UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO – UFRPE

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

PÉRICLES MILLER BARROS MENDES

MODELAGEM DA COMPRESSIBILIDADE DE UM ARGISSOLO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Recife, PE
Março de 2017

MODELAGEM DA COMPRESSIBILIDADE DE UM ARGISSOLO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

PÉRICLES MILLER BARROS MENDES
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **Mario Monteiro Rolim**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Recife, PE
Março de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Petrônio Mendes e Jozinete Mendes, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando, dando força e abrindo meus olhos na caminhada da vida, além de serem responsáveis pela formação do meu caráter. Aos meus avós José Pedro de Barros, Maria de Lurdes Barros (em memória), Manoel Mariano Mendes (em memória) e Creusa Lima Mendes que são a base da minha família e participaram diretamente da minha construção, juntamente com meus tios e tias, que represento pelos nomes de Lúcia Mendes e Jozilma Barros. E os meus irmãos Mariana Yasmim e Petrônio Mendes Jr que eu amo muito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem a permissão dele nem eu, nem ninguém estaria aqui. Pela oportunidade de fortalecer meus conhecimentos, minha carreira profissional e minha fé nele, pela saúde e proteção nos trabalhos no laboratório e no campo, e principalmente pelo amor que ele tem por nós.

A minha família, que sem todo o auxilio que eu recebi desde a graduação até hoje, eu não teria ido muito longe.

Ao Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim, pela orientação, ensinamentos, oportunidade de realizar estudos na mecânica dos solos agrícolas e o tempo dedicado a mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo acolhimento e dedicação de cada docente para minha formação profissional.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE, por ter concedido a bolsa de mestrado a mim, e financiado este projeto de pesquisa para que fosse realizado.

A Estação Experimental de Cana-de-Açúcar em Carpina, PE, no nome do diretor Dr. Djalma Simões por permitir a realização deste trabalho em suas dependências, e aos funcionários representados na figura do meu colega, e amigo pessoal, Evanílson Paulino, pela ajuda e atenção que me deram.

Aos companheiros da pós-graduação, aqui representados pelos colegas Diego Souza, José Eduardo Marques, José Francisco Neto, Ronaldo Alves, Keila Jerônimo.

A minha grande amiga Elisabete Albuquerque, que sempre esteve me dando força e dividindo as dificuldades de uma pós-graduação, e a Natalia Araújo, que sempre se fez companheira ao meu lado tanto no laboratório como no dia-a-dia da cidade grande.

Aos colegas de laboratório, especial Uilka Tavares, que me auxiliou bastante na reta final desse trabalho, sem esquecer José Francisco, Ângela Jessika e do estagiário de iniciação científica (PIBIC-UFRPE) Gilson Filho, colega e amigo, que passou por apertos comigo no campo e no laboratório, sempre do meu lado e disposto a dar o sangue junto a mim no trabalho.

Em fim, a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS iv
LISTA DE TABELAS v
RESUMO: vi
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVO GERAL: 2
   - Objetivos específicos: 2
3. REVISÃO DE LITERATURA 3
   - Cana-de-açúcar 3
   - Mecânica dos Solos 4
   - Umidade no solo 7
   - Modelos Matemáticos e Curva de compressão do solo 9
4. MATERIAL E MÉTODOS: 13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 20
6. CONCLUSÕES 28
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista da mesa de tensão (à esquerda) e câmara de Richards (à direita), utilizadas para confecção da curva de retenção de água no solo.....15
Figura 2. Curva característica de sucção do Argissolo Amarelo distrocoeso.....16
Figura 3. Vista do cilindro metálico para coleta de amostra não deformada com diâmetro de 0,065 m e altura de 0,025 m, do ensaio de compressibilidade.....16
Figura 4. Vista da prensa de adensamento Solotest tipo Bishop, com relação 1:10.....17
Figura 5. Tensão de pré-consolidação pelo método de Pacheco Silva.....18
Figura 6. Dispersão dos dados de tensão de pré-consolidação em função do conteúdo de água ($g.g^{-1}$) (A e C) e da densidade do solo ($Mg.m^{-3}$) (B e D), nas camadas de 0,00 - 0,20 m e de 0,20 - 0,40 m. (w=umidade; Bd = densidade).....24
Figura 7. Modelo ajustado linear para a capacidade de suporte de carga na camada de 0,00 - 0,20 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.....24
Figura 8. Modelo Linear ajustado para a capacidade de suporte de carga na camada de 0,20 - 0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.....25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Autores de modelos de capacidade de carga em diversos solos, em função do manejo.....12

