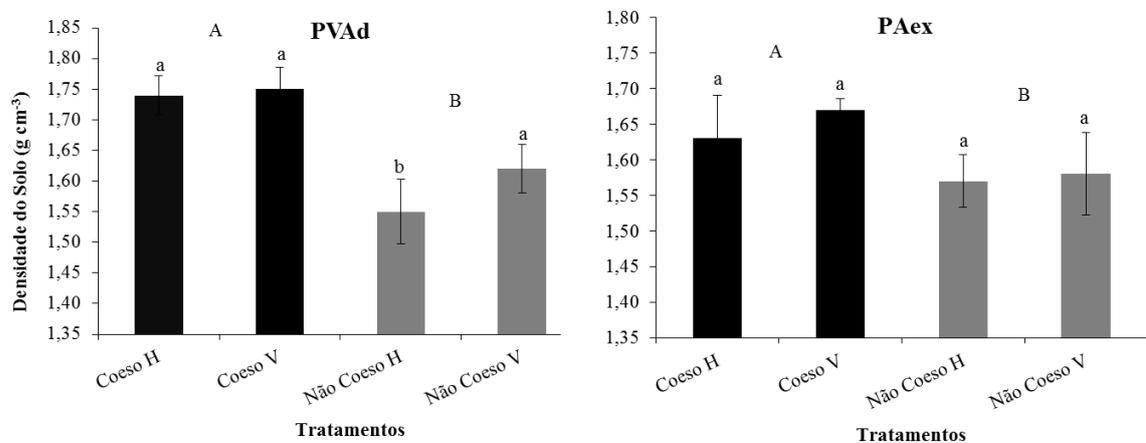
O Gráfico 2 contém os resultados da densidade do solo obtida nos horizontes com e sem caráter coeso considerando as duas posições de coleta – horizontal e vertical. Observou-se que a densidade do solo nos horizontes coesos é superior àquela nos horizontes não coesos tanto no PVAd quanto no PAex. Resultados similares foram registrados por Fonseca *et al.* (2007) em solo de Tabuleiro Costeiro com horizonte coeso em Sergipe. Para Lima Neto *et al.* (2010), horizontes que exibem o caráter coeso apresentam elevada densidade do solo e porosidade total reduzida em relação aos horizontes não coesos. Os resultados confirmam essa assertiva, inclusive corroborando os dados encontrados por Vieira *et al.* (2012) em Argissolos de Tabuleiros Costeiros no estado do Ceará, bem como os de Moreau *et al.* (2006) em Argissolos Amarelos na Bahia.

Quanto aos horizontes coesos em suas respectivas posições de coleta, notou-se que em ambos os solos a densidade do solo é elevada e não difere estatisticamente para ambas as posições de coleta. A densidade elevada nos horizontes subsuperficiais nestas classes de solo em Tabuleiros Costeiros é um reflexo da estrutura maciça (baixa agregação) em virtude da dispersão das argilas nos horizontes superficiais, fato que implica na baixa permeabilidade

ao ar e à água dos horizontes de subsuperfície. Considerando que se trata de horizontes Bt coesos e com baixa dispersão das argilas nesses horizontes associado à elevada floculação, bem como a presença de agentes cimentantes (argila e óxidos de ferro) que envolvem os microagregados neste horizonte, mas por ser coeso, este, quando úmido, se dispersa, tornando-se maciço, promovendo a obstrução dos poros e o rearranjo das partículas, conseqüentemente, complementando a coesão à medida que diminui a umidade do solo, daí a não diferença nas posições de coleta.

Ressalte-se que a densidade crítica ao crescimento de plantas varia entre as classes texturais do solo. Nesse caso, Reichert *et al.* (2003) consideram valores de densidade do solo crítica para a classe textural franco-argilosa na faixa de 1,40 a 1,50 Mg m<sup>-3</sup> e para franco arenosa na faixa de 1,70 a 1,80 Mg m<sup>-3</sup>. Deste modo, considerando as classes texturais típicas de solos de Tabuleiros Costeiros com caráter coeso como os Argissolos em estudo (PVAd e PAex), os valores de densidade do solo nos horizontes coesos encontram-se dentro da faixa supracitada, podendo limitar o crescimento das raízes de espécies vegetais menos agressivas em romper camadas adensadas ou compactadas. Para Araújo Filho *et al.* (2001), a densidade do solo em camadas coesas está na faixa de 1,5 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, o que foi confirmado nesta pesquisa.

Gráfico 2 – Médias e desvio-padrão dos valores de densidade do solo nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostras nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

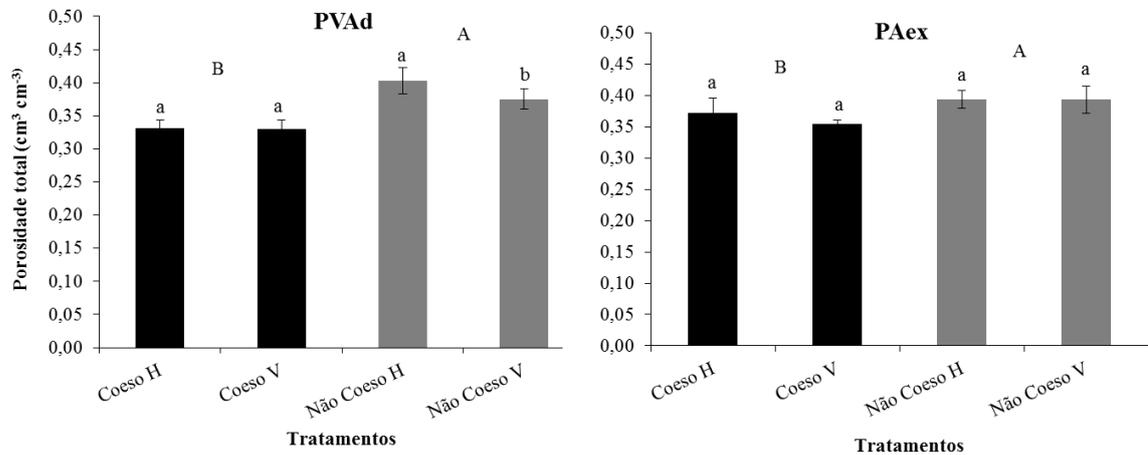
A densidade de partículas é um atributo pouco alterável no tempo. Seus valores dependem necessariamente da composição mineralógica do solo. Nesta pesquisa, a densidade das partículas tanto nos horizontes coesos quanto nos não coesos de ambos os solos foi de  $2,60 \text{ g cm}^{-3}$ . Paiva *et al.* (2000) encontraram nos horizontes Bt1 (coeso) e Bt2 (não coeso) de Argissolo Amarelo em Tabuleiro Costeiro na Bahia valores de 2,41 e  $2,38 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente. A discrepância se deve ao fato dos maiores teores de argila nos solos da Bahia, em contraste aos menores teores encontrados nos Argissolos de Tabuleiros Costeiros do Ceará.

### 4.3 Porosidade do solo

Observou-se que os horizontes coesos apresentam menor volume de poros que os horizontes não coesos nos dois solos estudados (Gráfico 3). Este resultado está associado ao arranjo e distribuição das partículas que, com a contribuição do acúmulo de argila no horizonte coeso, definem o adensamento e, conseqüentemente, elevada densidade do solo e diminuição de sua porosidade total. Conforme Lima Neto *et al.* (2010), o caráter coeso proporciona um aumento da densidade do solo e diminui a porosidade total em relação aos horizontes adjacentes, corroborando os resultados da presente pesquisa.

Resultados semelhantes de porosidade total foram registrados por Lima *et al.* (2005) em horizontes coesos. Lima Neto *et al.* (2010) associaram a redução dos poros nos horizontes coesos por iluviação de argila, fato que contribui para a gênese da estrutura maciça nos horizontes com caráter coeso nos solos estudados nesta pesquisa. Considerando que na estrutura maciça há contato maior entre as partículas, o arranjo concorre para a diminuição do volume de poros nesses horizontes.

Gráfico 3 – Médias e desvio-padrão dos valores de porosidade total nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda com relação ao Gráfico 3, verificou-se que o coeso horizontal e coeso vertical para os dois solos, não apresentaram diferença estatística. Isto significa que independente da posição de coleta, o arranjo poroso é o mesmo para esses horizontes, uma vez que a densidade, que reflete o arranjo de partículas do solo (FERREIRA, 2010), também não variou para os mesmos horizontes nas suas respectivas posições de coleta.

De forma geral, os horizontes com caráter coeso apresentam volume de poros inferior a  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , esse baixo valor de porosidade total é característico dos horizontes coesos em Argissolos. Vários autores (GIAROLA *et al.*, 2003; LIMA *et al.*, 2006; SANTANA *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2008; DANTAS *et al.*, 2014) têm relatado valores de porosidade total abaixo de  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Esta redução da porosidade em relação ao horizonte não coeso reflete na diminuição da permeabilidade ao ar, na diminuição do conteúdo volumétrico de água no solo e, sobretudo, prejudicando a funcionalidade da rede porosa.

