



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

**NATHIELLY HERCULANO DE PAULA**

**CONTRIBUIÇÃO DE SILÍCIO E ALUMÍNIO NA GÊNESE DO CARÁTER COESO**

**FORTALEZA**

**2018**

NATHIELLY HERCULANO DE PAULA

CONTRIBUIÇÃO DE SILÍCIO E ALUMÍNIO NA GÊNESE DO CARÁTER COESO

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: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

FORTALEZA

2018

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)

---

P348c Paula, Nathielly Herculano de.  
Contribuição de silício e alumínio na gênese do caráter coeso. / Nathielly Herculano de Paula. – 2018.  
47 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero.

1. Coesão. . 2. Baixa cristalinidade. . 3. Adensamento.. I. Título.

CDD 664

---

NATHIELLY HERCULANO DE PAULA

CONTRIBUIÇÃO DE SÍLÍCIO E ALUMÍNIO NA GÊNESE DO CARÁTER COESO

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: Pedologia.

Aprovada em: 25/10/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira  
Universidade de São Paulo (Esalq - USP)

A Deus.

Aos meus pais Chirlene e Raimundo.

Ao meu amado esposo Charlon.

A minha filha amada, Alícia.

## AGRADECIMENTOS

A CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo pelo conhecimento e qualificação na minha formação profissional e pessoal.

Ao Professor Dr. Ricardo Espíndola Romero pela orientação, amizade e confiança.

Ao professor Dr. Tiago Osório Ferreira pela contribuição na minha vida acadêmica

Ao professor Dr. Jaedson Mota pelas sugestões e disponibilidade do laboratório de Física do Solo.

Á Deus, dono de toda minha força e coragem, para enfrentar mais esse desafio na vida.

Ao apoio da minha família Charlon, Alícia, Pai, Mãe, Irmãos, Sogra, minha querida cunhada Sabrina, sem vocês não teria conseguido.

A Igreja Verbo da Vida Zona Norte Fortaleza, Pastor Clayton, Euriane, Kleane, Maryanne, Abreu, André, Henrique, Mairla, Cavalcante, Elenice, Dara. Obrigada por todo amor e ensinamento, vocês são minha família em cristo.

Aos funcionários do departamento de solos, em especial, ao Franzé, Antônio José, Tavares, Deyse.

Aos amigos Edilaine, Gleiciane, Cilas, Lucas, Tiago, Ícaro, Gustavo, agradeço a todos pelos conhecimentos compartilhados e ajuda em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço em especial a Juliana Vieira e Dimitri Matos que tanto me ajudaram com seus conhecimentos práticos em solos com caráter coeso. Muito obrigada

As minhas amigas federais Lilian Santos, Liliane Santos e Priscila Bezerra, da graduação para a Vida. Amo vocês.

Aos amigos que ingressaram junto comigo nesse mestrado, Rhayane, Luan, Raquel, Esraelda, Rodolfo, vocês fizeram parte dessa grande etapa.

## RESUMO

Os Tabuleiros Costeiros são uma unidade geomorfológica formada a partir dos sedimentos continentais, depositada por sistemas fluviais entrelaçados e associados a leques aluviais, esses sedimentos compõe a chamada Formação Barreiras, presente em parte do litoral do Brasil. Solos dessa região apresentam características peculiares, como o aparecimento de horizontes com coesão forte e temporária, chamados de horizontes com caráter coeso. A gênese desse horizonte ainda é pouco conhecida, alguns experimentos têm mostrado que sua formação pode ter influência de compostos de baixa cristalinidade que, sob um regime prolongado de ciclos de umedecimento e secagem, se acumulam formando horizonte com coesão forte. Por esta razão, o objetivo do estudo foi verificar se silício e alumínio sob a influência dos ciclos de umedecimento e secagem contribuem para a coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros. Para isso, foram extraídos os compostos de baixa cristalinidade de um horizonte com caráter coeso com oxalato de amônio, e em seguida realizadas saturações com soluções de ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ) e cloreto de alumínio ( $AlCl_3$ ), respectivamente, sob três níveis de ciclos de umedecimento e secagem: 10, 20 e 30 vezes. Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado com fatorial. A avaliação foi realizada por medições de resistência à penetração ( $R_p$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ), permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de Tuckey em nível de significância de 5%. Observou-se que o silício (Si) contribuiu para o incremento nos valores de  $R_p$  e redução nos valores de condutividade hidráulica do solo e permeabilidade do solo ao ar e que a quantidade de ciclos de umedecimento e secagem não influenciou os valores encontrados para os parâmetros  $D_s$ ,  $R_p$ ,  $K_{sat}$ ,  $K_{ar}$ , além disso, os teores de Si e Al no tratamento Si+Al, indicam que há interação entre esses elementos, podendo haver a produção de algum composto aluminossilicatado que favorece o aumento dos valores dos parâmetros avaliados.

**Palavras-chave:** Coesão. Baixa cristalinidade. Adensamento.

## ABSTRACT

The Coastal Tracks are a geomorphological unit formed from the continental sediments, deposited by interlaced fluvial systems and associated to alluvial fans, these sediments make up the so-called Barreiras Formation, present in part of the Brazilian coast. Soils of this region present peculiar characteristics, such as the appearance of horizons with strong and temporary cohesion, called horizons with cohesive character. The genesis of this horizon is still little known, some experiments have shown that its formation may be influenced by compounds of low crystallinity that, under a prolonged regime of wetting and drying cycles, accumulate forming horizon with strong cohesion. For this reason, the objective of the study was to verify if silicon and aluminum under the influence of the wetting and drying cycles contribute to the cohesion in soils of the Coastal Trays. For this, the compounds of low crystallinity of a horizon with cohesive character with ammonium oxalate were extracted, and then saturations with solutions of silicic acid ( $H_4SiO_4$ ) and aluminum chloride ( $AlCl_3$ ), respectively, under three levels of cycles of wetting and drying: 10, 20 and 30 times. A completely randomized design with factorial was used. The evaluation was performed by measurements of penetration resistance ( $R_p$ ), soil density ( $D_s$ ), hydraulic conductivity of the saturated soil ( $K_{sat}$ ), soil permeability to air ( $K_{ar}$ ). Data were submitted to analysis of variance (ANOVA), Tuckey test at a significance level of 5%. It was observed that silicon (Si) contributed to the increase in  $R_p$  values and reduction in soil hydraulic conductivity and soil permeability to air and that the number of wetting and drying cycles did not influence the values found for the parameters  $D_s$ ,  $R_p$ ,  $K_{sat}$ ,  $K_{ar}$ , in addition, the Si and Al contents in the Si + Al treatment indicate that there is interaction between these elements, and there may be some aluminosilicate compound that favors the increase of the values of the evaluated parameters.

**Keywords:** Cohesion. Low crystallinity. Densification.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil do Argissolo Amarelo Eutrocoeso Típico, com indicação do horizonte com caráter coeso (Bt2), usado no experimento .....	17
Figura 2 - Foto ilustrando o processo de umedecimento para os tratamentos com ciclos de umedecimento e secagem .....	21
Figura 3 - Condutividade hidráulica do solo saturado, método do permeâmetro de carga constante, com adaptação devido ao tamanho dos cilindros utilizados.....	23

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Resistência do solo a penetração (Mpa) .....	27
Gráfico 2	- Silício e alumínio na forma de óxido de silício e óxido de alumínio .....	28
Gráfico 3	- Condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ ) .....	32
Gráfico 4	- Permeabilidade do solo ao ar em diferentes potenciais matriciais ( $\mu\text{m}^2$ ) .....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do solo .....	16
Tabela 2 - Caracterização física do solo .....	17
Tabela 3 - Resumo dos tratamentos .....	20
Tabela 4 - Análise granulométrica do horizonte Bt2 .....	27
Tabela 5 - pH do solo em água .....	29
Tabela 6 - Médias gerais dos tratamentos para cada análise realizada .....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ds	Densidade do solo
ICPOES	Espectrofotometria de emissão óptica em plasma
Kar	Permeabilidade do solo ao ar
Ksat	Condutividade hidráulica do solo saturado
PVC	Policloreto de vinilo
Rp	Resistência do solo a penetração
SiBCS	Sistema brasileiro de classificação de solos
TFSA	Terra fina seca ao ar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Formação Barreiras e Tabuleiros Costeiros</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Características e identificação do Caráter Coeso</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3</b>	<b>Gênese do caráter Coeso</b> .....	<b>12</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Silício e Alumínio na Gênese do Caráter Coeso</i> .....	<b>13</b>
<b>2.3.2</b>	<i>Ciclos de Umedecimento e Secagem na Gênese do Caráter Coeso</i> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização do solo e da área experimental</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Extração por oxalato de amônio</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Adição de Si e Al</b> .....	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Tratamentos e delineamento adotado</b> .....	<b>19</b>
<b>3.5</b>	<b>Quantificação de compostos de baixa cristalinidade (Si e Al)</b> .....	<b>21</b>
<b>3.6</b>	<b>Análises físicas</b> .....	<b>21</b>
<b>3.6.1</b>	<i>Análise granulométrica</i> .....	<b>21</b>
<b>3.6.2</b>	<i>Permeabilidade do solo ao ar (Kar)</i> .....	<b>22</b>
<b>3.6.3</b>	<i>Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat)</i> .....	<b>22</b>
<b>3.6.4</b>	<i>Resistência do solo à penetração (Rp)</i> .....	<b>24</b>
<b>3.6.5</b>	<i>Densidade do solo (Ds)</i> .....	<b>24</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Resistência do solo à penetração (Rp)</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat)</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Permeabilidade do solo ao ar (Kar)</b> .....	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em parte do litoral brasileiro existe uma formação geológica chamada de Formação Barreiras, nela encontra-se uma unidade geomorfológica chamada de Tabuleiros Costeiros (ARAI, 2006). Solos dessa unidade são geralmente profundos, da classe dos Latossolos e Argissolos e, em menor ocorrência, Espodossolos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos (NUNES *et al.*, 2011).