Tabela 2. Descrição do Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC).....14

Tabela 3. Estatística descritiva da granulometria do Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC).....20

Tabela 4. Analise de Variância da tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na camada de 0,00 a 0,20 m.....21

Tabela 5. Analise de Variância da tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na camada de 0,20 a 0,40 m.....22

Tabela 6. Teste de Tukey a 5% para a tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso**...**.....22

Tabela 7. Modelos da capacidade de suporte de carga selecionados, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivados com cana-de-açúcar, nas camadas de 0,00 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, respectivamente.....26

RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar vem sofrendo modernizações tecnológicas ao longo dos anos, principalmente pelo aumento da demanda por etanol, combustível utilizado na frota nacional de veículos automotores; fazendo-se necessário o uso de máquinas pesadas para o aumento da eficiência das práticas culturais e da produtividade da cultura. A compactação do solo tornou-se um problema no cotidiano dos profissionais que submetem o solo ao uso de máquinas agrícolas para otimizar o sistema de produção de alimentos ou bioenergia. Neste contexto, o conhecimento do potencial compressivo do solo através da tensão de pré-consolidação auxilia na mitigação dos danos causados pelo tráfego de maquinário pesado, ao manejar a entrada de máquinas de forma a evitar esforços maiores que a tensão de pré-consolidação, porém, o conteúdo de água no solo modifica a variável. Este trabalho teve como objetivo buscar a caracterização e modelagem da capacidade de suporte, através da tensão pré-consolidação, de um Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar, em diferentes níveis de umidade. As tensões de pré-consolidação médias apresentaram diferença significativa quando comparadas por camada. O modelo linear foi o que mais se ajustou as condições do solo e manejo da área nas duas camadas analisadas. O conteúdo de água no solo apresentou correlação negativa com a tensão de pré-consolidação, enquanto a densidade do solo apresentou correlação positiva.

Abstract

The cultivation sugarcane has undergone technological modernization over the years, mainly due to the increase in the demand for ethanol; fuel used in the national motor vehicle fleet, in this way the use f heavy machinery becomes necessary to increase the efficiency of the cultural practices and the productivity of culture. Soil compaction is a daily problem of professionals who submit the soil to the use of agricultural machinery to optimize the food production or bioenergy system. The knowledge of the compressive potential of the soil through the pre-consolidation tension aids in mitigation of the damages caused by the traffic of heavy machinery, when handing the entrance of machines in order to avoid loads grater than the pre-consolidation tension, however, the content of water in the soil modifies the variable. Than objective of this work was to characterize and model the capacity of support, through tha pre-consolidation tension, of a dystrophic Yellow Argisol under sugar cane cultivation at different moisture levels. The mean pre-consolidations voltages presented significant difference when compared by layer. The linear model was the on that most adjusted the soil conditions and area management in the two layers analyzed. The water content in the soil showed a negative correlation with the pre-consolidation tension, and the soil density shower positive correlation.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.) é uma das mais importantes do Brasil. Devido à diversidade de climas e de solo o cultivo da cana foi alicerçado no país e hoje ocupa o terceiro lugar como cultura mais plantada, caracterizando-se como maior produtor e o detentor de maior tecnologia no seguimento sucroenergético.

O Brasil detém uma área plantada com cana-de-açúcar de 9.110.900 hectares segundo levantamento da Conab (2016), um aumento de 1,05% em relação à safra 2015/16. Porém, com a demanda crescente, se faz necessário aumentar a produtividade, com melhorias nas técnicas de plantio e manejo da cultura, de forma que os recursos naturais sejam conservados.

Ao longo do tempo se fez necessário o uso de máquinas nas áreas agrícolas para se alcançar o aumento de produtividade, porém nem sempre é possível fazer as operações nas condições ideais de umidade, levando a ocorrência de compactação do solo. Sendo assim, são necessárias práticas de manejo de solo visando à diminuição dos danos causados pelo uso de máquinas pesadas.