#### 4.3.1 Macroporosidade

Os horizontes com caráter coeso no PVAd e PAex apresentam menor volume de macroporos do que horizontes sem caráter coeso (Gráfico 4). De acordo com Libardi (2005), os macroporos têm como função promover a aeração da matriz do solo e conduzir água

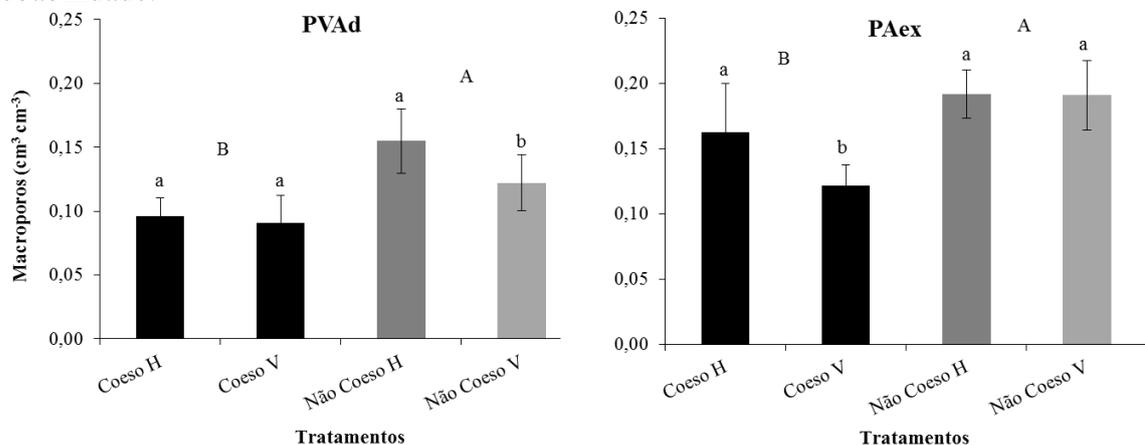
durante a infiltração. Evidentemente, os macroporos são um dos atributos importantes para verificar a coesão e a funcionalidade da rede porosa de horizontes com esse caráter.

Os resultados de macroporos se assemelham aos encontrados por Lima *et al.* (2005) e Dantas *et al.* (2014). Esses autores encontraram menor macroporosidade em Argissolos com caráter coeso, o que justifica o adensamento ocasionado pela coesão das partículas sólidas promovendo a compressão da rede porosa e modificando seu diâmetro.

Quanto aos horizontes em suas respectivas posições de coleta, notou-se que o volume de macroporos é significativamente maior no coeso horizontal em relação ao coeso vertical no PAex, favorecendo lateralmente o fluxo de gases e da solução do solo, visto que os macroporos são condutores de ar e de água (PREVELLO *et al.* 2013), além de permitirem o crescimento de raízes. Já no PVAd, não houve diferença entre coeso horizontal e coeso vertical.

Esses comportamentos observados são um reflexo das alterações no arranjo das partículas do solo, provocado pelo adensamento natural nos coesos. Segundo Prevedello *et al.* (2013) se as partículas se arranjam em contato íntimo, resultam na diminuição do espaço poroso, como pode ser observado no coeso vertical do PAex. Deste modo, prejudica alguns atributos físicos do solo tais como permeabilidade ao ar e resistência à penetração, os quais serão apresentados adiante. Segundo Cintra *et al.* (2000), a redução da macroporosidade promove a redução no movimento de água e ar, conseqüentemente, afetando a distribuição das raízes no solo.

Gráfico 4 – Médias e desvio-padrão dos valores de macroporosidade nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para Taylor e Aschcroft (1972), a macroporosidade deve ser mais de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , deste modo, viabilizando o processo das trocas gasosas e sem impedir o desenvolvimento de raízes da maioria das plantas cultivadas. No presente estudo, apesar do horizonte coeso do PVAd, apresentar baixo volume de macroporos ( $< 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), não houve impedimento total da área disponível ao fluxo de ar, conforme valores observados na permeabilidade ao ar, ou seja, mesmo com poucos macroporos, a boa conectividade desses poros permite que sejam funcionais sem impedir a infiltração da água e o fluxo de ar no solo, mas, com baixa eficiência para o funcionamento do solo em relação aos horizontes não coesos.

Contudo, a redução da macroporosidade e o aumento da microporosidade refletem diretamente na aeração do solo (trocas gasosas) e na retenção de água no solo. No caso dos coesos, reduz a aeração do solo e aumenta a retenção de água no sistema, sendo que o ideal seria uma condição de equilíbrio entre macro e microporos sem comprometer a funcionalidade da rede porosa. Trabalhos realizados por Paiva *et al.* (2000), Giarola *et al.* (2003), Lima *et al.* (2005), Lima *et al.* (2006) e Corrêa *et al.* (2008) demonstram a redução dos macroporos e aumento de microporos, comparado com horizontes sem o caráter coeso.

#### **4.3.2 Microporosidade**

No Gráfico 5, observou-se que o volume de microporos no coeso vertical do PAex é significativamente maior comparado ao coeso horizontal. Isso se deve ao movimento descendente das partículas finas; estas ao se arranjam entre si promovem alterações no diâmetro dos poros, resultando em nova distribuição dos poros por tamanho e, por fim, diminuem o volume de macroporos e, conseqüentemente, contribuindo para o adensamento do horizonte. Conforme Corrêa *et al.* (2008), tal fato está associado à migração de partículas finas de argila dispersa em água. De acordo com Giarola e Silva (2002), o adensamento é oriundo do acúmulo de materiais finos e do arranjo das partículas, aumentando a microporosidade. Por isso que entre o não coeso horizontal e não coeso vertical do PAex, a microporosidade não difere entre si, mantendo o mesmo arranjo poroso.

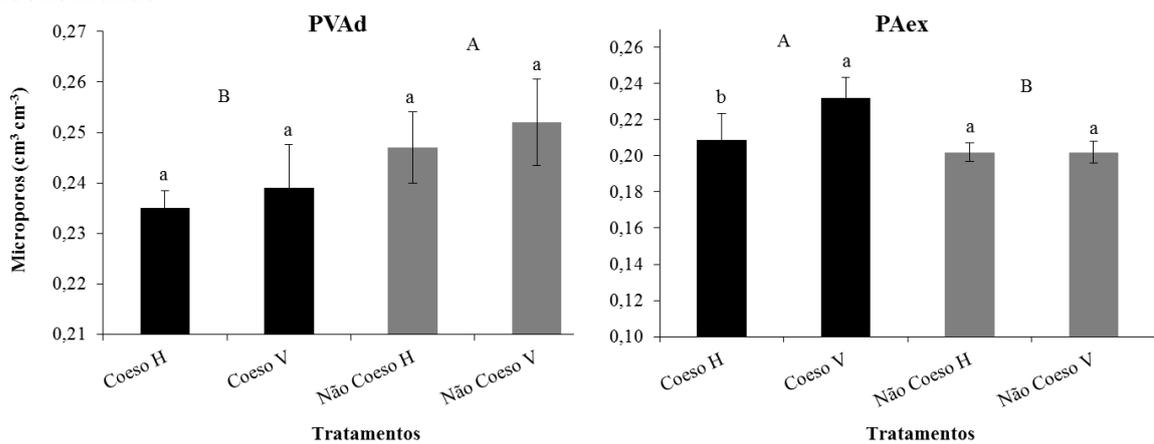
O conteúdo de argila tem uma forte contribuição para a ocorrência da coesão. Portanto, tendo em vista que os horizontes estudados no PVAd são de textura franco-argiloarenosa, observou-se que para o horizonte coeso houve maior adensamento, proporcionando o mesmo arranjo poroso para a vertical e horizontal do perfil. Ainda com relação aos horizontes naquele solo, notou-se que o volume de microporos para o coeso é

significativamente menor quando comparado ao não coeso. FERREIRA *et al.* (1999), sugerem que esse comportamento é resultado do ajuste face a face das argilas responsáveis pela obstrução do espaço poroso, refletindo no aumento da densidade do solo.

Deste modo, pode-se inferir que o adensamento natural promove o empacotamento dos poros, modificando sua morfologia e a distribuição dos poros por tamanho, evidentemente diminuindo o volume de macroporos e aumentando o de microporos, fato característico dos solos com horizontes coesos, corroborando os resultados encontrados por Lima *et al.* (2005). Assim, aumenta a densidade do solo e resistência à penetração, conseqüentemente, compromete as trocas gasosas nos horizontes, bem como o desenvolvimento das raízes, haja vista a permeabilidade ao ar e continuidade de poros terem sido significativamente menores quando comparadas às mesmas variáveis nos horizontes sem caráter coeso.

Vale ressaltar que a microporosidade não é atributo sensível para inferir que há uma quantidade de poros pequenos orientados na horizontal dos perfis, haja vista os resultados de microporos observados para os horizontes coesos nos solos estudados, portanto, a hipótese aventada para essa pesquisa é parcialmente refutada.

Gráfico 5 – Médias e desvio-padrão dos valores de microporosidade nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

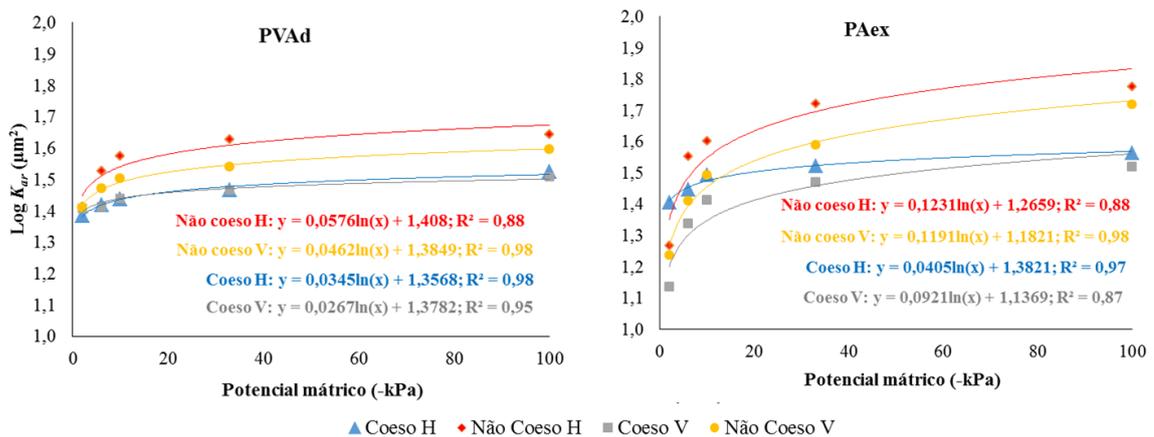
#### 4.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

O Gráfico 6 contém informações da permeabilidade intrínseca do solo ao ar nos horizontes coesos e não coesos no PVAd e no PAex para os potenciais mátricos variando de -2 a -100 kPa. Observou-se que nesta faixa de potencial mátrico, os valores de  $K_{ar}$  são superiores a  $1,0 \mu\text{m}^2$ . Para McQueen e Shepherd (2002), esse valor é um indicativo de que poros responsáveis pela aeração do solo não estão bloqueados e, portanto, contribuem para o processo das trocas gasosas e de calor no solo.