Nos solos dessa região pode haver camadas adensadas, caracterizando o caráter coeso, que dão ao solo propriedades de elevada dureza (Consistência seca muito dura e extremamente dura) quando seco e de friabilidade quando úmido (EMBRAPA, 2013). Essa característica pode causar a diminuição da infiltração de água e ar no solo, reduzindo a profundidade efetiva e o desenvolvimento das raízes das plantas, prejudicando cultivos de mandioca, cana-de-açúcar, caju, coco, dendê, abacaxi e cacau típicos da região dos Tabuleiros Costeiros (CINTRA *et al.*, 2009).

A gênese do caráter coeso ainda não está completamente esclarecida. Há algum tempo pesquisadores estudam possíveis hipóteses para a origem desses horizontes adensados naturalmente, entre elas: argiluviação; agrupamento de partículas de argila face a face; presença de compostos orgânicos pouco polimerizados e adensamento pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem (RIBEIRO, 2001). Recentemente, a possibilidade de a gênese estar relacionada à presença de compostos amorfos de baixa cristalinidade, como o Si e Al, vem sendo observada (VIEIRA *et al.*, 2012).

Esses Compostos de baixa cristalinidade, podem se polimerizar e precipitar quando o solo estiver seco, causando extrema dureza, e se despolimerizar quando o solo estiver em condições úmidas, causando friabilidade (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001), esse processo combinado com vários ciclos de umedecimento e secagem pode então formar um horizonte adensado (caráter coeso).

Freitas *et al.* (2016) verificaram que com nove ciclos de umedecimento e secagem houve um aumento na resistência a penetração. Duarte (2015), verificou que, mesmo em baixa quantidade, o Si extraído de horizontes com caráter coeso é o dobro da quantidade encontrada em horizontes sem o caráter coeso. Já o Al pode atuar na coesão devido à formação de polímeros coloidais com o silício (Al-Si) (DOUCET *et al.*, 2001).

A hipótese desse trabalho é que compostos de baixa cristalinidade de silício e alumínio atuam na gênese do horizonte com caráter coeso associado a ciclos de

umedecimento e secagem. Com isso objetivou-se avaliar o grau de coesão de um horizonte com caráter coeso, submetido à retirada de Si e Al de baixa cristalinidade por solução oxalato de amônio e posterior reposição, em três níveis de ciclos de umedecimento e secagem com soluções de ácido silícico e cloreto de alumínio respectivamente, através dos parâmetros: resistência do solo a penetração ( $R_p$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ), e permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Formações Barreiras e Tabuleiros Costeiros

A Formação Barreiras é uma unidade geológica de ocorrência expressiva ao longo do litoral brasileiro, desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá (ARAI, 2006), recobrendo depósitos de diversas bacias costeiras e embasamento cristalino. A gênese da Formação Barreiras está associada a diferentes ciclos de erosão e deposição sucessivos (NUNES *et al.*, 2011). Essa deposição ocorreu devido a eventos climáticos, oscilando entre períodos secos e úmidos correspondendo à sucessão dos períodos das glaciações e interglaciações, e por eventos tectônicos marcantes, interferindo nos deslocamentos dos locais e dos oceanos, reforçando os aspectos climáticos (SANTOS, 1992).

Esses depósitos ainda são pouco conhecidos, tanto no que diz respeito às suas características sedimentares, quanto às suas características tectônicas (NOGUEIRA; BEZERRA; CASTRO, 2006). Normalmente, as deposições de sedimentos da Formação Barreiras têm sido associadas a leques aluviais e fluviais entrelaçados, juntamente com frequentes depósitos gravitacionais (BEZERRA; MELLO; SUGUIO, 2006), desenvolvido sob clima predominantemente árido e sujeito a oscilações (ALHEIROS *et al.*, 1988). Também têm sido descritos depósitos de origem marinha, como no estudo realizado no litoral paulista, sul fluminense e baiano que evidenciou a existência de dois níveis de terraços marinhos (SUGUIO; MARTIN; FAIRCHILD, 1978) e comprovados após estudos palinológicos (ARAI, 2006).

No que diz respeito à influência tectônica, a Formação Barreiras possui suas características oriundas de, no mínimo, dois eventos tectônicos. O primeiro seria a mudança de espessura da Formação Barreiras ao longo de falhas de crescimento ocorrida do Paleoceno ao Mioceno (ARAI, 2006), o segundo evento ocorrido após a sedimentação, apresentando idade que varia do Mioceno ao Holoceno (NOGUEIRA; BEZERRA; CASTRO, 2006). Mais recentemente, pesquisas apontam que eventos tectônicos cenozóicos têm uma importância determinante na configuração do relevo atual. Esses eventos tectônicos foram ignorados no passado, mas vêm sendo enfatizados em estudos recentes (FURRIER; ARAÚJO; MENESES, 2006).

O período Quaternário foi marcado por um clima quente e úmido, período de deposição da Formação Barreiras, favorecendo o crescimento de vegetação mais densa e alterações pedogenéticas e geoquímicas, como a formação de argilas caulinitas e lixiviação de

bases de silício (RODRIGUES, 2007). Geralmente os sedimentos da Formação Barreiras possuem textura argilo-arenosa e areno-argiloso, indicando que estes depósitos sofreram alteração de seus grãos ou a iluviação de argilas autigênicas (MORAIS *et al.*, 2006), apresentado baixos teores de Fe e sendo essencialmente cauliníticos, com esqueleto quartzoso mal selecionado (MELO *et al.*, 2002), podendo dessa forma favorecer o desenvolvimento de horizontes adensados (GIAROLA *et al.*, 2009).

Os Tabuleiros Costeiros são uma unidade geomorfológica formada a partir dos sedimentos mal consolidados da Formação Barreiras, repousando de forma discordante sobre o embasamento cristalino pré-cambriano (DANTAS; MEDINA, 2000). Solos da região dos Tabuleiros são predominantemente Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, encontrando-se, também, em menor expressão, os Espodossolos, Argissolos Acinzentados, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos, sendo solos com baixa capacidade de retenção de água e lençol freático muito profundo (CINTRA *et al.*, 2009).

Na região Nordeste, os Tabuleiros Costeiros ocupam uma área de 8,42 milhões hectares, altitude média de 50-100 m e possuem relevo plano a ondulado. No topo do relevo ocorre o desenvolvimento da atividade agrícola, sendo áreas de grande importância socioeconômica, devido à superfície mais aplainada e a proximidade com grandes centros urbanos. Dentre as atividades estão o cultivo da cana-de-açúcar, produção de alimentos, pastagens e florestas (LIMA NETO *et al.*, 2009). Entretanto, a ocorrência de horizonte com caráter coeso pode prejudicar o desenvolvimento do sistema radicular dessas plantas.

## **2.2 Identificação e Caracterização do Horizonte com Caráter Coeso**

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2018), o caráter coeso pode ser identificado como um horizonte mineral subsuperficial com características pedológicas de adensamento, muito resistente à penetração do martelo pedológico ou faca, sendo muito duro a extremamente duro quando seco, passando a friável ou firme quando úmido e não deve ser confundido com fragipã e duripã, que também apresentam coesão.

Os fragipãs são extremamente duros quando seco, mas quando úmido possuem uma quebradicidade de fraca a moderada, e sua estrutura tende a romper subitamente quando sob pressão (EMBRAPA, 2018), além de ter processo pedogenético diferente do caráter coeso.

Vieira *et al.* (2012) observaram que os materiais destorroados de horizontes com caráter coeso, após as amostras serem submetidas a ciclos de umedecimento e secagem,

voltaram a manifestar a coesão depois de secos, comprovando que a coesão presente nesses horizontes possui características naturais, ou seja, forma-se através de processos pedogenéticos específicos, nunca podendo ser confundido com compactação.

O horizonte com caráter coeso apresenta maiores valores de densidade do solo, em relação aos demais horizontes do perfil, geralmente encontra-se na faixa de 1,50 a 1,68 kg dm<sup>-3</sup>, com média de 1,59 kg dm<sup>-3</sup> (LIMA NETO *et al.*, 2009). São horizontes com textura média, argilosa ou muito argilosa, sendo encontrados entre 30 e 70 cm de espessura (BA e, ou Bt, Bw), mas podendo chegar até 1 m de profundidade, com fraca organização estrutural, geralmente maciço, estando intimamente relacionados com depósitos sedimentares, muito intemperizados, referente ao período terciário, representados pela Formação Barreiras (LIMA NETO *et al.*, 2009). Nos solos do Estado do Ceará esse caráter pode aparecer em maior profundidade associados ao horizonte Bt de Argissolos (Vieira *et al.*, 2012).

Horizontes com caráter coeso possuem teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ataque com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) inferiores a 80 g kg<sup>-1</sup>, conferindo a esses solos as cores amareladas, geralmente bruno-amarelada, tendendo muitas vezes para cores mais pálidas, brunoamarelado-claro, bruno-claro-acinzentado ou bruno no matiz 10 YR, com valores 5 e 6 e cromas entre 3 e 6 (RIBEIRO, 2001).

São geralmente horizontes com baixa CTC, valores inferiores a 5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, refletindo a mineralogia caulínica desses materiais, com resistência à penetração elevada, causando sérias implicações ao crescimento das raízes, geralmente com valores maiores que 3 MPa, valor indicado como suficiente para impedir severamente ou parar o crescimento radicular e limitar a emergência de plântulas (MULLINS, 1987; MULLINS, 1990).

As limitações físicas mais pronunciadas dos horizontes com caráter coeso seriam, no período seco, a dureza do solo e no período chuvoso a falta de aeração (REZENDE, 2000), causando uma redução na profundidade efetiva do solo e no desenvolvimento radicular das plantas (CORRÊA *et al.*, 2008).

### 2.3 Gênese do caráter coeso

Os compostos de baixa cristalinidade como material sílico-aluminoso, poderiam estar relacionados com a gênese dos horizontes com caráter coeso, uma vez que esses materiais causam uma coesão fraca e temporária, sendo influenciado por ciclos de umedecimento e secagem, onde no período seco esse material passaria por processo de

polimerização e precipitação, e no período mais úmido, aconteceria uma despolimerização, dando características ao solo de friabilidade (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

Vieira (2013), avaliando uma topossequência, observou que na parte mais baixa do relevo, foram encontrados valores maiores de densidade do solo, associando este fenômeno a maior concentração de sílica amorfa. Vieira sugere que devido ao relevo mais rebaixado, a sílica é transportada da parte mais alta para a parte mais baixa do relevo, ocorrendo acúmulo gradativo, e posterior aparecimento de um horizonte com caráter coeso.