Dentre os problemas causados no solo decorrentes do uso de máquinas está à compactação de solo, que é conceituada como a diminuição do volume de poros, com o rearranjo de partículas devido aplicação de tensões verticais no solo, provocando o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração das raízes. Com o aumento da densidade do solo há também a restrição da aeração pela redução da macroporosidade.

A erosão e a compactação causados pelo excesso de operações no solo e tráfego com maquinário pesado reduz a produtividade do solo agrícola pela remoção da camada superficial, que possui maior fertilidade, comprometendo a disponibilidade da solução nutritiva natural do solo.

O estudo da compactação pode ser realizado através de levantamento de diversos parâmetros, entre eles a capacidade de suporte de carga do solo, ou tensão de pré-consolidação, obtida a partir do ensaio de adensamento em laboratório. Desta forma, as variáveis denotam o comportamento do solo sob condições dinâmicas.

Em termos mecânicos, ao se submeter o solo a uma carga menor que a capacidade de suporte, o solo terá um comportamento elástico e a deformação sofrida no solo tende a retornar ao estado anterior, mas ao aplicar cargas maiores que a tensão de pré-consolidação, o solo tenderá a não se recuperar desta deformação, por se tratar de uma deformação plástica.

O estudo da capacidade de suporte do solo corrobora mitigando as interferências causadas pelo uso de maquinários pesados. Indicando que o planejamento e uso racional do maquinário agrícola em áreas de cultivo diminuem os danos causados pela compactação agrícola.

Os valores obtidos em um ensaio de compressibilidade sofrem influência da água presente no solo. Ao diminuir a umidade aumenta-se a sucção fato que é representado na curva de retenção de água no meio e, portanto, a força com que as partículas sólidas estão agregadas. O aumento da sucção é diretamente proporcional à resistência compressiva do corpo, tornando-o menos susceptível a compactação. O inverso se torna um grande problema para o manejo sustentável do solo, pois com o aumento da umidade e diminuição da força de sucção as partículas sólidas apresentam uma película de água em sua superfície, diminuindo a força do agregado e aumentando a susceptibilidade do solo a compactação.

2. OBJETIVO GERAL:

O objetivo deste estudo foi analisar a relação entre propriedades físicas e mecânicas do solo e sua variação na curva de compressão do solo. Modelando a capacidade de suporte de carga do solo, em função de diferentes níveis de umidade em um Argissolo Amarelo distrocoeso.

- **Objetivos específicos:**

- Caracterizar a compressibilidade do Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar;
- Estudar a relação das propriedades mecânicas e físicas do solo com a umidade;
- Ajustar um modelo de regressão linear e/ou não linear no estudo do comportamento mecânico do meio.

3. REVISÃO DE LITERATURA

- **Cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma espécie da família Poaceae de importância econômica na produção de açúcar e etanol. O cultivo é um dos mais importantes no país, desde o Brasil colônia. Já foi considerada a base da economia nacional e continua a ocupar lugar de destaque no consumo e na exportação. Vem ganhando mais destaque, graças ao incentivo na produção de etanol para abastecimento da frota nacional de veículos (Shikida et al., 2015).

No Nordeste o cultivo da cana-de-açúcar é evidenciado na região litorânea dos Estados de Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte, destacando-os no panorama nacional da produção de cana. Do total estimado para a produção de açúcar, 694.544,8 mil toneladas para a safra 2016/2017, o Nordeste detém cerca de 6,8%, e dos 27.863.951,7 mil litros de etanol o Nordeste é responsável por 5,2% (Conab, 2016).

Graças à impulsão na produção de etanol, considerado um combustível moderno e "limpo" quando comparado com os de origem fóssil, a área de cultivo da cana-de-açúcar sofreu um aumento considerável no Brasil (Aguiar et al., 2009). A área plantada no país na safra 2016/2017 foi de 9.110.900 hectares, sendo esperada uma produção de 694.500 toneladas de cana-de-açúcar, com um aumento de 1% na produtividade, passando de 73.228 $kg.ha^{-1}$ para 76.232 $kg.ha^{-1}$ (Conab, 2016.)

A cultura tem cada dia mais enfoque para o crescimento de produtividade a custos menores, visto o crescimento da demanda do etanol como combustível alternativo aos combustíveis fósseis, que são uma fonte limitada de energia. Aguiar et al. (2009) relatam que o uso do etanol está tomando proporções mundiais, visto a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis, como também a preocupação com o meio ambiente, fazendo com que o cultivo de cana-de-açúcar seja expandido.