Com base nos valores de  $K_{ar}$  apresentados no Gráfico 6, observou-se que nos horizontes coesos dos solos estudados é possível a aeração das raízes, embora apresentem macroporosidade reduzida e menor área disponível ao fluxo de ar ( $K_{ar}$ ) em relação aos horizontes não coesos. Ou seja, os solos com caráter coeso mesmo que apresentem adensamento da estrutura, apenas reduzem a eficiência da porosidade funcional.

Considerando que  $\text{Log } K_{ar} > 1 \mu\text{m}^2$  em -10 kPa, e que este potencial mátrico é conceituado como o correspondente à capacidade de campo (SILVA *et al.*, 1994), é possível afirmar que os horizontes coesos também permitem o funcionamento da rede porosa, pois mesmo com baixo volume de poros, admite a transmissão de água e ar.

Gráfico 6 – Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) e os potenciais mátricos aplicados ( $\phi_m$ ) nas amostras de solo de horizontes com e sem caráter coeso coletadas nas posições horizontal (H) e vertical (V) no PVAd e PAex.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda no Gráfico 6, observou-se correlação positiva de  $K_{ar}$  com os potenciais aplicados nos horizontes com e sem caráter coeso, com ajuste dos dados ao modelo logarítmico em ambos os solos. Tal ajuste explica melhor o comportamento da  $K_{ar}$ , uma vez

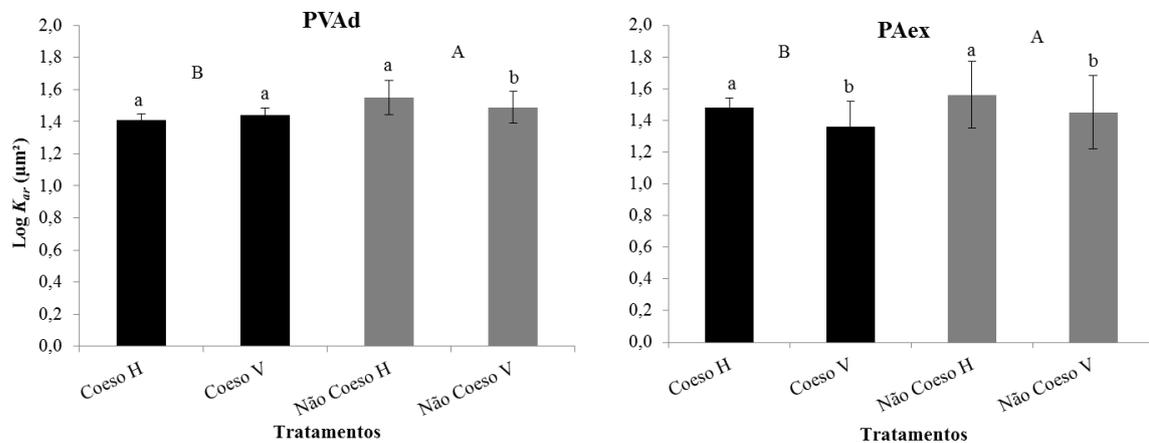
que esta aumenta de forma mais expressiva nos potenciais mátricos maiores, notadamente entre -2 a -6 kPa (o potencial de -6 kPa é considerado o limite entre macroporos e microporos). Assim posto, após a drenagem da água nos macroporos a  $K_{ar}$  apresenta menor taxa de variação, ou seja, a partir do potencial mátrico de -6 kPa não ocorre um aumento expressivo da área disponível ao fluxo de ar.

O que se observou na faixa de potencial de -2 a -100 kPa foi um aumento gradativo da  $K_{ar}$  em ambos os solos, notadamente nos horizontes não coesos em suas respectivas posições de coleta nos perfis. Tudo isso se deve à diminuição do potencial da água no solo, ou seja, à medida que diminui o teor de água no solo manifesta-se o fluxo de ar, o qual depende principalmente da qualidade estrutural do solo. Segundo Ball e Schjønning (2002), a  $K_{ar}$  tem relação inversa com o conteúdo de água, em que o valor máximo de permeabilidade é atingido em solo seco, diminuindo na medida em que aumenta o teor de água no solo, tendendo a zero em solo saturado.

Conforme Gráfico 7, a análise estatística revelou que os coesos, tanto no PVAd quanto no PAex, apresentam menor área disponível ao fluxo de ar comparado aos horizontes não coesos. Notou-se ainda que o coeso vertical do PAex tem menor área disponível ao fluxo de ar, comparado ao coeso horizontal deste solo. Isso se deve ao adensamento natural nos coesos, que reflete na redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas com o ar atmosférico (BAVOSO, 2012).

Quanto ao PVAd, o coeso horizontal e o coeso vertical não diferem entre si, ou seja, as posições de coleta das amostras não influenciaram estatisticamente na  $K_{ar}$ , para este horizonte mais adensado. Tal fato é em decorrência do arranjo poroso entre as partículas que por sua vez, determina a distribuição do diâmetro dos poros, uma vez que a  $K_{ar}$  é influenciada tanto pela distribuição e geometria quanto pela tortuosidade e conectividade dos poros do solo (DORNER e HORN, 2009), ratificando o comportamento do volume de macroporos e da densidade. Desse modo, vale ressaltar a sensibilidade da  $K_{ar}$  às alterações da densidade do solo e da macroporosidade.

Gráfico 7 – Médias e desvio-padrão dos valores de permeabilidade intrínseca do solo ao ar nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex, sob os potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Índice de continuidade de poros

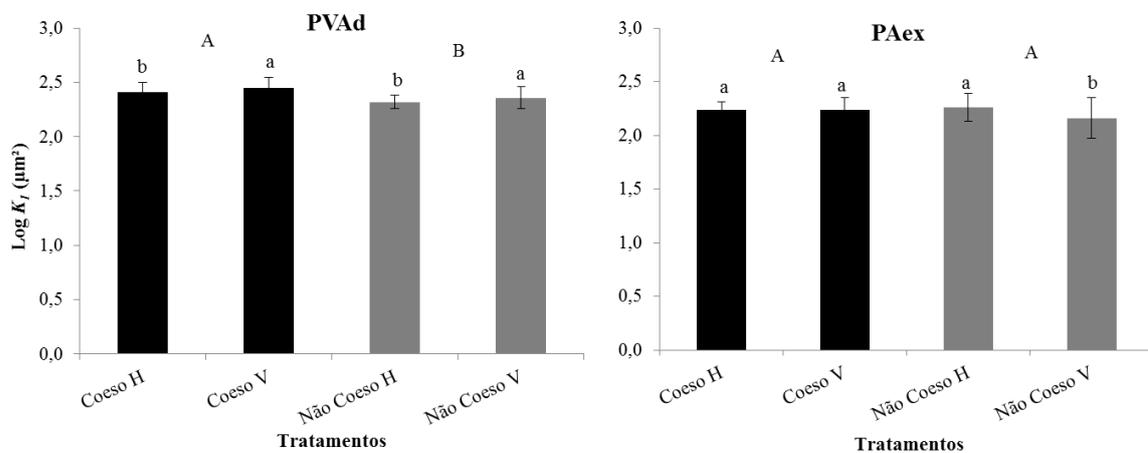
O índice de continuidade de poros ( $K_I$ ) referente aos horizontes coesos e não coesos do PVAd e PAex está apresentado no Gráfico 8. Observou-se que os valores de  $K_I$ , comparando horizontes coesos e não coesos, diferem estatisticamente, exceto para o PAex, sendo os poros mais contínuos para o horizonte coeso no PVAd. Esse comportamento se deve à forma em que as partículas estão arranjadas, influenciadas pela estrutura e pela textura do horizonte.

Verificou-se que houve diferença estatística entre o não coeso horizontal e não coeso vertical do PAex, sendo a continuidade de poros maior para o não coeso horizontal. Para o PVAd, o coeso horizontal e coeso vertical desse solo, existe diferença para o índice  $K_I$ , sendo mais contínuo para o coeso vertical. Com base nos resultados estatístico apresentados no Gráfico 8, é possível inferir que a razão  $K_{ar}/\varepsilon_{ar}$  não foi sensível para distinguir as alterações do adensamento no arranjo da porosidade, distribuição do tamanho e continuidade de poros entre os horizontes coesos e não coeso coletados em diferentes posições, em virtude da não consonância apresentada a nos solos estudados, no tocante ao volume de macroporos.

Deste modo, os dados de  $K_I$  apresentam divergência com os dados de macroporosidade, sendo que os resultados obtidos para a macroporosidade do PVAd (Gráfico 4), em que o não coeso na posição horizontal apresentou uma maior quantidade de macroporos quando comparado com a vertical, mas com base no índice  $K_I$ , é possível afirmar

que os poros verticalmente não apresentam boa continuidade, impossibilitando melhores trocas gasosas entre o solo e atmosfera. De acordo com Hillel (1980), para que a aeração da matriz do solo seja eficiente, é necessária boa quantidade, tamanho e continuidade dos poros e, sobretudo, serem funcionais.