A formação do horizonte com caráter coeso poderia está associado ao processo de argiluviação de argilas fina (menor que 0,2  $\mu\text{m}$ ), transcoladas, entre ou dentro do mesmo horizonte, aumentando a superfície de contato entre os constituintes do solo (agregados e partículas) e promovendo expressivo aumento de resistência. Além disso, por serem partículas tão finas, ao longo do tempo poderiam obstruir os poros, aumentando mais ainda a coesão (CORRÊA *et al.*, 2008). Para Lima Neto *et al.* (2009), o caráter coeso se originaria em função do processo de argiluviação e entupimento de poros, onde haveria uma redução da permeabilidade, aumentando as condições de redução, e posterior rompimento da estruturado solo.

Ferreira *et al.* (1999) sugeriram que, nos Latossolos estudados, a caulinita permite um ajuste face a face, isso ocorreria devido à forma placóide que a caulinita possui, contribuindo para o adensamento. Porém, mais recentemente, Giarola *et al.* (2009) observaram que as caulinitas dos horizontes com caráter coeso apresentam ordenamento estrutural inferior ao da caulinita padrão, não favorecendo a associação do empacotamento da fração argila com a manifestação do caráter coeso.

Outras hipótese é a presença de compostos orgânicos pouco polimerizados aumentando a coesão (LIMA NETO *et.al*, 2009) Entretanto, Duarte (2015) verificou em solos do Ceará, que não houve diferença na contribuição das frações de ácidos fúlvico, ácidos húmicos e humina, indicando que o material orgânico não favorece a cimentação dos horizontes coesos.

### ***2.3.1 Silício e alumínio na gênese do caráter coeso***

O silício é o segundo elemento mais abundante, em peso, na crosta terrestre, sendo a forma dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) encontrada como constituinte mais importante da maioria das rochas e minerais (RAIJ; CAMARGO 1973; DEER;HOWIE; ZUSSMAN, 1966).

O silício pode ser encontrado no solo na forma cristalina, amorfa e em solução, sendo o ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) a forma mais predominante em solos, em relação à dissolução de minerais. Mas em ambientes naturais com soluções ricas em cátions bivalentes, os ácidos polissilícicos também podem aparecer como um componente estável durante alguns meses. Assim esse elemento ocorre no solo numa transição gradual entre ácido monossilícico e formas minerais sólidas, como exemplo do quartzo (DIETZEL, 2000).

Podendo constituir-se em importante agente cimentante, considerando a quantidade fator tão importante quanto a efetividade na cimentação (MOREAU *et al.*, 2006). Teores de Fe, Si e Al de baixa cristalinidade, encontrados em horizontes fragipã e duripã, funcionam como agente cimentante desses horizontes (CORRÊA *et.al*, 2015) como também de argilominerais silicatados agindo como ligantes (NORFLEET ; KARATHANASIS, 1996; ROLIM NETO; SANTOS, 1994).

Corrêa *et al.* (2015) sugeriram que Si e, principalmente, Al em formas de baixa cristalinidade funcionariam como agentes cimentantes químicos, devido à alta quantidade encontrada desses elementos em horizontes fragipã e duripã, obtidos pela extração com oxalato de amônio. Nos horizontes com cimentação temporária há uma baixa permeabilidade do solo, reduzindo o fluxo das soluções e favorecendo a retenção e precipitação da sílica, na época de secagem do solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001; CHADWICK; HENDRICKS; NETTLETON, 1987), dessa forma, os ciclos de umedecimento e secagem, seriam fundamentais para a gênese do caráter coeso, juntamente com a presença de aluminossilicatos de baixa cristalinidade.

Duarte (2015) mostrou que, mesmo em pequena quantidade, o silício extraído de horizontes com caráter coeso em relação a um horizonte sem o caráter coeso é aproximadamente o dobro, ou seja, mesmo em pequenas quantidades a sílica de baixa cristalinidade pode estar contribuindo para a formação do caráter coeso.

Os óxidos de Fe e Al são os principais compostos capazes de adsorver sílica. Na forma de ácido monossilício ( $H_4SiO_4$ ), o silício presente na solução do solo pode precipitar e sofrer adsorção por esses óxidos, principalmente óxidos de Al, formando polímeros coloidais (Al-Si) (DOUCET *et al.*, 2001). Um dos fatores que influenciam na maior ou menor adsorção de sílica é o pH (CORNELIS *et al.*, 2011), pois na faixa ácida, mesmo em quantidades muito baixas, o alumínio favorece a precipitação da sílica coloidal. Entretanto, em meio alcalino, são necessárias quantidades muito maiores para promover a precipitação da sílica monomérica (OKAMOTO *et al.*, 1957 *apud* ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

O ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) pode difundir-se e, ao encontrar áreas superficiais maiores, como argilas, sesquióxido e superfícies minerais primárias degradadas, ocorrem adsorção. Assim a coesão temporária que a sílica pode causar vai depender da quantidade de sílica em solução e a quantidade de superfícies disponíveis para adsorção de sílica (CHADWICK; HENDRICKS; NETTLETON, 1987). No período seco as moléculas de  $H_4SiO_4$  vão sofrer polimerização e precipitar na forma de  $SiO_2$ , ligando partículas uma a outra (fenômeno observado quando as partículas estão próximas), aumentando o grau de coesão ao máximo. Observa-se esse fenômeno em horizontes contendo material sílico-aluminoso (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2001).

### ***2.3.2 Ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso***

A gênese de solos encontrados na Austrália chamados de hardsettings, correlatos ao caráter coeso, está relacionada a eventos cíclicos de umedecimento e secagem do solo. Entretanto, o desenvolvimento da resistência não é um fenômeno puramente físico, onde a cimentação química teria um papel fundamental nesse processo (CHARTRES *et al.* 1990). Freitas *et al.* (2016) observou que com nove ciclos de umedecimento e secagem houve um aumento dos valores de resistência a penetração do solo, indicando também que a gênese de solos com caráter coeso é parecida com os solos descritos na Austrália.

Vieira (2013) observou que conjuntamente aos ciclos de umedecimento e secagem houve um acréscimo de sílica e de alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes coesos, evidenciando a possível relação conjunta entre uma cimentação física (ciclos de umedecimento e secagem) e uma cimentação química (sílica e alumínio de baixa cristalinidade).

No processo de umedecimento e secagem do solo, forças capilares formam pontes interagregados, originando perturbação devido a interfaces água ar, portanto a força de coesão é atribuída ao filme de umidade, resultando em alterações no volume total da amostra (BAUMGARTL E KÖCK, 2004). A cada processo de umedecimento e secagem do solo nova modificação ocorrerá em sua estrutura, em razão das mudanças no estado de energia, com reflexos principalmente na rede porosa do solo (BRESSION E MORAN, 2003).

Tessier *et al.* (1990), verificaram que a exposição de material caulínítico a rápida hidratação provocou a formação de agregados de partículas de tamanho entre 0,5 e 10  $\mu m$ , já o umedecimento lento provocou arranjo grosseiro face a face, mostrando mudanças também na microestrutura do solo. Santos (2000) em experimento com variação dos tempos de

secagem entre ciclos de umedecimento evidenciou a formação de crostas estruturais e fendilhamento, associados à migração de colóides e hidratação diferencial.

Portanto, alternância nos ciclos de umedecimento e secagem causaria no período seco a desidratação dos agentes cimentantes e a consolidação da matriz argilosa, no entanto, no período úmido, os agregados seriam destruídos devido o aumento da pressão do ar e seu interior (GIAROLA E SILVA, 2002). Dessa forma alterando a estrutura do solo e contribuindo para a gênese do caráter coeso (Ribeiro, 1986).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do solo e da área experimental

O trabalho foi desenvolvido com material de horizonte com caráter coeso da área dos Tabuleiros Costeiros do Estado do Ceará. O perfil utilizado está localizado no município de Fortaleza, na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, com clima tropical chuvoso com chuvas de verão, segundo a classificação de Koppen, e média pluviométrica de 1.338 mm. Relevo de planície litorânea e tabuleiros pré-litorâneo e composto por vegetação do complexo litorâneo (IPECE,2016). Esse perfil foi anteriormente caracterizado e classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018), como Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (figura 1) (VIEIRA, 2013). O solo foi coletado de maneira deformada (sem preservação da estrutura) com auxílio de faca e martelo pedológico, transportado em sacos plásticos e colocado para secar ao ar. Após seca, a amostra de solo foi destorroada e peneirada em peneira com malha de abertura de 2 mm, obtendo assim a Terra fina seca ao ar (TFSA). A coleta foi apenas do horizonte com caráter coeso Bt2, caracterizado como de textura argilo-arenosa, estando a uma profundidade entre 79 e 112 cm e teor de argila de 33,8% (VIEIRA, 2013).

**Tabela 1:** Caracterização química do solo

<b>ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico</b>										
<b>Cátions trocáveis</b>										
<b>Hor.</b>	<b>Prof.</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>Al</b>	<b>H</b>	<b>SB</b>	<b>T</b>	<b>V</b>
	cm	Cmolc Kg <sup>-1</sup>								
										%
Ap1	0-10	1,6	2,2	0,17	0,37	0,6	1,6	4,35	6,55	66
Ap2	out/17	1	2,4	0,11	0,43	0,6	1,8	3,93	6,33	62
E	17-39	1,2	3	0,07	0,38	0,6	1,8	4,65	7,05	66
BE	39-63	1	2	0,05	0,37	0,8	1,4	3,43	5,63	61
Bt1	63-79	0,6	2,6	0,05	0,38	0,9	1,4	3,63	5,93	61
Bt2	79-112	1	3	0,04	0,34	0,7	2	4,38	7,08	62
Bt3	112-152	1,4	2	0,05	0,43	0,3	2	3,88	6,18	63
Bt4	152-187 +	0,8	2,8	0,06	0,37	0,3	2,6	4,02	6,92	58

SB:Soma de bases; T: CTC total; V%: Saturação por bases.