Segundo o site do Ministério da Agricultura é esperado um aumento de 3,45% na safra 2018/19, para tal faz-se necessário o uso da mecanização agrícola altamente tecnicista, com máquinas modernas e versáteis. Consequentemente o uso intenso ao longo de consecutivos anos de cultivo causa modificações na resistência mecânica do solo das áreas cultivadas.

Para que se tenha um incremento da produtividade são necessárias técnicas de plantio e manejo da cultura, como a agricultura empresarial, que assegura o rendimento

com a conservação dos recursos hídricos e do solo (Gomes et al., 2014). Maquinários, cada vez mais pesados, são necessários para que haja incremento na produtividade das áreas cultivadas, porém a condição climática e o sistema produtivo imediatista prejudicam o solo, com prejuízo decorrente da realização de práticas culturais em condições inapropriadas de umidade (Iaia et al., 2006). A compactação é a problemática mais evidente nos solos que sofrem com o tráfego de máquinas pesadas (Oliveira et al., 2010).

A formação geológica das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Nordeste é caracterizada como tabuleiros costeiros, ocupam 64.000 km^2 ao longo da faixa costeira do país, e 84% desta faixa estão localizados na região Nordeste. Parcela dos solos dos tabuleiro costeiros têm uma característica marcante que é a coesão (Farias et al., 2013), que os torna friável quando úmidos e muito duros quando secos. Giarola et al. (2003) complementam a afirmação dizendo que ao diminuir a umidade, a coesão torna-se um fator limitante ao desenvolvimento vegetal e das operações mecanizadas, acarretando perda na produtividade e aumento dos custos com operações agrícolas, devido a maior demanda por energia.

- **Mecânica dos Solos**

Terzaghi (1943) conceitua a mecânica do solo como: "a aplicação de leis mecânicas e hidráulicas em problemáticas ligadas a sedimentos e outros acúmulos de partículas solidas derivadas do intemperismo de rochas". Sendo assim, foi inserida nas ciências agrarias, passando a estudá-las para tentar resolver questões, como: irrigação, drenagem, recarga de lençóis freáticos e controle de inundações.

A compactação do solo é uma das causas de diversos de problemas ambientais e agronômicos, que proporcionam perdas econômicas, para a sociedade e agricultura. Inundações, lixiviação de agrotóxicos, erosão, perda de rendimento das culturas e aumento dos gastos com maquinário são alguns dos problemas evidenciados no âmbito ambiental, econômico e agronômico devido à compactação (Keller e Lamandé, 2010). Sendo assim o conhecimento da compactação do solo se torna um fator importante no manejo do solo.

Tratada por autores (Oliveira et al., 2010; Silva et al., 2014) como um processo de aumento de densidade, ou diminuição do volume de poros, o que acarreta em uma série de problemas ao cultivo mecanizado.

A redução do volume de macroporos traz consequências ao meio ambiente. Alaoui et al. (2011) afirmam que a diminuição do crescimento radicular acarreta na cultura perda de produção por meio da restrição na disponibilidade de oxigênio, trocas gasosas e nutrientes. Keller et al. (2013) atribuem à compactação problemas em importantes funções ecológicas, como redução da condutividade hidráulica saturada, consequentemente há o aumento do escoamento superficial e erosão do solo através do carreamento de partículas sólidas pela água; indução de fluxo preferencial pelos macroporos, carreando coloides com nutrientes e/ou pesticidas adsorvidos para horizontes inferiores, contaminando os lençóis freáticos e os corpos d'água.

O aumento da resistência à penetração das raízes no solo é uma das consequências da compactação, na qual a planta necessitará de um gasto energético maior para dar prosseguimento ao seu ciclo, devido ao crescimento de raízes secundárias para o rompimento mecânico das camadas mais adensadas através dos caminhos preferenciais presentes nos agregados, ou mesmo pelo atraso no crescimento vegetativo por meio de sinais metabólicos, fato deletério à produção da cultura (Taylor; Brar, 1991; Tavares Filho et al., 2001; Lima et al., 2006). Há uma intensificação da problemática da resistência à penetração quando o solo apresenta sua umidade reduzida, o meio fica com valores mais elevado, devido ao caráter coeso, o que é prejudicial ao desenvolvimento das raízes, principalmente em solos compactados (Benghough; Mullins, 1990).