Gráfico 8 – Médias e desvio-padrão dos valores referentes ao índice de continuidade de poros nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex, sob os potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

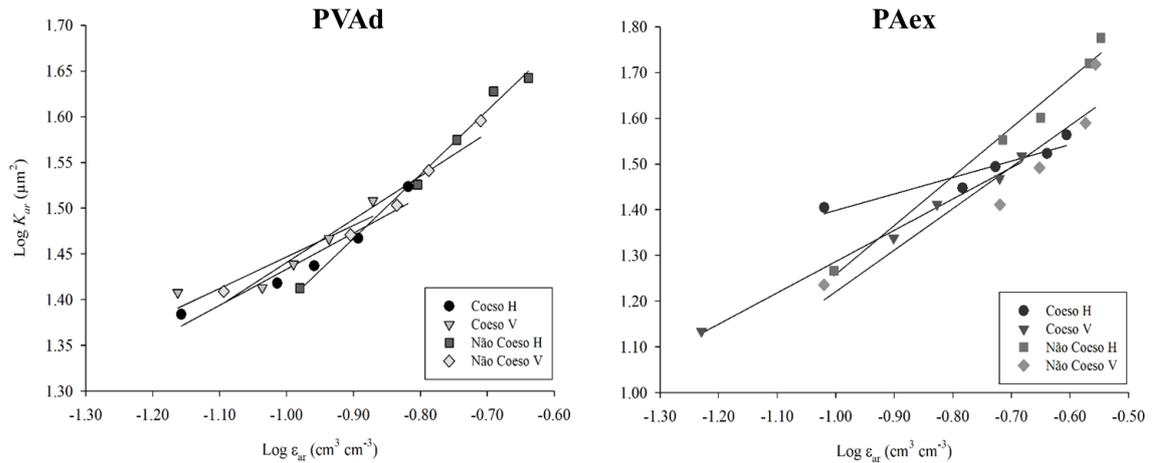
O Gráfico 9 representa o comportamento da permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) em função da porosidade de aeração ( $\varepsilon_{ar}$ ), no qual se observa correlação positiva e indicando ajuste linear. Assim, houve um aumento do  $\text{Log } K_{ar}$  à medida que aumentou o  $\text{Log } \varepsilon_{ar}$  nos coesos horizontais e coesos verticais, bem como para os horizontes não coesos horizontal e vertical.

Observou-se que nos potenciais maiores, -2 a -6 kPa, os coesos H e V e o não coeso V do PVAd apresentam porosidade de aeração ( $\varepsilon_{ar}$ ) crítica ao desenvolvimento das plantas (SILVA *et al.* 1994), sendo a  $\varepsilon_{ar} = 0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ou  $\text{Log } \varepsilon_{ar} = -1,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Contudo, segundo Jong van Lier (2001), isso é apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende da profundidade e do sistema radicular, bem como da temperatura do solo e tortuosidade do espaço poroso.

Portanto, nesta pesquisa, mesmo para aquela  $\varepsilon_{ar}$  crítica houve área disponível ao fluxo de ar ( $K_{ar}$ ), conforme Gráfico 6, ou seja, apesar de a estrutura dos horizontes estudados ter sido alterada em decorrência do caráter coeso, a porosidade dos horizontes coesos é

funcional, porém, de baixa eficiência em relação aos horizontes sem caráter coeso. Nos horizontes coesos e não coesos em suas respectivas posições de coleta, o bloqueio dos poros se dá em -2 kPa, ou seja, apenas próximo à saturação é que a porosidade não contribui para fluxo de ar no solo de maneira satisfatória.

Gráfico 9 – Relação linear entre  $\text{Log } K_{ar}$  e  $\text{Log } \varepsilon_{ar}$  das amostras de solo de horizontes com e sem caráter coeso, coletadas nas posições: horizontal (H) e vertical (V) do PVAd e PAex.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que o volume de macroporos nos coesos reduziu bastante. No entanto, de acordo com Ball *et al.* (1994) o tamanho e a continuidade dos poros são mais importantes do que a quantidade dos mesmos na determinação do fluxo de ar. Segundo Ferreira (2010), os macroporos são meramente responsáveis pela aeração do solo.

De acordo com a Tabela 3, a partir do parâmetro  $N$ , de forma geral, observou que os poros nos horizontes coesos são menos contínuos comparados aos horizontes sem caráter coeso, fato que justifica a obstrução dos poros por materiais finos, por exemplo, partículas de argila menor que  $0,2 \mu\text{m}$ , como relatou Corrêa *et al.* (2008), bem como pelo arranjo das partículas resultante do adensamento da estrutura. Essas partículas influenciam no aspecto morfológico do espaço poroso, na distribuição do tamanho, tortuosidade e continuidade dos poros.

Tabela 3 – Médias dos parâmetros da equação de regressão de  $\text{Log } K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$  e da porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ) para os horizontes com e sem caráter coeso coletados em duas posições: horizontal e vertical no PVAd e PAex.

Horizontes	Posição de coleta	Log M	N	r <sup>2</sup>	$\varepsilon_b$
		.....µm <sup>2</sup> .....			%
<b>PVAd</b>					
Coeso	Horizontal	1,828	0,395	0,92	3,75
	Vertical	1,790	0,343	0,83	4,72
Não coeso	Horizontal	2,097	0,701	0,99	1,13
	Vertical	1,913	0,472	0,95	2,58
<b>PAex</b>					
Coeso	Horizontal	1,758	0,360	0,89	4,83
	Vertical	1,972	0,685	0,99	1,55
Não coeso	Horizontal	2,328	1,069	0,98	0,43
	Vertical	2,128	0,907	0,87	0,82

Fonte: Elaborada pelo autor.

O parâmetro  $N$  confirma a melhor continuidade da rede porosa nos horizontes sem o caráter coeso, comprovando a elevada  $K_{ar}$  para aqueles horizontes apresentados no Gráfico 6. Segundo Streck (2007), isso é fundamental para a adequada troca de gases no solo com a atmosfera. No entanto, nos horizontes com caráter coeso, em decorrência do adensamento natural, essas trocas de gases são reduzidas.

Vale salientar que os resultados obtidos pelo parâmetro  $N$  diferiram dos obtidos pelo  $K_I$  ao comparar as posições de coleta, corroborando a afirmação de Rodrigues *et al.* (2011), que nem sempre a comparação dos índices  $K_I$  e  $N$  é concordante. A explicação para tal resultado é que para o índice  $K_I$  os valores são obtidos em cada potencial da água no solo; já para o parâmetro  $N$ , são obtidos numa faixa de potencial mátrico entre -2 a -100 kPa, isto é, com uma abrangência maior.

A ocorrência do adensamento natural promove o rearranjo do espaço poroso do solo e resulta em aumento tanto da densidade do solo quanto da resistência à penetração, além da diminuição do volume de macroporos, da área disponível ao fluxo de ar e, sobretudo, incremento da porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ), fato característico de horizontes coesos. Em relação à porosidade bloqueada (Tabela 3), observou-se uma maior porcentagem de poros bloqueados nos horizontes com caráter coeso, ou seja, poros não funcionais para a rede porosa. Isso justifica a baixa área disponível ao fluxo de ar nos horizontes coesos comparados aos não coesos. Vale destacar que poros bloqueados também afetam a distribuição de água ao longo do perfil e, conseqüentemente, o desenvolvimento radicular das espécies vegetais.

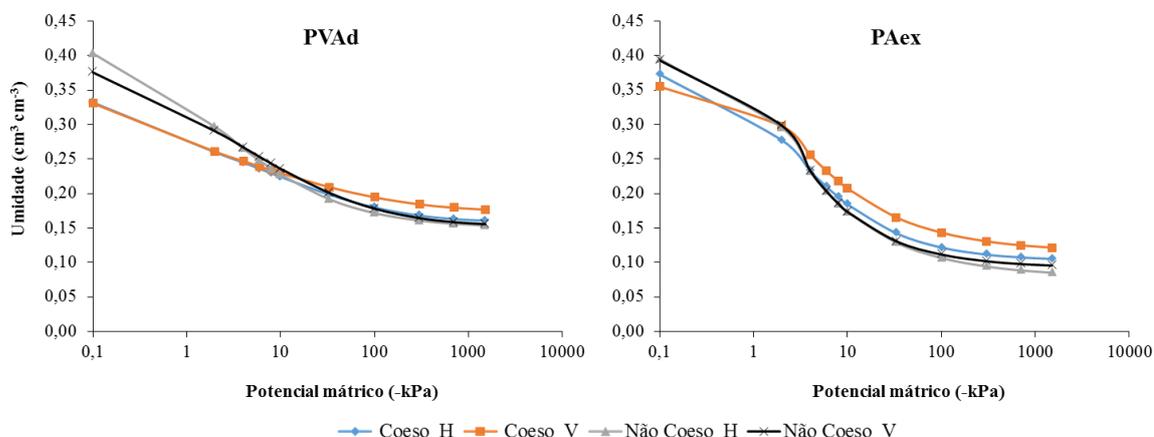
#### 4.6 Curva característica de água no solo

Pelo Gráfico 10, observa-se que os horizontes coesos retêm menos água do que horizontes sem caráter coeso na faixa de potencial mátrico variando de 0 a -8 kPa no PVAd; já no PAex ocorre na faixa de 0 a -2 kPa, embora haja semelhança na redução do conteúdo de água variando de 0 a -10 kPa, em virtude do predomínio da fração areia. Isso é porque o processo de drenagem progressiva da água na amostra inicia primeiramente nos poros de maior diâmetro e, em seguida, nos microporos (DEXTER, 2004). Outro fator está relacionado com o pequeno volume de poros, bem como a sua distribuição na amostra de solo prejudicada pelo adensamento nos horizontes coesos, por isso a suavização da curva no PVAd atribuída ao tamanho de poros.