Autor: Vieira, 2013.

**Tabela 2:** Caracterização física do solo.

<b>ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico</b>				
<b>Hor.</b>	<b>Prof.</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>
	<b>Cm</b>		<b>g Kg<sup>-1</sup></b>	
Ap1	0-10	861	94	45
Ap2	10-17	788	138	74
E	17-39	648	164	188
BE	39-63	672	78	250
Bt1	63-79	580	103	317
Bt2	79-112	596	66	338
Bt3	112-152	536	167	297
Bt4	152-187 +	515	219	266

Autor: Vieira, 2013.

**Figura 1:** Perfil do Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico com indicação do horizonte com caráter coeso (Bt2), usado no experimento.

Foto: Juliana Matos Vieira, 2012. Adaptada pelo autor.

### 3.2 Extrações de silício e alumínio amorfo por oxalato de amônio

A extração dos compostos de baixa cristalinidade foi realizada utilizando-se o oxalato de amônio, também chamado de reagente Tamm, que permite dissolver aluminossilicatos, sílica e óxidos de baixa cristalinidade que contêm silício e outros constituintes. Isso decorre do alto poder complexante do ânion oxalato e do efeito tamponante e fortemente ácido da solução de oxalato de amônio, que pela ação conjugada desses dois efeitos dissolve formas não somente trocáveis como também não trocáveis do Al, incluindo formas amorfas, de baixa cristalinidade e, em parte também, de formas de Al complexadas com a matéria orgânica (Mckeague & Day, 1966; Mckeague et al., 1971; Parfitt & Henmi, 1982; Kodama & Ross, 1991; García-Rodeja et al., 2004)

Para a extração, foram misturados 700 ml de  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  e 530 ml de  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  para obtenção da solução usada, a qual teve o pH ajustado (com ácido oxálico) para o valor 3,0. A extração foi realizada em frascos escuros, agitando-se em agitador horizontal 15g de TFSA e 750 ml da solução durante 4 horas, com rotação de 150 rpm (McKEAGUE; DAY, 1966) e posterior separação das partículas de solo da solução por centrifugação de 10 minutos a 1000 rpm (PANSU; GAUTHEYROU, 2003). O sobrenadante foi armazenado em frascos escuros para quantificação dos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_2$ , e o solo foi lavado com água destilada e colocado para secar na estufa a  $60^\circ \text{C}$  até atingir peso constante.

### 3.3 Adições de Si e Al com ácido silícico e cloreto de alumínio

Após a extração dos compostos de baixa cristalinidade foi realizada as saturações de acordo com cada tratamento: silício (Si), alumínio (Al), silício + alumínio (Si+Al) e água destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (tabela 3).

As soluções contendo Si e Al foram preparadas com base nos trabalhos de Duarte (2015) e Vieira (2013), nos quais as concentrações de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_2$  em horizontes com caráter coeso variaram de 0,58 a 9,24 g/kg de solo e de 4,22 a 20,37 g/kg de solo, respectivamente. Então, procurou-se adicionar Si e Al utilizando soluções para ressaturar as amostras, utilizando-se concentração com, no mínimo, 10 vezes os valores encontrados por Duarte (2015) e Vieira (2013). Na preparação das soluções foi utilizado ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) como fonte de Si, com pH no valor de 7,3 e cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3$ ) como fonte de Al, com valor de pH 5,5, ambos diluídos em concentração de 800 mg/L de Si e 2000 mg/L de Al.

Essas concentrações foram obtidas através de transformação dos valores encontrados nos solos utilizados por Vieira (2013) e Duarte (2015).

### **3.4 Tratamentos e delineamento adotado**

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado em fatorial  $(4 \times 3) + 1 + 1$ , com cinco repetições. O primeiro fator corresponde às saturações com soluções de: silício (Si), alumínio (Al), silício + alumínio (Si+Al) e água destilada ( $H_2O$ ), as quais foram aplicadas após a extração do material amorfo (por oxalato). O segundo fator trata dos ciclos de umedecimento e secagem em três níveis: 10, 20, e 30 ciclos (Tabela 3).

Em adição aos fatores foram realizados um tratamento controle (SE 10) e um tratamento adicional (SE 30). No tratamento controle não foi realizada a extração do material de baixa cristalinidade, mas foi submetido a dez ciclos de umedecimento e secagem com saturação por água destilada, já no tratamento adicional também não foi realizada a extração do material de baixa cristalinidade, mas foi submetido a 30 ciclos de umedecimento e secagem com saturação por água destilada.

O material do horizonte com caráter coeso (TFSA) foi acomodado em tubos PVC de dimensões de 5 cm de altura por 2,5 cm de diâmetro, com um tecido no fundo de cada tubo para evitar a perda de solo. O umedecimento consistiu em colocar os tubos em uma bandeja com água destilada (controle), ou solução contendo silício, ou alumínio, ou silício mais alumínio, dependendo dos níveis do fator em questão. Inicialmente foi colocado o líquido até completar dois terços da altura das amostras, posteriormente o volume foi completado até altura máxima do cilindro. Tal procedimento foi adotado para garantir ao máximo o preenchimento dos poros do solo por capilaridade. Após o aparecimento de um filme de água na superfície da amostra, a saturação foi completa, e as amostras prontas para secagem em estufa à temperatura de 45° C, buscando simular as temperaturas de secagem que ocorrem naturalmente no campo.

**Tabela 3:** Resumo dos tratamentos.

<b>Fator</b>	<b>Níveis</b>	<b>Descrição dos tratamentos</b>
<b>Ciclos</b>	10	Colocou-se a amostra de TFSA nos tubos de PVC, em seguida foi colocado na bandeja contendo a solução a depender do nível do fator de saturação e espera-se a ascensão capilar, depois foi levada a estufa a 45° até peso constante.
	20	
	30	
<b>Saturações</b>	Solução contendo Si	Amostra de TFSA passou pelo processo de extração com solução de oxalato de amônio e depois foi colocado nos tubos de PVC e iniciam- se os ciclos de umedecimento e secagem com ácido silícico nos três níveis de ciclo (10,20,30)
	Solução contendo Al	Amostra de TFSA passou pelo processo de extração com solução de oxalato de amônio e depois foi colocado nos tubos de PVC e iniciou- se os ciclos de umedecimento e secagem com cloreto de alumínio nos três níveis de ciclo (10,20,30)
	Solução contendo Si + Al	Amostra de TFSA passou pelo processo de extração com solução de oxalato de amônio e depois foi colocado nos tubos de PVC e iniciou- se os ciclos de umedecimento e secagem com ácido silícico e cloreto de alumínio nos três níveis de ciclo (10, 20,30)
	Água destilada	Amostra de TFSA passou pelo processo de extração com solução de oxalato de amônio e depois foi colocado nos tubos de PVC e iniciou- se os ciclos de umedecimento e secagem com água destilada nos três níveis de ciclo (10,20,30).
<b>Tratamento controle (SE 10)</b>	Sem extração + saturação com água, 10 ciclos de umedecimento e secagem.	Foi Colocada a amostra de TFSA nos tubos de PVC e iniciou-se 10 ciclos de umedecimento e secagem em saturação com água destilada.
<b>Tratamento adicional (SE 30)</b>	Sem extração + saturação com água e 30 ciclos de umedecimento e secagem.	Foi Colocada a amostra de TFSA nos tubos de PVC e iniciou-se 30 ciclos de umedecimento e secagem em saturação com água destilada.

Fonte: Autor

**Figura 2:** Foto ilustrando o processo de umedecimento para os tratamentos com ciclos de umedecimento e secagem.



Fonte: Autor

### **3.5 Quantificação de compostos de baixa cristalinidade ou amorfos (Si e Al)**

A determinação dos compostos amorfos foi realizada nos tratamentos SE, Al, Si e Si+Al no horizonte coeso Bt2 e para cada ciclo, visando um comparativo nos teores de Si e Al antes e depois dos tratamentos. Essa extração foi realizada usando-se oxalato ácido de amônio, conforme listado no item 6.2.2 Os teores de Si, e Al foram determinados por espectrofotometria de emissão óptica em plasma (ICPOES).

### **3.6 Análises físicas**

#### **3.6.1 Análise granulométrica**

Foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio e agitação rápida durante 10 minutos (EMBRAPA, 1997). Após a dispersão, o silte e a argila foram separados da fração areia por peneiramento, sendo utilizada uma peneira de 270 mesh. A fração argila foi separada por sedimentação, seguindo-se a lei de Stokes. O silte foi determinado pela diferença entre os teores de areia e argila.

### 3.6.2 Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ )

Para a determinação da permeabilidade do solo ao ar foi usada a metodologia proposta por Kirkham (1946), onde as amostras indeformadas foram equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa e o reservatório foi pressurizado com pressão até 1 kPa, para cada tensão utilizada. Após a aplicação dessa pressão de ar, esperou-se a pressão atingir valor zero ou estabilizar e mediu-se o tempo gasto para o ar passar pela amostra.

A permeabilidade ao ar da amostra foi calculada utilizando a equação a seguir:

$$K_{ar} = \frac{\mu LV}{APa} \cdot |S| \quad (1)$$

Em que:

$K_{ar}$ : é a permeabilidade do solo ao ar ( $m^2$ );

$\mu$ : é o coeficiente de viscosidade dinâmica do ar ( $18,1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ );

$V$ : é o volume do reservatório ( $m^3$ );

$P_a$ : é a pressão atmosférica ao nível do mar (Pa);

$L$ : é o comprimento da amostra (m);

$A$ : é a área da amostra ( $m^2$ ); e

$S$ : é o módulo de declividade (ou slope), estimado estatisticamente por regressão linear a partir da relação logarítmica de pressão versus tempo.

### 3.6.3 Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ )

Após a realização da análise de permeabilidade ao ar, a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foi determinada pelo método direto em laboratório através do permeâmetro de carga constante. Nesse método, utiliza-se uma amostra com estrutura indeformada, sobre a qual se mantém uma lâmina constante, coletando-se, na parte inferior da amostra, o volume de água drenada em intervalos conhecidos de tempo (AMARO FILHO *et al.*, 2008). Para o estudo em questão foi realizada uma adaptação do método para que seja possível a determinação da  $K_{sat}$  nas amostras contidas nos tubos (Figura 3), que haviam sido destorroadas e submetidas a ciclos de umedecimento e secagem (VIEIRA *et al.*, 2012).