Fatores externos ao solo, como a pressão de insuflagem do rodado, peso por eixo, tensão aplicada por rodado, tempo, frequência e intensidade de aplicação de uma carga no solo; e fatores internos, como a composição granulométrica, teor de matéria orgânica, tipo do mineral-argila e umidade presente no solo no momento da operação são alguns dos exemplos que corroboram para a compactação da área cultivada (Lima et al., 2015).

Porém dentre todos os fatores citados a umidade no solo é a mais importante no processo de compactação (Soane; Van Ouwerkerk, 1994). O aumento da densidade, ou aumento da massa de sólidos por unidade de volume, restringe a aeração do solo (Portugal et al., 2007). Em qualquer estado de compactação o decréscimo da umidade do solo aumenta a resistência à penetração dificultando o desenvolvimento da cultura, por outro lado, o acréscimo de umidade no solo diminui a tensão de pré-consolidação do meio, reduzindo o limite de peso suportado pelo solo (Kondo; Dias Júnior, 1999; Lipiec et al., 2002; Tekeste et al., 2008).

As grandes extensões de terra, correspondentes ao cultivo da cana-de-açúcar, exigem o uso de maquinário agrícola em todo o ciclo, partindo do plantio até a colheita. Segundo Oliveira et al. (2011), as operações de preparo convencional do solo vem corroborando para que ocorra modificações físico-mecânicas no solo, porém a colheita é a que mais utiliza máquinas pesadas, favorecendo a compactação.

O caráter coeso presente nos solos de tabuleiro costeiro é decorrente da atração eletrostática entre a superfície de partículas próximas, ou por materiais, com efeito, cimentante (Kimpe et al., 1983). E também, é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, que tende aproximar as partículas entre si (Fredlund e Rehardjo, 1993). O caráter coeso do solo influencia negativamente os atributos físicos, tais como: densidade em massa elevada, baixa permeabilidade e alta resistência à penetração das raízes.

Os solos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste são submetidos presença do maquinário pesado em umidade inadequada nas áreas de cultivo, causando prejuízos à cultura, como queda na produtividade, além de contribuir para que ocorra erosão (Tang et al. 2011).

A migração da argila para horizontes subsuperficiais é um processo inerente às práticas agrícolas, resultado das modificações na estrutura do solo pelos sistemas de manejo, aumentando o grau de dispersão se comparada com as condições naturais do solo (Nielsen et al., 1972). Essa migração da argila pode provocar mudanças importantes como o adensamento de camadas, aumento da coesão do solo e da restrição à penetração das raízes (Silva, 2003). Também afetando a fertilidade, com a redução do fluxo de ar, prejudicando a atividade biológica e o ciclo dos nutrientes (Trevisan et al., 2017).

A compactação do solo pode ser estudada de diversas formas, como através da resistência mecânica à penetração das raízes, pela avaliação do grau de compactação, a partir da densidade do solo e a máxima densidade do solo obtida com no ensaio de Proctor normal, e através do ensaio de adensamento e cisalhamento do solo.

Cortez et al. (2014) avaliaram a variação de alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo em função do trafego agrícola, variando o número de passadas indo do zero até oito, com um gradiente dois. As intensidades de trafego demonstraram que após a segunda passagem os valores de densidade do solo não diferiram muito dos demais na camada de 0-0,10 m, porém na mesma camada houve redução da porosidade total com o aumento das passadas.

Portugal et al. (2007) relataram em estudo com Argissolo, que a densidade do solo, nas camadas mais superficiais, cultivado com cana-de-açúcar ou laranja, houve um aumento quando comparado ao cultivo de seringueira, pastagem ou mata nativa.

Vischi Filho et al. (2015) determinaram a capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho, avaliando a relação rodado/solo com o número de ciclos da cultura, sob colheita mecanizada. A capacidade de suporte do solo foi maior no terceiro ciclo que no primeiro ciclo, além de quando avaliada em condição friável ela é maior que as tensões aplicadas pelos rodados das máquinas.