Verificou-se que no coeso horizontal e coeso vertical do PVAd, o volume de água retido no solo é o mesmo, nos potenciais maiores (-2 a -10 kPa); entretanto, a partir de -33 kPa a -1500 kPa no coeso vertical a retenção de água é maior em relação ao coeso horizontal e ao não coeso nas posições horizontal e vertical. No PAex, a maior retenção de água ocorreu no coeso vertical em uma faixa de potencial mátrico entre -2 kPa a -1500 kPa. Tal fato está relacionado com o maior volume de microporos, observado no coeso horizontal e coeso vertical de ambos os solos, bem como o arranjo poroso e a força com que a água está retida nesses capilares.

Considerando que não houve diferença estatística na microporidade e no comprimento de poro entre o não coeso horizontal e o não coeso vertical do PAex, o teor de água é o mesmo entre os potenciais de -0 a -100 kPa, sendo que poros de maior comprimento e bem conectados facilitam a distribuição da água no espaço poroso. Portanto, vale ressaltar que o maior conteúdo de água nos coesos para os potenciais supracitados, comparado aos não coesos, também está associado ao menor comprimento dos poros. Conforme Tuller e Or (2003), a curva característica de retenção de água no solo é uma propriedade hidráulica que está relacionada ao tamanho e a conectividade dos poros, portanto, fortemente afetada pela textura do solo e estrutura, além de outros atributos.

Gráfico 10 – Curva característica de retenção de água no solo para os horizontes com e sem caráter coeso coletados em diferentes disposições no PVAd e PAex.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fato de o coeso vertical apresentar maior volume de água está associado ao adensamento, justificado pelos altos valores de densidade do solo e a baixa porosidade total. De acordo com Fonseca *et al.* (2007), o adensamento alternadamente no perfil do solo pode formar uma zona de acumulação de água e, assim, criar diferentes situações de disponibilidade de água para as plantas.

Portanto, como os horizontes não coesos apresentam maior volume de poros (com uma porção maior de macroporos) e menor densidade, facilitam a entrada e saída de fluídos no solo. Entretanto, à medida que diminui o potencial mátrico, há diminuição gradativa do conteúdo volumétrico de água, dando espaço para a água adsorvida, diminuindo sua disponibilidade para as plantas (LIMA *et al.*, 2004).

Considerando que a retenção da água no solo também é influenciada pela textura, e como os horizontes em estudo são de textura franco-argilorenosa e franco arenosa para o PVAd e PAex, respectivamente, deste modo, justificando a semelhança do conteúdo volumétrico de água retido nos horizontes com e sem caráter coeso. Portanto, a predominância de areia nos horizontes coesos e não coeso tem contribuído para tal fato, ou seja, distribuição da água ao longo dos horizontes. De acordo com Cintra *et al.* (2009) e Vieira *et al.* (2012), isso promove baixo armazenamento de água ao longo desses perfis, resultando em déficits hídricos para as plantas.

Tendo em vista que a distribuição de poros influencia na condução e retenção da água no solo, observou-se que os macroporos estão mais ausentes nos coesos em estudo, do 16,3% valor máximo obtido. É importante salientar que o predomínio de microporos pode ocasionar problemas de aeração das raízes, conforme Amaro Filho *et al.* (2008), e afetar a

disponibilidade de água às plantas, pelo fato da água contida em poros bastante pequenos está retida com maior força.

Considerando a umidade volumétrica dos horizontes com e sem caráter coeso próximo à capacidade de campo, conforme Silva *et al.* (1994) como sendo o potencial de -10 kPa, verificou-se que para o PVAd o volume é o mesmo, exceto para o não coeso vertical, sendo maior nesse. Já para o PAex, o maior volume de água retido foi nos horizontes com caráter coeso, tal fato revela que horizontes coesos quando ocorrem em profundidades superior e/ou igual ao do sistema radicular da espécie vegetal cultivada, pode funcionar como um reservatório de água disponível, assim, suprir as necessidades hídricas das plantas, bem como absorção de nutrientes, corroborando a assertiva de Fonseca *et al.* (2007).

Quanto aos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (Tabela 4), observou-se que no PVAd, os valores de  $\alpha$  para o coeso e não coeso apresentam-se distintos, do mesmo modo entre as posições de coleta, enquanto que no PAex, os valores de  $\alpha$  são mais semelhantes, com pequena variação apenas entre as posições de coleta em cada horizonte para esta classe de solo. Tal comportamento em ambos os solos está associado à estrutura e a textura nos horizontes estudados, bem como a dinâmica da água no espaço poroso, influenciada pela redução deste, haja vista, que no PVAd a manifestação do volume de microporos foi maior, por ser mais argiloso, enquanto que no PAex há mais macroporos em relação ao PVAd, por ser franco arenoso (Gráfico 10).

De acordo com Philip (1969) *apud* Coelho *et al.* (1999),  $\alpha$  é uma constante empírica relacionada à porosidade do solo ou às suas propriedades de retenção de água, variando de 0,002 cm a 0,8 cm para solo de textura fina e arenosa, respectivamente. Entretanto, para Coelho *et al.* (1999), o parâmetro  $\alpha$  está relacionado à porosidade livre de água, ou seja, quanto maior o volume de poros de aeração, menores serão os valores de  $\alpha$ , considerando que, à medida que o potencial mátrico da água no solo diminui, aumenta a porosidade de aeração. Contudo, essa assertiva não se confirma para os valores de  $\alpha$  da presente pesquisa.

Em relação aos demais parâmetros ( $m$  e  $n$ ), de maneira geral, houve variabilidade nas duas classes de solos e também nos horizontes. Conforme Castro *et al.* (2016), do ponto de vista físico não há significado para estes parâmetros, por serem apenas considerados como elementos dependentes entre si para estimativa da condutividade hidráulica, sendo este atributo não determinado na presente pesquisa.

Tabela 4 – Valores médios dos parâmetros de ajuste ( $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ ) da equação de van Genuchten (1980) para os horizontes com e sem caráter coeso dos solos PVAd e PAex.

<b>PVAd</b>			
<b>Horizontes</b>	<b>Parâmetros</b>		
	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Coeso H	0,018	4,578	0,417
Coeso V	0,391	3,886	0,632
Não coeso H	0,485	0,991	0,803
Não coeso V	0,211	2,788	0,604
<b>PAex</b>			
Coeso H	0,683	0,600	1,896
Coeso V	0,616	0,341	2,444
Não coeso H	0,872	0,179	3,621
Não coeso V	0,830	0,251	3,303

Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.7 Comprimento médio de poros

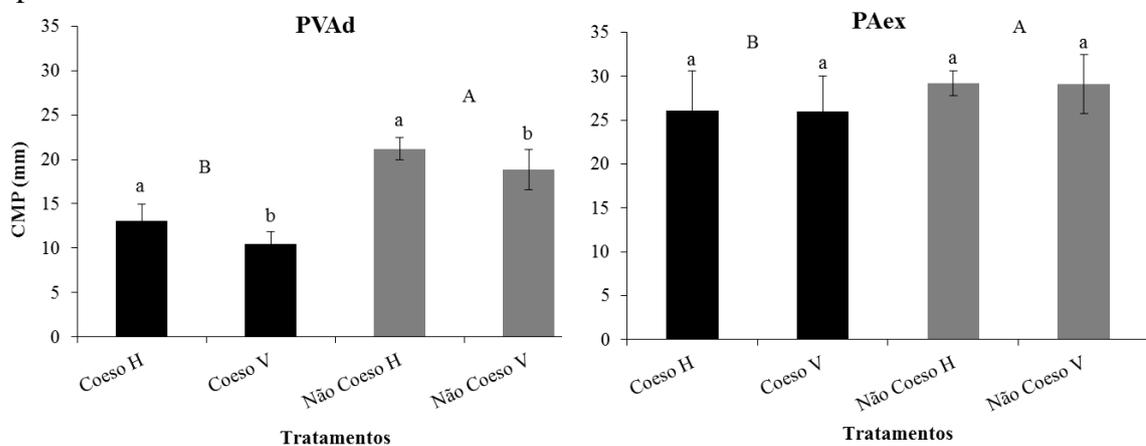
Observou-se que o comprimento médio dos poros (CMP) é significativamente maior nos horizontes sem caráter coeso, tanto no PVAd quanto no PAex (Gráfico 11). O fato de os horizontes com caráter coeso apresentarem CMP menor, é explicado pelo adensamento natural e o bloqueio desses poros ocasionado pela coesão entre as partículas sólidas do solo.

Quanto à posição de coleta nos perfis, verificou-se que na horizontal do PVAd, os poros são significativamente mais compridos do que na vertical; isso se deve ao fato de empacotamento dos poros na horizontal, uma vez que a densidade do solo mostrou que há maior adensamento na vertical do perfil. Além disso, a estrutura é que mais influencia no comprimento dos poros, bem como no seu arranjo. Já no PAex (Gráfico 11), não houve diferença estatística entre as posições de coleta, sendo que neste perfil a estrutura dos horizontes estudados é do tipo maciça, em que as partículas estão unidas, com maior força, ocasionando o mesmo arranjo poroso.

Verificou-se que houve diferença no comprimento de poro entre coeso horizontal e coeso vertical, do mesmo modo entre não coeso horizontal e não coeso vertical no PVAd, sendo que o CMP é maior para os não coesos, notadamente para o não coeso horizontal, uma vez que nesse horizonte não ocorre o adensamento da estrutura de forma significativa em

relação ao coeso. Já no PAex, não houve diferença significativa entre coeso horizontal e coeso vertical, da mesma forma entre não coeso horizontal e não coeso vertical. O mesmo comportamento ocorreu para a porosidade total e densidade para aquele solo. Assim, é possível afirmar que o comprimento dos poros está diretamente relacionado com o volume de poros no solo, bem como a geometria e forma do espaço poroso, podendo indicar ou não melhor qualidade da rede porosa.