**Figura 3:** Condutividade hidráulica do solo saturado, método do permeâmetro de carga constante, com adaptação devido ao tamanho dos cilindros utilizados.



Fonte: Autor

A condutividade hidráulica foi calculada pela seguinte expressão:

$$K_{sat} = \frac{V_a \times L}{A \times t (h+L)} \quad (2)$$

Em que:

$K_{sat}$  = condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ );

$V_a$  = volume de água coletado na proveta durante o tempo  $t$

$A$  = Área da secção transversal da amostra (cm);

$L$  = comprimento da amostra (cm)

$h$  = Potencial de pressão (carga hidráulica do topo da amostra)

### **3.6.5 Resistência do solo à penetração ( $R_p$ )**

A umidade das amostras foi estabilizada na tensão de - 500 kPa na câmara de Richards. As amostras foram pesadas úmidas e posteriormente foi determinada a resistência à penetração. A umidade determinada pela seguinte fórmula:

$$\emptyset(g \cdot g^{-1}) = \frac{(MU-MS)}{MS} \quad (3)$$

Em que:

$\emptyset(g \cdot g^{-1})$  = Umidade em base massa;

MU(g) = Massa do solo úmido;

MS (g) = Massa do solo seco.

A resistência do solo à penetração é um dos métodos para avaliar o grau de resistência (coesão) do solo. Para cada fator e para cada nível, ao fim de cada ciclo de umedecimento e secagem foi verificada a resistência à penetração, após a estabilização da umidade. Após esse processo, a resistência do solo à penetração foi determinada com o auxílio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, com velocidade constante de penetração de  $0,01 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

#### 3.6.4 Densidade do solo ( $D_s$ )

Após as análises de condutividade hidráulica e de resistência do solo à penetração, a densidade do solo foi determinada nas amostras pela metodologia descrita em Blake e Hartge (1986). No laboratório, as amostras foram colocadas em estufa com temperatura de  $105^\circ\text{C}$  por aproximadamente 48 horas. Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa, colocadas em um dessecador e depois pesadas, sendo a densidade do solo obtida pela seguinte expressão:

$$\rho_s (gcm^{-3}) = \frac{\text{Massa do solo seco}}{\text{Volume total de solo}} \quad (4)$$

### 3.7 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, foi realizado o teste de tuckey a nível de significância de 5% para o fator saturação e teste de regressão para o fator ciclo, os tratamentos adicional e controle foram

analisado pelo teste de dunnett, utilizando software ASSISTAT versão 7.6- 2013 (SILVA; AZEVEDO, 2002).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resistência do solo à penetração (Rp)

As amostras foram submetidas a uma tensão de 600 KPa em câmara de Richards antes do início do ensaio de resistência à penetração, com a finalidade de obter uma umidade uniforme em todas as amostras, além de possibilitar a máxima expressão do efeito de coesão (Tabela 6). Saber a umidade do solo ( $\Theta$ ) no momento do ensaio de Rp é muito importante, já que a força de coesão se manifesta com maior expressão quando o solo está seco (TORMENA *et al.*, 2004) devido a maior coesão entre as partículas do solo (BELTRAME; GONDIN; TAYLON., 1981). Assim, quando o solo apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas apresentam-se mais próximas e dificultando a separação por força externa aumentando os valores de Rp (SILVEIRA *et. al*, 2010). No caso desse experimento os valores de Rp já estão ajustados com os valores de umidade.

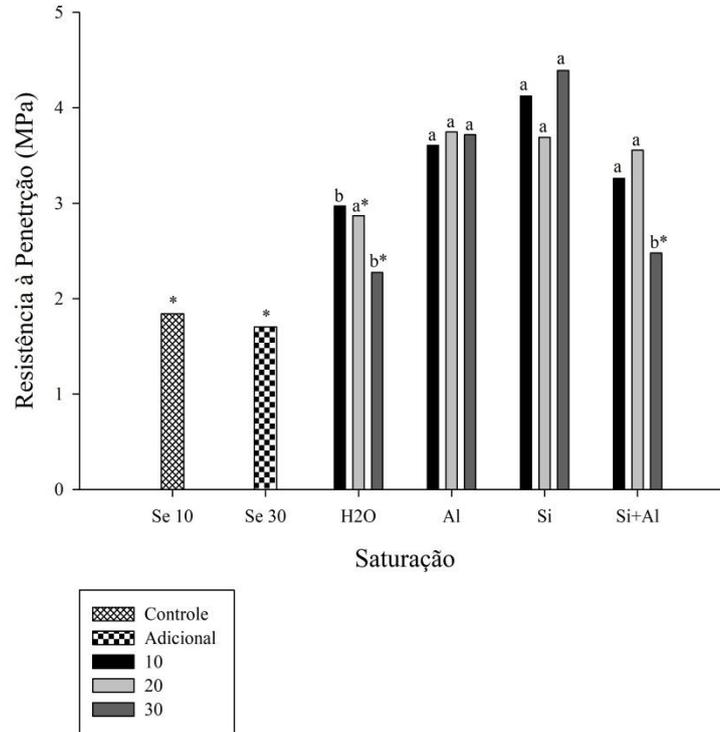
Verificou-se, comparando apenas os fatores ciclos, que não houve diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre as médias, no entanto ocorreu diferença estatística entre os tratamentos (Gráfico 1).

Observou-se que os valores encontrados para Rp no tratamento H2O foi maior (cerca de 60% de aumento) que os valores do tratamento controle e adicional (Gráfico 1). O incremento da Rp nesse tratamento (H2O) não era o esperado, pois foi realizada a extração do material de baixa cristalinidade, por oxalato de amônio, portanto os valores de Rp deveriam reduzir nessas amostras ao invés de aumentar, como verificado por Vieira (2012) que observou à participação dos compostos de baixa cristalinidade no aumento dos valores de Rp em solos com caráter coeso.

No entanto, isso pode ser explicado pelo fato de o horizonte utilizado nesse experimento ser de textura argilosa, possuindo 331 gramas de argila por quilo de solo (Tabela 4), essas partículas mais finas podem fazer pontes com partículas de areia causando esses maiores valores de Rp no tratamento com água (VIEIRA *et.al*, 2012), visto que a porcentagem de areia também é alta (Tabela 4). Outros estudos mostram que misturas artificiais de areia com pouquíssima quantidade de argila podem causar um comportamento de coesão (MULLINS, 1997). Bezerra *et.al*, 2015 observaram que em horizontes coesos ocorre uma redução significativa no volume de poros vazios, bem como na conectividade desses poros, quando comparados a solos sem o caráter coeso, segundo os autores isso pode

ocorre pelo predomínio de areia média e fina combinada com o processo de argiluviação, aumentando os valores de Rp (Tabela 4).

**Gráfico 1:** Resistência do solo a penetração (MPa).



Letras minúsculas: Comparação estatística entre tratamentos; Médias seguidas pela mesma letra minúsculas não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; (\*): Diferiram estatisticamente do tratamento controle e adicional.

Fonte: Autor

**Tabela 4:** Análise granulométrica do horizonte Bt2, do Argissolo Amarelo Eutrocoeso Típico.

#### GRANULOMETRIA

Horizonte	g/Kg							
	Argila	Silte	Areia	A.M. G*	A.G*	A.M*	A.F*	A.M. F*
Bt2	331	79	590	27	67	316	150	30

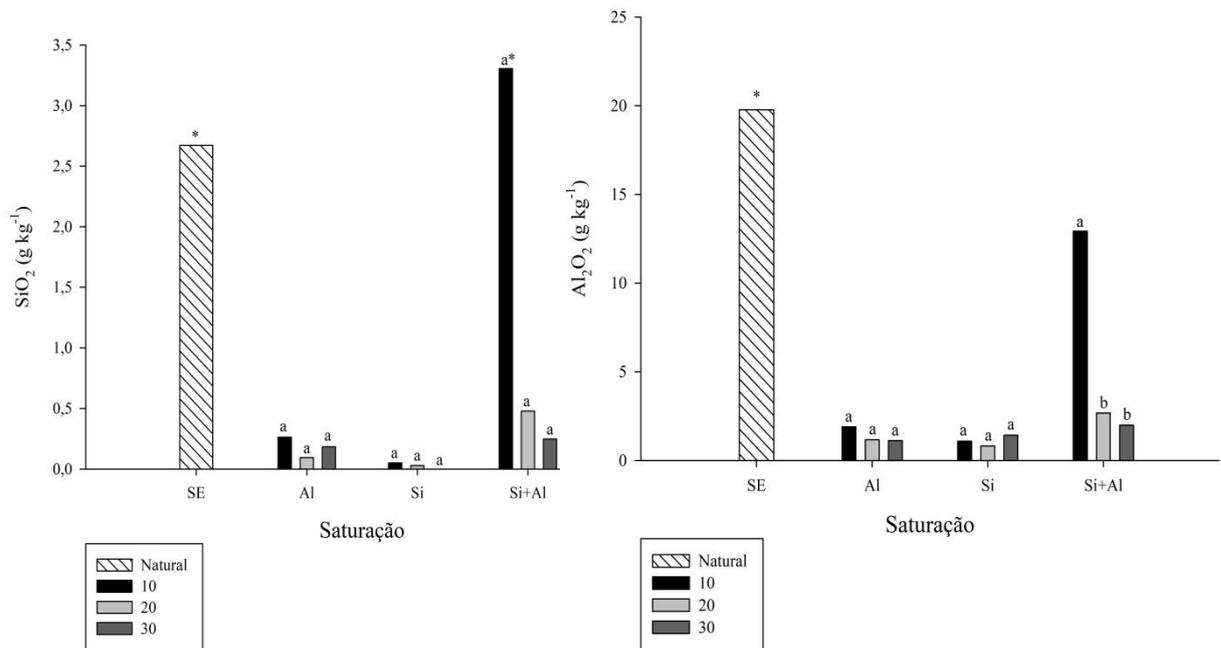
\*A.M.G: Areia Muito Grossa; A.G: Areia Grossa; A.M: Areia Média; A.F: Areia fina; A.M.F: Areia muito fina.