Oliveira et al. (2010) ao avaliar a susceptibilidade de um Argissolo distrocoeso à compactação, cultivado com cana-de-açúcar em diferentes manejos, observaram em solos manejados com e sem irrigação sofrerem degradação devido à compactação, mesmo em níveis baixos de umidade, necessitando de maiores cuidados no preparo do solo e na colheita da cultura.

Chaplain et al. (2011) fizeram estudo avaliando o efeito das práticas agrícolas na densidade e a resistência mecânica do solo, e também quanto a relação entre essas duas propriedades, como ferramenta diagnostica dos efeitos duradouros dessas práticas. Função de pedotransferência foi definida a partir da tensão de pré-consolidação (σ_{pc}), índice de compressão (I_C) e o índice de vazios (e_0), comparando o sistema de plantio direto e o convencional. No plantio convencional as formas das curvas de compressão foram em "S", com um formato arredondado quando o ε_0 diminuía. O I_C apareceu proporcionalmente simples para o ε_0 até certo ponto de saturação do solo, no qual apareceu uma inflexão e o ε_0 decresce. E a σ_{pc} aumentou consideravelmente com a diminuição do ε_0.

Portanto a entrada de máquinas pesadas nas áreas agrícolas só deve ser realizada no solo em condição friável. Estando no meio da faixa de umidade entre o limite de contração e o de plasticidade, acarretando menores danos à macroestrutura porosa (Hillel, 1980).

- **Umidade no solo**

A capacidade de armazenamento de água no solo depende de fatores, como a matriz que o solo é composto, tipo de argilominerais, densidade do solo, volume de poros, textura, estrutura e outros.

A água está armazenada no solo por meio de forças de sucção, que são inversamente proporcionais à quantidade de água, quanto mais água no solo menor será

a sucção, portanto em solos saturados a sucção é zero. À medida que se aplica uma sucção este solo perderá água, alcançando a sucção crítica, na qual ocorre a entrada de ar nos poros. Com a diminuição drástica no conteúdo de água nos poros a força de sucção exigida para se perder mais água será maior (Klar, 1988).

Ao correlacionar pares de massa de água ($g.g^{-1}$) e sucção obtém-se a curva característica de retenção de água (Hillel, 1980). Nela é possível obter dados para o manejo de água no solo, como a capacidade de campo, ponto de murcha permanente, quantidade de água disponível, porosidade drenável e o balanço hídrico, além de nortear estudos de compactação, já que a modificação na porção porosa do solo também modifica esta curva.

A curva de retenção fornece parâmetros de porosidade drenável e distribuição do tamanho dos poros, condutividade hidráulica não saturada, umidade na capacidade de campo, entre outros, sendo uma ferramenta fundamental para estudos de compressibilidade e de trafegabilidade dos solos agrícolas (Silva et al., 2009).

O estudo da compactação do solo não pode ser interpretado de maneira precisa sem dados de água no solo e da força de sucção, pois a redistribuição dos poros é facilitada pela presença de água. Solos secos são menos susceptíveis a desestruturação devida à aplicação de tensões, tendo menor compactação e rearranjo dos poros, porém essa susceptibilidade aumenta quando a umidade também aumenta (Eavis, 1972), devido à fluidez obtida com a presença de água no solo.

Há diversos métodos para o conhecimento da curva característica de cada solo, os mais usados são o da câmara de Richards (Richards e Fireman, 1943) e a mesa de tensão ou funil de Haines (1930). Cada um tem sua aptidão, cuja câmara de Richards é mais apropriada à aplicação de maiores sucções, devido o aparato tecnológico. A mesa de tensão por ser mais simples e não trabalhar com grandes sucções, é mais apropriada para estudos de sucções menores.

A umidade inicial na amostra de solo que será submetida ao ensaio de compressão pode corresponder à umidade no campo, compondo um ponto de ligação entre a variação na resistência mecânica do solo e a umidade. Os resultados geram boas correlações em regressões lineares entre a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão (Chaplain et al., 2011). A variação da umidade inicial e da densidade do solo é sensível às práticas culturais, contribuindo para a variabilidade das propriedades mecânicas do solo.

A maioria dos resultados obtidos, a partir da geotécnica mostram que para dada densidade o índice de compressão tende a decrescer com o incremento da sucção (Cui et

al., 2010). A umidade do solo relaciona-se à estrutura do solo, desta forma a densidade e o teor de água no solo descrevem a estrutura com a dependência da sucção e da textura.