Gráfico 11 – Médias e desvio-padrão dos valores de comprimento médio de poros nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

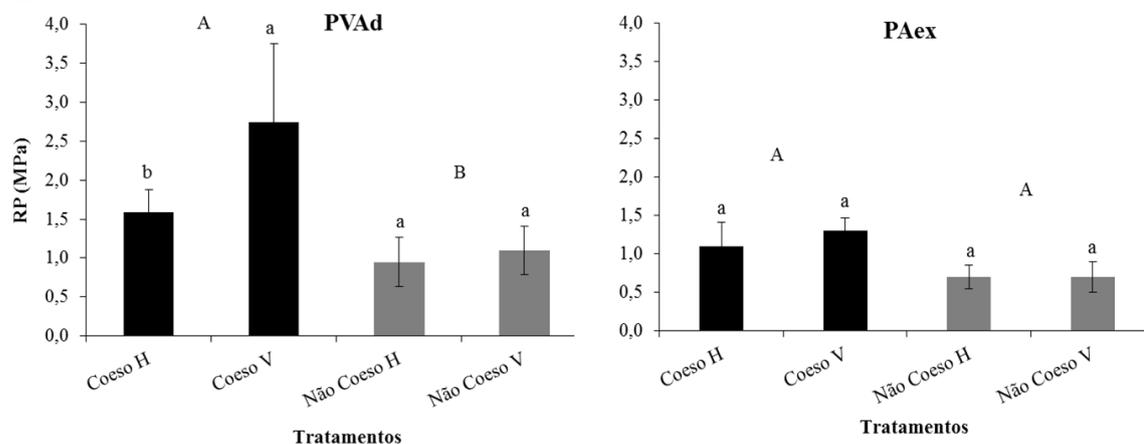


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.8 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração (RP), determinada com umidade do solo na capacidade de campo ( $\phi_m = -10$  kPa), foi significativamente elevada nos horizontes coesos dos perfis, sendo o maior valor para o coeso do PVAd (2,7 MPa) em seguida, para o coeso do PAex (1,3 MPa) conforme Gráfico 12. A elevada RP no PVAd se deve ao fato da textura (maior conteúdo de argila) e ao adensamento natural do horizonte coeso. Essa resistência impede o crescimento de raízes, dependendo da espécie de planta cultivada neste solo. Conforme Taylor *et al.* (1966), Silva *et al.* (1994), Tormena *et al.* (1998), Lapen *et al.* (2004) e Klein (2014), o valor de  $RP \geq 2,0$  MPa pode ser considerado limitante para o desenvolvimento de várias espécies cultivadas, mesmo com a umidade do solo na capacidade de campo.

Gráfico 12 – Médias e desvio-padrão dos valores de resistência do solo à penetração nos horizontes com e sem caráter coeso com coleta de amostra nas posições horizontal e vertical no PVAd e PAex. As médias seguidas pela mesma letra minúsculas em cada grupo e pelas mesmas letras maiúsculas entre grupos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às posições de coleta, na vertical do PVAd (Gráfico 12), o valor de resistência do solo à penetração é significativamente maior quando comparado com a horizontal, tal fato tem relação direta com a elevada densidade do solo e com o volume de microporos, justificando o adensamento dos horizontes com caráter coeso, influenciando na baixa área disponível para o fluxo de ar. Também está relacionado com a textura, haja vista que no PAex (Gráfico 12), por ser mais arenoso não difere estatisticamente entre a horizontal e vertical. Segundo Vieira *et al.* (2012), o aumento da RP comparado aos horizontes não coesos confirma a teoria de que o fenômeno da coesão ocorre naturalmente e depende dos processos pedogenéticos, bem como as alterações na estrutura por ciclos de umedecimento e secagem (VIEIRA, 2013).

A correlação da densidade do solo com a resistência à penetração são bons indicadores para inferir sobre o funcionamento regular da rede porosa do solo. O aumento de ambas as variáveis afeta o desenvolvimento radicular das plantas em função das limitações de absorção de água e nutrientes, bem como a oxigenação da matriz do solo e o armazenamento de água, portanto, essas raízes tendem a crescer lateralmente (horizontal) no perfil, conforme observado na descrição morfológica em anexo, uma vez que nos horizontes sobrejacentes sem coesão a RP não restringe o crescimento radicular.

Santana *et al.* (2006), relacionando atributos físicos com a densidade das raízes de citros em Argissolo Acinzentado e Latossolo Amarelo na Bahia, consideram a RP como sendo atributo importante para inferir sobre horizontes coesos. Os autores sugeriram avaliar a RP em condição de umidade adequada para expressar a coesão, assim, realizado no presente estudo

com umidade do solo na capacidade campo sob o potencial mátrico de -10 kPa. Deste modo, é possível inferir que horizontes coesos com conteúdo de argila  $\geq 25\%$  há restrição à penetração das raízes no solo, considerando o valor de referência de 2,0 MPa.

Ainda no Gráfico 12, observou-se que no PVAd, houve diferença estatística entre coeso horizontal e coeso vertical, sendo maior no coeso vertical (2,7 MPa). Já entre o não coeso horizontal e não coeso vertical, a RP é igual estatisticamente. Em relação ao PAex (Gráfico 12), não há diferença significativa de RP entre coeso horizontal e coeso vertical, bem como entre não coeso horizontal e não coeso vertical, mais uma vez confirmando a influência da classe textural na RP, por ser mais arenosa para aquele solo, oferece um fraco arranjo estrutural (baixa agregação) entre as partículas.

Os resultados de RP são semelhantes aos encontrados por Giarola *et al.* (2001), Lima (2004), Vieira *et al.* (2012) e Dantas *et al.*, (2014) em estudos com Argissolos com caráter coeso, portanto, confirmando a característica comum que os coesos apresentam.

#### **4.9 Porosidade dos horizontes com e sem caráter coeso obtida pela micromorfometria**

Vale ressaltar que para a técnica de micromorfometria (análise de imagem), os valores de porosidade são menores do que os valores de porosidade calculada, em decorrência da dimensão considerada em cada técnica, sendo que a porosidade calculada se refere ao volume de poros na amostra e na micromorfometria se refere à porcentagem de poros na área da imagem, por isso a porosidade será menor em relação à porosidade calculada. Os resultados das análises micromorfológicas por imagem para verificação da distribuição e tamanho dos poros dos horizontes com e sem caráter coeso do PVAd e do PAex estão apresentados nos Gráfico 13 e 14.

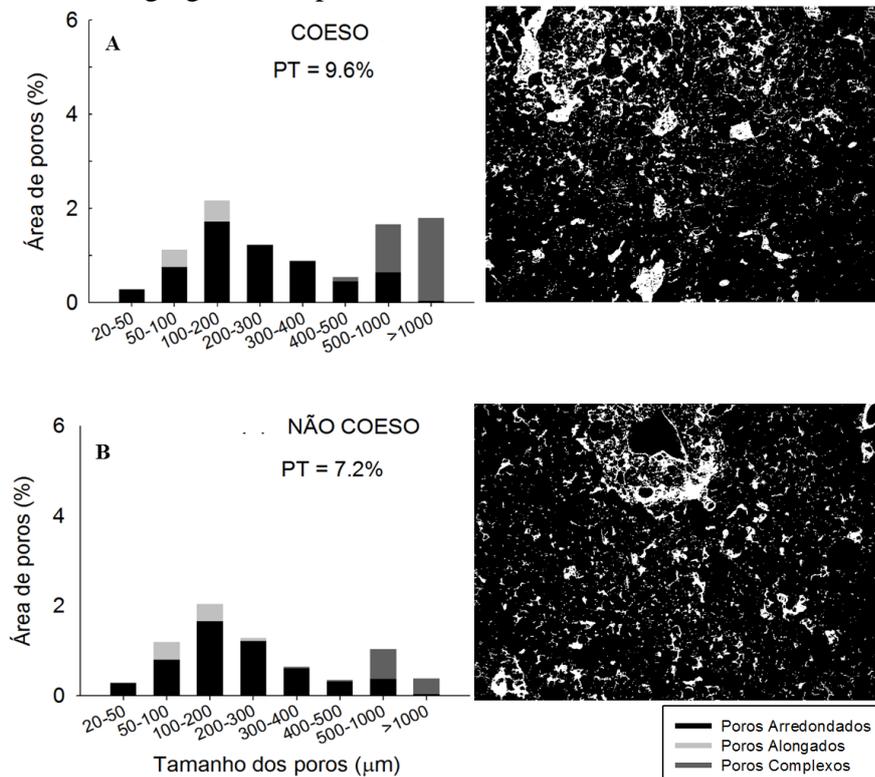
Observou-se nos Gráficos 13 e 14, que há predominância dos poros arredondados com diâmetro variando entre 20 a  $>1000 \mu\text{m}$  nos horizontes coesos e não coesos do PVAd e PAex. Embora esse tipo de poro seja de baixa conectividade, houve maior expressividade na área dos poros com diâmetro variando de 200 a  $300 \mu\text{m}$ , sendo que poros com diâmetro entre 50 e  $500 \mu\text{m}$  são considerados poros de transmissão, muito importantes para a penetração e crescimento das raízes (PIRES *et al.* 2008). O diâmetro desses poros justifica a permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) sem impedimento, segundo seus valores, nos horizontes coesos e não coesos.

Conforme Gráfico 13A, no PVAd a porosidade total do coeso (PT) é 9,6%, representada em maior proporção pelos poros arredondados médios (3,34% da área dos

poros), alongados grandes (0,49%) e por poros complexos grandes (2,84%), embora haja porção menor desses poros (alongados e complexos) em relação aos arredondados. Entretanto, considerando que os poros complexos são melhor conectados, certamente ainda tenha contribuído para a  $K_{ar}$ , mesmo sendo baixa em relação ao não coeso.