Apesar de o tratamento com H2O não ter diferença significativa entre os ciclos de umedecimento e secagem, percebe-se tendência de nos primeiros 10 ciclos os valores de Rp serem maiores, o mesmo fenômeno foi visto por Freitas *et al.* (2016) ao verificar que os valores de Rp foram maiores nos nove primeiros ciclos de umedecimento e secagem

utilizando água, o autor explica que isso deve-se ao rearranjo das partículas de argila e areia fina.

O tratamento Si foi o que obteve maiores valores de Rp quando comparado entre os tratamentos (Tabela 6), no entanto foram encontrados baixa quantidade de  $\text{SiO}_2$  no tratamento Si (Gráfico 2). Flach, Netteon e Nelson (1974) observaram em horizontes duripã a evidência da cimentação por compostos de baixa cristalinidade de sílica mesmo em pequena quantidade. Duarte (2015) também observou compostos de baixa cristalinidade contendo Si e Al em horizontes com caráter coeso em pequenas quantidades, mas quando comparado com horizontes sem caráter coeso a quantidade encontrada foi o dobro, ou seja, mesmo em pequena quantidade compostos de baixa cristalinidade contendo principalmente Si, já seriam o suficiente para causar maior adensamento das partículas, elevando os valores de RP.

**Gráfico 2:** Silício e Alumínio na forma de óxido de silício e óxido de alumínio.



Médias seguidas pela mesma letra minúsculas (comparação entre tratamentos) não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autor

Em relação aos ciclos de umedecimento e secagem, apesar de também não ter ocorrido diferença estatística ( $p > 0,05$ ), observa-se a mesma tendência dos valores de Rp, em que menos ciclos (10) os teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foram mais altos, enquanto que em maior

número de ciclos (30) há uma redução dos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sendo mais evidente no tratamento Si+Al (gráfico2).

Observando os tratamentos, verifica-se que os maiores valores encontrados para  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , foram no tratamento Si+Al, médias variando de 0,2 á 3,3 g/kg e 2,0 á 13,0 g/kg respectivamente (Gráfico 2). É provável que deva ter ocorrido alguma interação entre os elementos Al e Si, causando uma co-precipitação na forma de aluminossilicatos e hidroxialuminossilicatos (DOUCET *et. al*, 2001), assim causando um acréscimo significativo no tratamento Si+Al.

Os valores de pH encontrados para os tratamentos e ciclos estão na faixa ácida, o que possibilitou a polimerização e precipitação de sílica de baixa cristalinidade (Tabela 5), segundo Ilber *et.al* (1979) o pH do solo entre ( $2 < \text{pH} < 7$ ), o ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_2$ ) se polimeriza para formar precipitado de sílica de baixa cristalinidade, reduzindo a quantidade de silício (Si) solúvel, sendo este adsorvido por óxidos e hidróxidos.

**Tabela 5:** pH do solo em água.

Tratamentos	pH		
	Ciclos		
	10	20	30
SE	5,0		
H2O	6,2		
Si	3,6	4,3	3,9
Al	3,4	3,4	3,4
Si +Al	3,4	3,4	3,3

SE: solo sem a extração de Si e Al não cristalinos.

Fonte: Autor

Então os valores encontrados para Rp e teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mostram a redução de permeabilidade do solo, quando o mesmo é saturado com soluções contendo Si e Al, segundo. Segundo Bezerra (2011) o silício, em horizontes com caráter coeso, pode ser transportado dos horizontes superiores, que possuem textura mais arenosa, típica dos tabuleiros costeiros, acumulando nos horizontes subjacentes que possuem textura mais argilosa com maior teor de areia fina, reduzindo a permeabilidade, possibilitando a acumulação e precipitação de silício forma de  $\text{SiO}_2$  (BEZERRA, 2011), formando pontes entre partículas do solo aumentando o efeito da coesão (ARAÚJO FILHO *et.al*, 2001).

De modo geral os valores de Rp foram mais altos no tratamento Si seguido do tratamento Al com médias gerais de 3,96 e 3,52 Mpa (Tabela 6), são valores muito altos, os

valores médios de resistência do solo a penetração para que não haja nenhum problema com o desenvolvimento radicular é de 0 a 2 MPa, valores acima de 2 MPa já causam impedimento (ROQUE *et.al*, 2003).

### 4.3 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado (Ksat)

Os menores valores de condutividade hidráulica foram encontrados nas amostras submetidas ao tratamento com silício (Si), no qual a média geral do Ksat foi de 6,38 cm h<sup>-1</sup> (Tabela 6). Na sequência, os tratamentos com Al e Si+Al apresentaram valores intermediários de Ksat. Por outro lado, a maior média de Ksat ocorreu no tratamento com água 38,84 cm h<sup>-1</sup> (Tabela 6). Isso ocorre devido a uma reorganização das partículas, onde a quantidade e a estrutura dos poros do solo são modificadas, principalmente os macroporos, portanto os resultados obtidos corroboram com a hipótese de que os compostos de baixa cristalinidade contribuem para a gênese do horizonte com caráter coeso, como citado por Vieira *et.al* (2012).

Deve-se destacar que os macroporos permitem a condução de água no solo e a condutividade hidráulica saturada de um solo é obtida pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, assim a forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos são características dependentes (MESQUITA E MORAIS, 2004).

**Tabela 6:** Médias gerais dos tratamentos para cada análise realizada.

Tratamentos	Ds (gcm <sup>3</sup> )	RP (MPa)	Ksat (cm h <sup>-1</sup> )	Kar (µm <sup>2</sup> )			
				6KPa	10KPa	33KPa	100KPa
H2O	1,75 b	2,64 c	38,84 a	2,80 ab	2,96 a	3,37 a	3,06 ab
Si	1,72 bc	3,96 a	6,38 b	2,04 bc	1,73 b	3,00 a	2,82 b
Al	1,97 a	3,52 ab	11,82 b	3,63 a	3,04 a	3,92 a	4,17 a
Si+Al	1,63 c	2,98 bc	13,43 b	1,66 c	1,67 b	1,86 b	2,01 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tuckey a nível de significância de 5% de probabilidade.

Fonte: Autor.

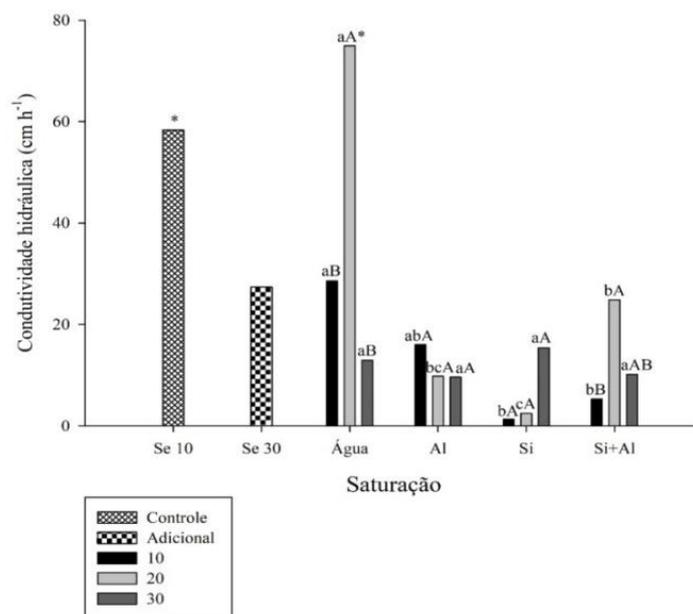
Segundo Mesquita e Moraes (2004) a condutividade hidráulica tem alta correlação com a porosidade do solo e por isso uma relação indireta com a densidade do solo, assim foi verificada que o tratamento com Si e com Al foi o que apresentaram maiores valores de densidade, médias de 1,72 1,97 g cm<sup>-3</sup> respectivamente (Tabela 6). A sílica e alumínio de

baixa cristalinidade têm maior atuação nos horizontes coesos devido à baixa permeabilidade, favorecendo o acúmulo, retenção e precipitação da sílica e de outros compostos silicoaluminosos no período de secagem do solo (CHADWICK; HENDRICK; NETTLETON, 1987) aumentando os efeitos de coesão.

Segundo Reichert *et al.* (2007) o aumento da Ds e a redução da porosidade alteram a capacidade de trocas gasosas, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência do solo à penetração, conseqüentemente impedindo o crescimento de raízes, visto que densidade do solo crítica para solos da classe textura argilosa é de 1,30 a 1,40 Mg m<sup>3</sup> (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003).

Analisando a influência da quantidade de ciclos de umedecimento e secagem (10, 20 e 30), observa-se que não houve um comportamento uniforme (Gráfico 3).

**Gráfico 3:** Condutividade hidráulica do solo saturado (cm h<sup>-1</sup>).



Médias seguidas pela mesma letra minúsculas (saturação) não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; Médias seguidas de letras maiúsculas (ciclo) não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; (\*) não diferem estatisticamente do tratamento controle.

Fonte: Autor

Entretanto, observa-se um decréscimo do Ksat do tratamento controle (SE 10) para o tratamento adicional (SE 30) (Gráfico 3), evidenciando o efeito de ciclos de umedecimento e secagem na porosidade do solo com a maior formação de microporos e

redução de macroporos, como descrito por Lima *et al.* (2005). Segundo Viana *et. al.*, (2004) solos muito argilosos têm uma tendência em ocorrer um reajamento da partículas do solo após 10 ciclos de umedecimento e secagem.