Hamza et al. (2011) ao avaliar a compactação do solo em profundidade sob diferentes níveis de umidade aplicando cargas externas concluiu que os efeitos destes dois fatores acarretaram num aumento preocupante da densidade e da resistência a penetração na camada superficial do meio.

Pacheco et al. (2011) avaliou o efeito do trafego de maquinas pesadas para o cultivo da cana-de-açúcar em Argissolos Amarelos de Alagoas, analisando a capacidade de suporte de carga e o intervalo hídrico ótimo. Nas áreas de trafego apresentaram um aumento da resistência à penetração das raízes, mesmo com a umidade na capacidade de campo, desta forma houve a redução do intervalo hídrico ótimo nas camadas superficiais. Além disso, recomendou-se utilizar a tensão de pré-consolidação como variável diagnostica de compactação e essencial para a tomada de decisão no manejo dos maquinários agrícolas, para mitigar a compactação inerente da cultura.

- **Modelos matemáticos e curva de compressão do solo**

A teoria e conceitos usados para a mecânica de solos e os efeitos da compactação e preparo de solos são geralmente adotados da mecânica convencional. Como exemplos citam-se os modelos de predição da força de tração de implementos agrícolas elaborados por Coloumb (1776) e Rankine (1858), as soluções analíticas para a propagação das tensões no solo elaboradas por Boussinesq (1885) e Frohlich (1934), e o comportamento compressivo do solo através do trabalho de Casa Grande (1936) com os estudos sobre tensão de pré-consolidação.

Os modelos matemáticos são utilizados para representar fenômenos físicos do solo que sofreu compactação, a partir da metodologia empírica, baseada na simples relação de causa efeito; da semi empírica que utilizam funções de pedotransfêrencia; ou através de processos baseados em aproximação (Keller et al., 2013).

Vereecken et al. (2016) comentam que os primeiros modelos analíticos criados datam do século passado, com a simulação de propriedades do solo: fluxo de água, fluxo de calor, transporte de solutos, dinâmica de nutrientes, e dinâmica do carbono orgânico, desta forma, compondo uma ferramenta para colaborar com a quantificação e predição da capacidade do solo aos processos de degradação (a erosão e compactação).

Para a obtenção desses modelos são necessárias três etapas: primeiro descrevendo a situação do solo, quanto às cargas aplicadas anteriormente; a segunda

etapa quantifica as mudanças sofridas diante das cargas aplicadas superficialmente no campo; e a terceira é incorporar esses dados de forma analítica ou em modelos numéricos.

Hamza et al. (2011) afirma que o processo de compactação pode ser entendido a partir do estudo da compressibilidade, a qual pode ser caracterizada como as deformações e compactações sofridas no solo, devido à aplicação de tensões por meio do tráfego de máquinas pesadas e a presença de umidade (Macedo et al., 2010).

O ensaio de compressão pode ser realizado de duas formas, em apenas uma dimensão ou em três dimensões (uniaxial ou triaxial), no qual é gerada uma curva de compressão, a qual expressa em um diagrama semi-logarítmico, com a relação entre o logaritmo das tensões aplicadas ao solo σ e o índice de vazios e_0, na qual se podem observar duas regiões distintas. A primeira descreve a curva de recompressão C_r e a característica elástica do solo estudado; a segunda trata da reta virgem de compressão C_{vc}, trazendo consigo o caráter plástico do solo (Keller et al., 2011).

A partir da curva compressiva obtêm-se três importantes variáveis mecânicas do solo, o índice de recompressão I_r, que retrata o grau de inclinação da curva de recompressão C_r; o índice de compressão I_C, que demonstra a inclinação da C_{vc}; e a tensão de pré-consolidação σ_{pc}, que é o limiar entre as duas curvas citadas anteriormente, além da coesão e do ângulo de atrito interno do solo (Keller e Arvidsson, 2004; Oliveira et al., 2011).