No horizonte não coeso (Gráfico 13B) sua porosidade total é 7,2%, representada por poros arredondados médios (2,92%), alongados médios (0,34%) e complexos grandes (1,03%), sendo estes os que mais contribuem para o fluxo de ar. Observou-se que apenas os poros arredondados têm maior área percentual, porém, esses tipos de poros não apresentam coerência com a elevada  $K_{ar}$ ; entretanto, aquele horizonte apresenta maior macroporosidade calculada e comprimento médio de poros. Além disso, essa classe de poro apresenta maior continuidade conforme parâmetro  $N$ , portanto facilitou o fluxo de ar, sendo estes poros funcionais. No entanto, um dos tipos de poros que mais contribui para tal fato são os poros complexos, por serem considerados estruturais e estão entre os agregados (interagregados), seguido pelo seu diâmetro variando de 500 a  $\geq 1000 \mu\text{m}$ , estes de tamanho grande, sendo que a permeabilidade ao ar também está relacionada com o tipo de poros, além de outros fatores tais como tamanho, distribuição e conectividade.

Gráfico 13 – Distribuição da porosidade total (PT) dos horizontes com e sem caráter coeso de acordo com a forma e tamanho dos poros no PVAd e imagens bidimensionais em que os poros são de cor branca e os agregados em preto.



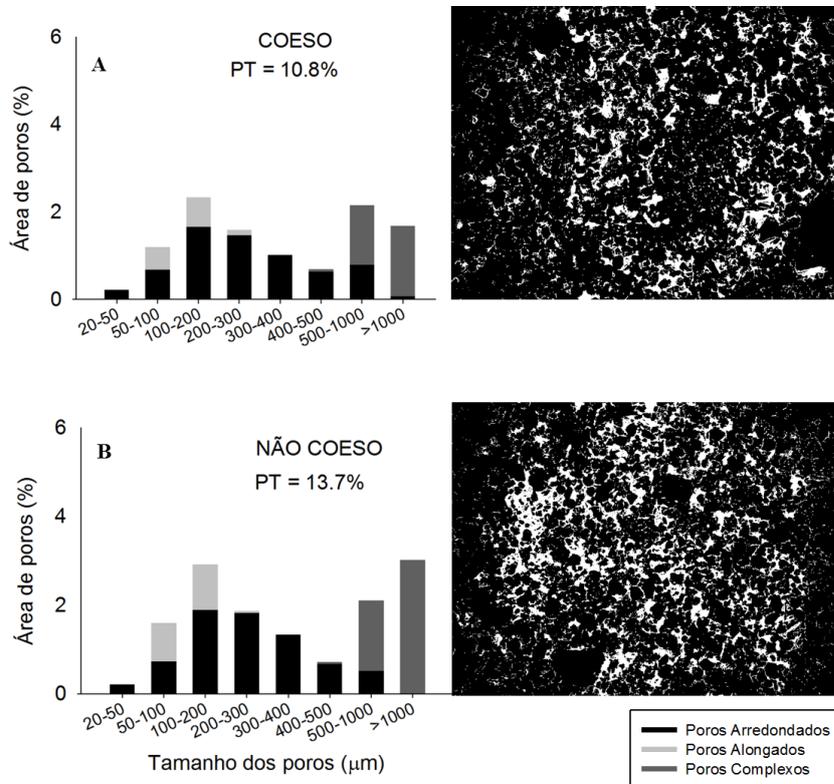
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que no horizonte coeso do PAex (Gráfico 14A) a porosidade total (PT = 10,8%), sendo menor do que o não coeso (Gráfico 14B), este com PT = 13,7%. Os 10,8% da porosidade total para o coeso é constituído por poros arredondados médios (3,81%), alongados grandes (0,91%) e complexos grandes (3,0%), com parte desta porosidade distribuída horizontalmente conforme Tabela 5, predominando os poros arredondados. Para o horizonte não coeso, os poros estão distribuídos em maior porção horizontalmente, sendo os poros arredondados médios (4,62%), alongados grandes (1,43%) e complexos grandes (4,6%), sendo que a primeira e a última classe de poro, as mais expressivas na porosidade total.

Deste modo, permite inferir que a coesão associada ao arranjo das partículas ocasionada pelo adensamento natural das mesmas resulta na dominância de poros arredondados médios, implicando menor área disponível para o fluxo de ar em relação ao não coeso, medida pela permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ), uma vez que poros do tipo arredondados não são bons condutores de fluidos por serem de baixa conectividade (SOUZA *et al.*, 2006).

Quanto ao horizonte não coeso, os 13,7% da porosidade total são também representados pelos poros arredondados (96,6%), alongados (2,2%) e complexos (1,2%), mas são os alongados e complexos grandes que têm maior área de contribuição para funcionamento da rede porosa, além de serem melhor conectados, justificando o maior comprimento médio de poros em relação ao horizonte coeso.

Gráfico14 – Distribuição da porosidade total (PT) dos horizontes com e sem o caráter coeso de acordo com a forma e tamanho dos poros no PAex e imagens bidimensionais em que os poros são de cor branca e os agregados em preto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notório que o coeso e o não coeso do PVAd e do PAex contêm poros do tipo complexos, alongados e também arredondados para ambos; já no PAex (Gráfico 14B) predominam poros complexos no coeso e não coeso e, neste último, também há poros do tipo alongados variando de 50 a 200 μm. Saliente-se que poros complexos grandes indicam melhor estruturação do solo, por estarem interconectados (GENNARO *et al.*, 2015). Neste caso, é possível que a presença dos poros complexos e alongados tenha contribuído para que houvesse valor de  $\text{Log } K_{ar} > 1 \mu\text{m}^2$  e a maior retenção de água nos coesos nos poros arredondados, embora em proporção menor do que os horizontes não coesos, ou seja, a rede porosa nos coesos não é totalmente bloqueada. Tais tipos de poros são semelhantes aos observados por Lima (2004). De acordo com a autora, poros não interconectados podem proporcionar a retenção de água ao se comportarem como reservatório no perfil de solo; isso se aplica para os poros arredondados. Conforme Souza *et al.* (2006), poros arredondados têm baixa condução de água ao longo do perfil, em decorrência da baixa conectividade entre si.

Considerando a hipótese de que horizontes com caráter coeso apresentam funcionalidade de maneira distinta dentro do perfil do solo, em decorrência da grande

quantidade de poros pequenos e, por estarem orientados preferentemente na horizontal, fato que implica na diminuição da condução de ar e água no perfil de solo, neste caso, a hipótese aventada foi confirmada. É importante ressaltar que para obter a dominância dos poros nas posições de coleta na direção horizontal e vertical do perfil, foi inserida uma condição lógica no Excel com base no Diâmetro de Féret ( $DF$ ) do  $I_2$ , sendo aplicado para cada bloco de solo estudado. Deste modo, observou-se que tanto no horizonte coeso quanto no horizonte não coeso dos solos PVAd e PAex, a maior parte dos poros está distribuída preferentemente na horizontal, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de poros distribuídos nas posições horizontal e vertical dos horizontes coesos e não coesos para o PVAd e PAex.

<b>Horizonte coeso do PVAd</b>		
<b>Posição</b>	<b>Quantidade de poros</b>	<b>% de poros</b>
Horizontal	8.011	71,5
Vertical	3.187	28,5
Total	11.198	100
<b>Horizonte não coeso do PVAd</b>		
Horizontal	8.216	72,4
Vertical	3.141	27,6
Total	11.357	100
<b>Horizonte coeso do PAex</b>		
Horizontal	8.150	82,11
Vertical	1.775	17,88
Total	9.925	100
<b>Horizonte não coeso do PAex</b>		
Horizontal	7.067	66,6
Vertical	3.537	33,4
Total	10.604	100

Fonte: elaborada pelo autor.

Pela totalidade dos poros (Tabela 5), notou-se que os horizontes coesos do PVAd e PAex apresentaram menos poros em relação aos não coesos. A técnica de micromorfometria foi sensível para destacar a dominância dos poros na horizontal, tal como verificado pelo Diâmetro de Féret, fato que corrobora a hipótese de que há poros preferentemente na horizontal para os coesos. Neste caso, como há um maior volume de poros na horizontal, e

considerando sua continuidade pelo parâmetro  $N$ , haverá fluxo lateral da água tal como apresenta o Gráfico 10 de umidade volumétrica em função dos potenciais mátricos aplicados.

## 5. CONCLUSÕES

1. Horizontes com caráter coeso apresentam rede porosa distinta quanto à morfologia e funcionalidade no solo.
2. A rede porosa dos horizontes coesos é mais eficiente horizontalmente, com predomínio de poros arredondados.
3. Os poros nos horizontes com caráter coeso são menos funcionais que os dos horizontes sem caráter coeso.

## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 699-702, 1984.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: Conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290 p.
- ARAUJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. e. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.
- ANDERSON, T. H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 98, p. 285-293. 2003.
- ARAUJO 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.
- BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: Dane, J.H., Topp, G. C., (Ed.). **Methods of soil analysis**, 5. ed.: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, Madison, p. 1141-1158, 2002.
- BALL, B. C.; LANG, R. W.; ROBERTSON, E. A. G.; FRANKLIN, M. F. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. **Soil & Tillage Research**, v. 31, p. 97-118, 1994.
- BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: Smith, K. A., Mullins, C. E., (ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd ed., Madison, p. 511-549, 1991.
- BAVOSO, M. A. **Resiliência física de solos sob plantio direto**. 2015. 59 fls. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, N. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. N.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.
- BEZERRA, C. E. E.; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E.; MOTA, J. C. A.; VIEIRA, J. M.; DUARTE, L. R. S.; COOPER, M. Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, v. 53, p. 43-55, 2014.
- BIGARELLA, J. J. The Barreiras Group in Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 47, p. 365-393, 1975. Suplemento.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p.

363-375, 1986a. (Agronomy Monography, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986b. (Agronomy Monography, 9).

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 438-441, 1982.

CASTRO, L. G.; MAIA, A. H. N.; JONG van LIER, Q. Erros na estimativa de umidades pelo modelo de van Genuchten. [Acessado em 22 de julho de 2016]. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/15090/1/2002AA002.PDF>

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

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. **Scientia Agrícola**, v. 55, p. 367-378, 1998.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 23-28, 2000.