#### 4.2 Permeabilidade do Solo ao ar (Kar)

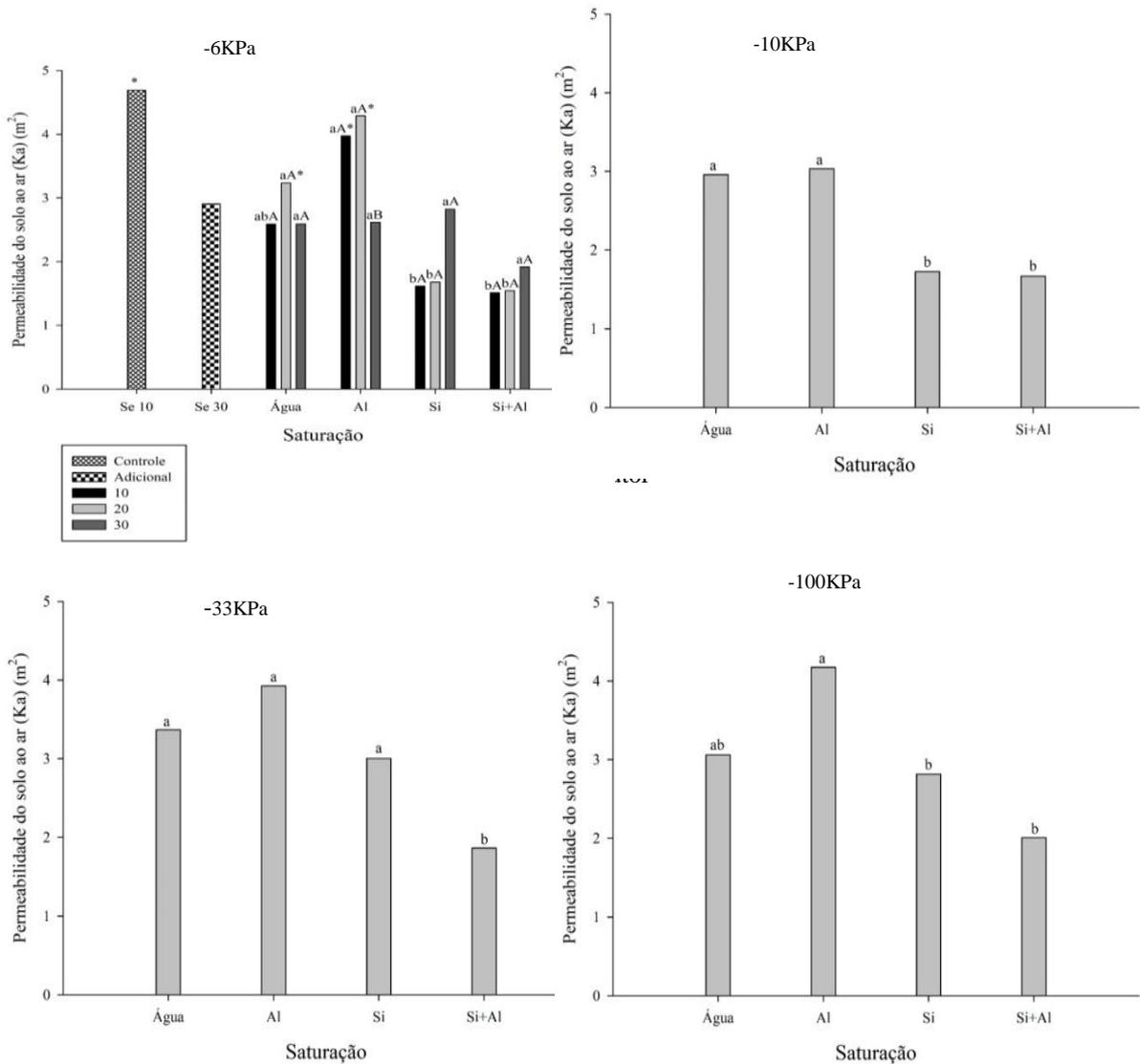
Os resultados da permeabilidade do solo ao ar na tensão de -6KPa nos tratamento controle e adicional (Sem Extração por oxalato de amônio) permitem avaliar a influência dos ciclos de umedecimento e secagem. A permeabilidade do tratamento (controle) foi superior à permeabilidade do tratamento (adicional) (Gráfico 4). Entretanto, não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os ciclos nas tensões de -10, -33 e -100 Kpa, por esta razão, nessa tensões só foi avaliado o fator saturação (Gráfico 4).

Segundo Klein e Libardi (2002), poros com diâmetro maior que 0,05 mm que perdem a água em tensões menores que -6 kPa são chamados de macroporos e após esse potencial a Kar tem menor taxa de variação (MENEZES, 2016), enquanto que os poros com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm que são esvaziados a tensões entre -6 e -1500 kPa, são chamados de microporos. Então, no caso desse experimento as tensões escolhidas avaliaram a faixa dos microporos do solo.

Avaliando os ciclos de umedecimento e secagem o tratamento Si e Si + Al (Tensão de -6 KPa) foram os menores, com médias de 1,61 a 1,67  $\mu\text{m}^2$  e 1,51 a 1,54  $\mu\text{m}^2$ , respectivamente (Gráfico 4). Brito *et. al.* (2015) ao fazer mapas de predição para permeabilidade ao ar verificou que Kar em -10Kpa possuía altos valores quando comparado com Kar em -6 Kpa ou seja, com a aplicação de uma tensão mais alta, provoca-se o esvaziamento de poros com raios menores, o que aumenta a conectividade e, conseqüentemente, o fluxo de ar.

Por outro lado, observa-se que com o aumento das tensões, os valores de permeabilidade ao ar aumentaram conseqüentemente. Com média geral para Si de 2,82  $\mu\text{m}^2$  e a 2,01  $\mu\text{m}^2$  para Si+Al, para uma tensão de -100Kpa (Gráfico 4). No entanto, os tratamentos Si e Si+Al foram os tratamentos que obtiveram os menores valores de Kar, isso ocorre devido a uma maior quantidade de microporos, que ao serem submetidos a maiores tensões se esvaziam dando lugar ao ar, e menor quantidade de macroporos, evidenciado também nos valores de Ksat (macroporosidade) quando encontrados valores muito baixo comparado aos demais tratamentos (Al e H2O).

**Gráfico 4:** Permeabilidade do solo ao ar ( $\mu\text{m}^2$ ) em diferentes potenciais matriciais.



Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente entre si ao nível de significância de 5 % submetidas ao teste de Tukey. Os potenciais de -10, -33 e -100Kpa não houve diferença entre os ciclos 10,20,30, assim os gráficos só apresentam valores das saturações.

Fonte: Autor

Dantas *et al.* (2014) sugeriram que em solos com caráter coeso ocorrem perdas de argila e vedação dos poros pela areia fina, ocorrendo a diminuição da macroporosidade e o aumento da microporosidade, fato evidenciado no tratamento H<sub>2</sub>O. Segundo Silva *et al.*, (2009) o máximo valor de permeabilidade é alcançado com solo seco, diminuindo progressivamente com o umedecimento do solo, até próximo de zero na saturação (SILVA *et al.*, 2009), assim pode-se dizer que a permeabilidade ao ar é inversamente relacionada com

o conteúdo de água no solo, quanto maior a quantidade de poros com água, menor a permeabilidade do solo ao ar (BALL E SCHJONNING, 2002).

Os maiores valores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrados no tratamento Si+Al nos primeiros ciclos, também podem está associados a maior participação desses compostos de baixa cristalinidade na modificação da porosidade do solo, causando uma redução maior da macroporosidade. Apesar desses baixos valores de permeabilidade ao ar, os valores encontrados em todos os tratamentos não comprometem processos de trocas gasosas e de calor, pois estão acima de  $1\mu\text{m}^2$  (MCQUEEN E SHEPHENRD, 2002).

## 5 CONCLUSÃO

Silício contribui para a gênese do caráter coeso, proporcionando o incremento nos valores de  $R_p$  e redução nos valores de condutividade hidráulica do solo e permeabilidade do solo ao ar.

A quantidade de ciclos de umedecimento e secagem não influencia os valores dos parâmetros  $D_s$ ,  $R_p$ ,  $K_{sat}$ ,  $K_{ar}$ .

Os teores de Si e Al no tratamento Si+Al, indicam que há interação entre esses elementos, podendo haver a produção de algum composto aluminossilicatado que favorece o aumento dos valores dos parâmetros avaliados.

## REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In: **Congresso brasileiro de geologia**. Belém: Anais SBG, v. 2, 1988. p. 753-760.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do Solo - Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290p.
- ARAI, M. A. Grande Elevação Eustática do Mioceno e Sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. **Geologia**. USP Série Científica. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, out. 2006.
- 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: Anais. EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.
- ARAÚJO,V.D; REYES-PERES,Y.A; LIMA, R.O; PELOSI,A.P.M.R; MENEZE,L; CORDOBA,V.C; LIMA-FILHO,F.P. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, Série Científica. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006.
- BALL, B.C.; SCHJONNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. **Methods of soil analysis physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, (Book Series, 5), 2002. p.1141-1158.
- BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.68, p.57-65, 2004.
- BITTENCOURT, A.C. S.P., VILLAS BOAS, G S.; FLEXOR, J. M e MARTIN, L. Excursão sobre as formações quaternárias do litoral do Estado da Bahia– Livro guia. In: **Simpósio internacional sobre a Evolução Costeira no Quaternário**. São Paulo: Editado pelo programa de pesquisa e pós graduação em Geografia Física da UFBA, 1979. p. 115.
- BELTRAME, L.F.S.; GONDIN, L.A.P.; TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v. 5, p.145-149, 1981.
- BEZERRA, C.E.E. **Gênese e Micromorfologia de solos coesos em uma topossequência, traíri – ce**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 2011.
- BEZERRA, C.E. E; FERREIA, T.O; ROMERO, R.E; MOTA, J.C.A; COOPER, M. Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: Role of argilluviation and sorting of sand. **Journal compilation**, v. 53, n. 1, p.43, 2015.
- BEZERRA, F.H. R; MELLO, C.L; SUGUIO, K. A Formação Barreiras: recentes avanços e antigas questões, **geologia serie científica**. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 3- 6, 2006.
- BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A, (ed). **Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods**. **Madison : ASA**, Book Series 5.1, p.363-375, 1986.

BRITO A.S; LIBARDI, P.L, MOTA, J.C. A, MORAES, S.O. Espacialização da permeabilidade do solo ao ar. In: **XXXV Congresso brasileiro de Ciências do solo**, Natal: Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2015.

BRESSON, L.M.; MORAN, C.J. Role of compaction versus aggregate disruption on slumping and shrinking of repacked hardsetting seedbeds. **Journal of Soil Science**. California, v.168, n.4, p.585-594, 2003.

BRUEMMER, G.W.; GERTH. J.; TILLER, G. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of nickel, zinc and cadmium by goethite. I. Adsorption and diffusion of metals. **Journal of Soil Science**. California, v.39, n. 1, p. 37-52, 1988.

CARVALHO V. S; RIBEIRO, M.R; SOUZA JÚNIOR, V.S; BRILHANTE, S.A. Caracterização de espodosolos dos estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v. 37, n.1, p.1454-1463, 2013.

CINTRA, F. L. D; RESENDE, S. R; 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**. Viçosa-MG, v. 33 n. 4, p. 1041-1051, 2009.

CHARTRES, C.J.; FITZGERALD, J.D. Properties of siliceous cements in some Australian soils and saprolites. **Developments in Soil Science**. Austrália, v.19, p.199-205, 1990.

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

CHADWICK, O.A.; HENDRICKS, D.M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: I. A depositional model. **Soil Science Society of American Journal**. Madison, v.51, n.1, p.975-982, 1987.

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

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

CORRÊA, M. M. KER J. C., ARAÚJO FILHO J. C. CAMÊLO D. Formas de Ferro, Silício e Alumínio na Gênese de Fragipãs e Horizontes Coesos dos Tabuleiros Costeiros, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG v. 39, n.1, p. 940-949, 2015.

DANTAS, J.S; JÚNIOR, J.M; MARTINS FILHO, M.V; RESENDE, M.A; CAMARGO, L.A; BARBOSA, R.S. Gênese de solos coesos do leste Maranhense: Relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v. 38, n.4, p.1039-1050, 2014.

DANTAS, M.E. ; MEDINA, A.I. M. **Geomorfologia**. Salvador: CPRM – Serviço Geológico do, 2000.

DEXTER, A.R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **J. Agric. Eng. Res.** New York, v.31, n.1, p.139-147, 1985.

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

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, Y. **Minerais constituintes das rochas: Uma introdução.** Lisboa: Editora Fundação, 1ª Edição, 1966. 358p.

DOUCET, F. J.; SCHNEIDER, C.; BONES, S. J.; KRETCHMER, A.; MOSS, I.; TEKELY, P.; EXLEY, C. The formation of hydroxy aluminosilicates of geochemical and biological significance. **Geochimica et Cosmochimica Acta.** Washington, v. 65, n. 15, p. 2461–2467, 2001.

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

DUARTE, L R S. **Pedogênese de horizontes com caráter coeso em duas toposequências nos Tabuleiros Costeiros do Ceará.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2015.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: Embrapa Solos, 2013. 453p.

FLACH, K.W; NETTETON, W.D; NELSON, R.E. The micromorphology of silica cemented soil horizons in western North America. In: **Soil microscopy.** Rutherford: Limestone Press, Ontario, 1974. p. 715-729.

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

FREITAS, E. D; VIEIRA, J. M; ROMERO, R. E; SILVA, D. M. Influência de Ciclos de umedecimento e secagem no adensamento de solos coesos. In: **III Reunião nordestina de ciências dos solos.** Aracajú: Anais reunião nordestina de ciências do solo, 2016.

FURRIER, M; ARAÚJO, M.E; MENESES, L.F. Geomorfologia e tectônica da formação de barreiras no estado da Paraíba. **Revista do Instituto de Geociências,** São Paulo, v. 6, n. 2, p. 61-70, outubro 2006.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola.** Piracicaba-SP, v.59, n.1, p. 613-620, 2002.

GIAROLA N.F.B. LIMA, H.V; ROMERO, R.E; BRINATTI, A.M; SILVA, A.P. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Viçosa -MG, v.33, n.1, p.33-40, 2009.

ILER, R. K. **The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica**. New York: John Wiley and Sons, 1979.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the strength and friability of Oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.** California, v.66, n.1, p.1656-1661, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil básico do município de Trairi-Ce**. Fortaleza, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil básico do município de Fortaleza-Ce**. Fortaleza, 2016.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** California, v. 11, n.1, p.93-99, 1946.

KLEIN, V.A; LIBARDE, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

KÖPPEN, W. **Climatologia: conunestudio de los climas de latierra**. Mexico: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

LIMA NETO, J.A. RIBEIRO, M.R; CORRÊA, M.M; JÚNIOR, V.S. S; LIMA; J. F. W.F; FERREIRA, R.F.A.L. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa- MG, v.33, n.1, p.1001-1011, 2009.

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 Ciências do Solo**. Viçosa- MG, v. 29, n.1, p.33-40, 2005.

MESQUITA, M. B. F; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Revista Ciência Rural**. Santa Maria-RS, v.34, n.3, p.963-969, mai-jun, 2004.

MELO V.F. SCHAEFER, C.E.G. R; SINGH, B; NOVAIS, R.F; FONTES, M.P.F. Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa- MG, v. 26, n.1, p.53-64, 2002.

MENEZES, A.S. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de tabuleiros costeiros**, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.

McKEAGUE, J.A., DAY, J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al in soils of different classes of soil. **Canadian Journal Soil Science**. Canada, v. 46, n.1, p. 13-22, 1966.

McKENZIE, R.M. The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 18, n.1, p. 61-73, 1980.

McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, **Soil Till. Res.** New Zealand, v. 25, n.1, p.217-230, 2002.

MORAIS, R.M. O; MELLO,C.L; COSTA, F.O; SANTOS, P.F. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos sepósitos da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 19-30, 2006.

MOREAU, A. M. S. S; COSTA, L.M; KER, J.C;GOMES,F.H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v.30, n.1, p.1021-1030, 2006.

MULLINS, C.E.; MacLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M.; YOUNG, I.M. Hardsettingsoils: behaviour, occurrenceand management. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.) **Soil Degradation**. New York: Springer Verlag, 1990. p.37.

MULLINS, C.E.; YOUNG, I.M.; BENGHOUGH, A.G.; LEY, G.J. Hard setting soils Soil Use and Management. **Science Advances in Soil**. New York, v.3, n.1, p.79 -83, 1987.

MULLINS, C.E. Hardsetting. In: LAL, R.; BLUM, W.R.; VALENTINE, C. & STEWART, B.A., eds. **Methods for assessment of soil degradation**. New York: Advances in soilscience, 1997. p.109-128.

NOGUEIRA, F.C. C; BEZERRA, F.H.R; CASTRO,D.L.Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na Bacia Potiguar, NE do Brasil. **Revista do Instituto de Geociências USP**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 51-59, 2006 .

NORFLEET ML, KARATHANALIS AD. Some physical and chemical factors contributing o fragipan strengthin Kentucky soils.**Geoderma**. Amsterdam, v. 71, n.1, p.289-301, 1996.

NUNES, F.C; VILAS BOAS, G.S; SILVA, E.F; CALDERANO, S.B; CARVALHO, J.J.S.Faciologia e Análise Tectônica dos Materiais de Origem dos Solos dos Tabuleiros Costeiros do Litoral Norte da Bahia. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro, Dezembro 2011.

PANSU; GAUTHEYROU. **Handbook of Soil Analysis Mineralogical, Organicand Inorganic Methods**, France: springer, 2003. 995p.

RAIJ, B.VAN; CAMARGO, O.A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**. Campinas, v.32, n.1, p.223-231, 1973.

REZENDE, J.O. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: Limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI, 2000. 17p.

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

- RIBEIRO, L.P. Sílica em horizontes coesos de solos da Bahia. **Universitas**. Bahia, v.38, n.1, p.59-80, 1986.
- RIBEIRO, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: **Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros**, Aracaju: Anais Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.161-168.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**. Santa Maria, v. 27, n.1, p. 29-48, 2003.
- REICHERT, J.M; SUZUKI, L.E.A.S; REINERT D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciências do Solo**. Viçosa, v.5, n.1, p. 49-134, 2007.
- RODRIGUES, M.G.F. A era cenozóica e a origem da formação barreiras, **Textura**. Cruz das Almas-BA, v. 2, n.º 2, p. 59-69, Ago./Dez., 2007.
- ROLIM NETO, F.C; SANTOS, M.C. Gênese de solo arenoso com lamelas e fragipã no agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v.18, v. 1, p. 24-53. 1994.
- ROQUE, C.G.; CENTURION, J.F.; ALENCAR, G.V.; BEUTLER, A.N.; PEREIRA, G.T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum: Agronomy**. Maringá -SP, v.25, n.1, p.53-57, 2003.
- SANTOS, R. L. **Evolução das vertentes e pedogênese no Bordo do Tabuleiro de Cruz das Almas (Ba)**. Bahia: UFBA, 1992.
- SANTOS, C.S.V. **Formação de camadas superficiais adensadas em solo argiloso em resposta a flutuações de umidade**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. 70p.
- 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 Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1535-1545, 2009.
- SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional ASSISTAT para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Viçosa-MG, v.4, n.1, p. 71-78, 2002.
- SILVEIRA, D.C; MELO FILHO, J.F; SACRAMENTO, J.A.A. S; SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade versus resistência a penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 34, n.1, p.659-667 2010.
- SUGUIO, K. ; MARTIN, L.; FAIRCHILD, T.R. Formações Quaternárias Marinhas do Litoral Paulista e Sul Fluminense. In: **International symposium on coastal evolution in the quaternary**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia SBG, 1978. p.55.

- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa-MG, v.22, n.1, p. 573-581, 1998.
- TESSIER, D.; BEAUMONT, A. & PEDRÓ, G. Influence of clay mineralogy and rewetting rate on the clay microstructure. In: Soil micromorphology: a basic and applied science. **International work meeting of soil micromorphology**. San Antonio: Proceedings. Amsterdam, Elsevier Science, 1990. p.191-198.
- TORMENA, C; FRIEDRICH, R; PINTO, J.C; COSTA, A.C. S; FINDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa- MG, v.28, n.6, p.1023-1031, 2004.
- VIANA, J. H. M; FERNANDES FILHO, E.I; SCHAEFER,C.E.G.R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa- MG, v.28, v.1, p. 11-19, 2004.
- VIEIRA, J.M; ROMERO,R.E; FERREIRA, T.O; JÚNIOR, R.N.A. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 623-632, out-dez. 2012.
- VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.