COELHO, E. F.; OR, D.; SOUZA, V. F. Avaliação de parâmetros hidráulicos para modelos de distribuição de água no solo sob gotejamento. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 651-657, 1999.

COELHO, G. F. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos**, 97 p. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

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

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**, 145 p. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURTI, N.; TORRES, T. C. P. Caracterização química, física, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 297-313, 2008.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).

DANTAS, J. S.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A. BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação

solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1039-1050, 2014.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, filth and hard-setting. *Geoderma*, v. 120, p. 215-225, 2004.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behavior of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 225-232, 2009.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3.0 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2013. 353 p.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: JONG van LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: 1ª edição. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 2010. 298 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 515-524, 1999.

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

FONSECA, M. H. P.; GUERRA, H. O. C.; LACERDA, R. D.; BARRETO, A. N. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 368-373, 2007.

FONTANA, A.; NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; EBELING, A. G. Frações da matéria orgânica e fertilidade de solos de tabuleiro sob diferentes coberturas vegetais no norte fluminense (RJ). In: XI JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRRJ. Rio de Janeiro, **Anais...** v. 11, n. 2, p. 03-06, 2001.

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, 1986. (Agronomy Monography, 9).

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

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e *hardsetting*. **Scientia Agrícola**, 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**, v. 113, p. 95-108, 2003.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C.; 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**, v. 25, p. 239-247, 2001.

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

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v. 34, p.101-114, 1984.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier Academic Press, San Diego, 2004.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Manual técnico de pedologia**. Edição 2. Rio de Janeiro, 2007.

JACOMINE, P. K. T. Distribuição Geográfica, Características e Classificação dos Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas, EMBRAPA/UFBA. p.13-26. 1996.

JONG van LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 233-238, 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**, v. 16, p. 277-281, 1992.

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

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Proceedings - Soil Science Society of America**, v. 11, p. 93-99, 1946.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 3ª ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014, 263 p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986. pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canadá. **Soil & Tillage Research**, v. 78, 151-170, 2004.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 355 p.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA-JÚNIOR, V. S.; ARAÚJO 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**, v. 34, p. 473-486, 2010.

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

LIMA, H. V. **Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no estado do Ceará**, 85 p. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

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**, v. 28, p. 467-476. 2004.

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

McQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a finetextured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil & Tillage Research**, v. 25, p. 217-230, 2002.

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

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**, v. 30, p. 1007-1019, 2006.

NEVES, C. M. N. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, v. 45, p. 45-53, 2007.

OLIVEIRA, V. S. **Compactação em solos coeso dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas**, 2008. 76 fl. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

PAIVA, A. Q.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de Tabuleiro do estado da Bahia. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2295-2302, 2000.

PAIXÃO RIBEIRO, L. Evolução da cobertura pedológica dos Tabuleiros Costeiros e a gênese

dos horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.93-121. 2001.

PHILIP, J. R. Theory of infiltration. **Advances Hydroscience**, v. 5, p. 215-296, 1969.

PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Revista Catena**, v. 72, p. 297-304, 2008.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E. S.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, v. 41, p. 557-566, 2013.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

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

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, 1., Campinas, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, p.32-67, 1992.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa, MG: SBCS, 343 p. 2012.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.105-114, 2011.

ROSA RIBEIRO, M. 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. 2001.

SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos dos solos e distribuição 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**, v. 30, p. 1-12, 2006.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

- SILVA, E. A. **Caracterização e gênese de solos em áreas de depressão de topo de Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro**. 2012. 99 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- SILVEIRA JUNIOR, S. D.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1854-1867, 2012.
- SILVEIRA, L. R.; BRITO, A. S.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 429-436, 2011.
- SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; CALDAS, R. C. Identificação da coesão com base em atributos físicos convencionais em solos dos Tabuleiros Costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros. p. 169-190. 2001.
- SOUZA, R. V. C. C. **Tomografia computadorizada de raios-x de solos coesos dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas**, 2013. 142 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. P. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 487-492, 2006.
- STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p. + 1 CD-ROM.
- STRECK, C. A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil**, 2007. 95 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JÚNIOR, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.
- TAYLOR, S. T.; ASHCROFT, G. I. **Physical edaphology: the physic of irrigated and nonirrigated soils**. W. H. Freeman, San Francisco, C. A., 1972.
- TOMA, R. S. **Evolução do funcionamento físico-hídrico do solo em diferentes sistemas de manejo em áreas de agricultura familiar na região do Vale do Ribeira, SP**, 2012, 236 p. Tese (Doutorado em ciências) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 301-309, 1998b.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998a.
- TULLER, M.; OR, D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. **Water Resources Research**, v. 41, 2005.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-897, 1980.

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

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**, v.43, p. 623-632, 2012.

**ANEXOS**

## ANEXO I

### Descrição Geral

**PERFIL São Jerônimo 01****DATA** – 15/08/2013.**CLASSIFICAÇÃO (SIBCS)** – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico Típico (PVAd).**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADA** – Sítio São Jerônimo – Aquiraz – CE, Estrada do Fio – 8,4 km da CE, 040 (03°52'58,8" S e 38°24'47,3" W).**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL** – Trincheira em topo de declive.**ALTITUDE** – 27 m.**LITOLOGIA** – Sedimentos arenosos do Grupo Barreiras.**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** – Grupo Barreiras.**CRONOLOGIA** – Período Terciário.**PEDREGOSIDADE** – Não pedregosa.**ROCHOSIDADE** – Não rochosa.**RELEVO LOCAL** – Plano.**RELEVO REGIONAL** – Suave ondulado.**EROSÃO** – Não aparente.**DRENAGEM** – Boa.**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** – Formação das praias e dunas.**CLIMA** – Aw', pela classificação de Köppen, tropical, com temperatura superior a 18 °C e precipitação > 750 mm.**USO ATUAL** – Mangueira e coqueiro.**DESCRITO E COLETADO POR** – Ricardo Espíndola Romero e Tiago Osório Ferreira.**CLASSIFICADO POR** – Thiago Leite de Alencar e Ademir Silva Menezes.

### Descrição morfológica

- A** 0-19 cm; vermelho-acinzentado (7,5YR 5/2), vermelho-acinzentado (7,5YR 4/3); areia; fraca pequena e média blocos subangulares; macio a ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e clara.
- E1** 19-52 cm; bruno-amarelado (10YR 5/8); areia; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e gradual.
- EB** 52-67 cm; bruno-amarelado (10YR 5/8); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares; macio a ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição ondulada e clara.
- BE** 67-81 cm; bruno-forte (7,5YR 5/6); franco-arenosa; moderada média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
- Bt1** 81-129 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/6); franco-argiloarenosa; maciça blocos subangulares; extremamente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
- Bt2** 129-171 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/8); franco-argilo arenosa; moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
- Bt3** 171-190+ cm; vermelho-amarelado (5YR 5/8); franco-argilo arenosa; moderada média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

**RAÍZES** – muito finas no horizonte A; poucas finas e raras médias no horizonte E1; raras finas e médias no horizonte EB; raras grossas médias e finas no horizonte BE; raras finas no horizonte Bt1.

#### Observações:

- Caráter coeso a 81 cm (consistência extremamente dura).
- Raízes grossas e médias dispostas horizontalmente no topo do Bt1.
- 4º horizonte (BE) com mosqueados muito pequenos acinzentados.
- Transição EB entre (63-69 cm).

## ANEXO II

### Descrição Geral

**PERFIL São Jerônimo 02****DATA** – 15/08/2013.**CLASSIFICAÇÃO (SIBCS)** – ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso abrupto (PAex).**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADA** – Sítio São Jerônimo – Aquiraz – CE, Estrada do Fio – 8,4 km da CE, 040 (03°52'57,0" S e 38°24'52,4" W).**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL** – Trincheira em topo de declive.**ALTITUDE** – 24 m.**LITOLOGIA** – Sedimentos arenosos do Grupo Barreiras.**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** – Grupo Barreiras.**CRONOLOGIA** – Período Terciário.**PEDREGOSIDADE** – Não pedregosa.**ROCHOSIDADE** – Não rochosa.**RELEVO LOCAL** – Plano.**RELEVO REGIONAL** – Suave ondulado.**EROSÃO** – Não aparente.**DRENAGEM** – Boa.**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** – Formação das praias e dunas.**CLIMA** – Aw', pela classificação de Köppen, tropical, com temperatura superior a 18 °C e precipitação > 750 mm.**USO ATUAL** – Mangueira e coqueiro.**DESCRITO E COLETADO POR** - Ricardo Espíndola Romero e Tiago Osório Ferreira.**CLASSIFICADO POR** – Thiago Leite de Alencar e Ademir Silva Menezes.

### Descrição morfológica

- Ap** 0-20 cm; cinzento-bruno-claro (10YR 6/2), bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2); areia; fraca média blocos subangulares; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e clara.
- E1** 20-70 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4); areia; fraca média, blocos subangulares; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e gradual.
- E2** 70-107 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4); areia franca; fraca média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição ondulada e clara.
- Bt1** 107-153 cm; amarelo-brunado (10YR 6/8); franco-arenosa; maciça; muito dura, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
- Bt2** 153-184 cm; amarelo-brunado (10YR 6/6); franco-arenosa; moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
- Bt3** 184-197+ cm; bruno-amarelado (10YR 5/8); franco-arenosa; moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

**RAÍZES** – pouco finas no horizonte Ap; comuns médias e pouco finas no horizonte E1; pouco médias e raras finas no horizonte E2; poucas médias no horizonte Bt1; raras médias no horizonte Bt2; raras médias e finas no horizonte Bt3.

#### Observações:

- Carvão a 20 cm de profundidade.
- Mosqueados: 2% de plintita no horizonte Bt3.
- Transição E2 entre 103-120 cm.