O I_C é o indicador da resistência à compressão do solo estudado, sendo um dado importante para caracterizar a erosividade do mesmo. O I_r trata da resiliência mecânica do material de estudo à compactação. A tensão de pré-consolidação σ_{pc} traduz em um dado quantitativo a influência das cargas aplicadas pelo tráfego de máquinas, tratando da máxima carga aplicada no solo (Saffih-Hdadi et al., 2009; Keller et al., 2011)

A tensão de pré-consolidação é a variável do ensaio de compressibilidade mais importante, pois indica a carga máxima que o solo já foi submetido. Desta forma, ao aplicar cargas inferiores à tensão de pré-consolidação o solo não sofrerá compactação adicional, apresentando comportamento elástico. Caso a carga seja superior a tensão de pré-consolidação o solo se comporta de maneira plástica, cuja deformação não é recuperável e corrobora para a degradação da estrutura do solo (Dias Júnior e Pierce, 1996; Severiano et al., 2010; Souza et al., 2012), esta região é chamada de reta virgem de compressão.

A tensão de pré-consolidação é variável que expressa um limite do solo, a capacidade de suporte de carga, baseando no conceito de que o solo resiste às tensões

verticais aplicadas, sem que haja danos adicionais à estrutura do solo (Debiase et al., 2008). Portanto, o manejo do trafego nos talhões deve ser trabalhado de forma a respeitar esta variável. Pacheco e Cantalice (2011) relatam que em solos cujos valores de tensão de pré-consolidação são altos, a resistência à penetração das raízes também é elevada, fato este que prejudica a produtividade da cultura.

Cui et al. (2010) observaram o efeito da sucção no índice de compressão (I_C), considerando como parâmetro mecânico para predição da resistência mecânica a compressão, do ponto de vista prático este estudo mostra que a determinação matemática de parâmetros mecânicos do solo podem padronizar a curva de compressão, ocasionando um impacto significativo para estimar o I_C.

Keller et al. (2011) investigaram sobre o impacto das partículas do solo e do tamanho e distribuição dos agregados na característica da curva de compressão e suas variáveis, índice de compressão (I_C), índice de recompressão (I_R) e tensão de pré-consolidação (σ_{pc}). Encontraram nenhum ou apenas fraquíssimos impactos do tamanho das partículas ou da distribuição ou tamanho dos agregados nas propriedades compressivas, entretanto o volume de vazios inicial teve grande influência sobre as variáveis da curva. Desta forma, houve diminuição do I_C e do I_R, e a σ_{pc} aumentou com a diminuição do índice de vazios. Em camada subsuperficial não apresentaram significância estatística.

Arvidsson e Keller (2007) afirmam que a capacidade de compressão caracteriza o comportamento do solo ao ser submetido a uma carga mecânica, respondendo tal estimulo com a diminuição do volume de poros, com ou sem a presença de água no ensaio. Consequentemente este comportamento pode ser correlacionado às tensões exercidas por máquinas agrícolas nas áreas cultivadas.

Souza et al. (2012) compararam a capacidade de carga do solo, em área cultivada com cana-de-açúcar, onde foi realizada colheita mecânica sem queima, em sistema com e sem controle de trafego agrícola, concluindo que o sistema com controle de trafego agrícola propicia maior capacidade de suporte na linha do rodado, possibilitando o trafego das máquinas em solos com maior umidade devido o maior valor da pressão de consolidação.

Porém, apesar da pressão de pré-consolidação ser uma variável muito utilizada por autores para a indicação da capacidade de suporte de carga, a sua obtenção é dificultada devido às exigências da coleta do material para o ensaio, e as condições do laboratório com equipamentos modernos, nem sempre encontrados. Para a resolução

destes problemas pesquisadores propuseram o uso de funções (Tabela 1), atribuindo uma ou mais variáveis independentes (Severiano et al., 2010; Lima et al. 2015).

Tabela 1. Modelos de capacidade de carga em diversos solos, em função do manejo.

Autor	Descrição do modelo	Modelo ajustado
Salffi-Hdadi et al. 2009	Solos de textura média fina (MF), média (M) e grossa (G)	$\sigma_{pc} = -223{,}71 + 347{,}47DS - 7{,}93U$ (MF) R^2=0,76
		$\sigma_{pc} = 136{,}87 + 155{,}19DS$ (M) R^2=0,50
		$\sigma_{pc} = -220{,}68 + 191{,}45DS + 2{,}77U$(G) R^2=0,57
Lima et al. 2015	Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar 0,10-0,13 m (M1) e 0,30-0,33 m (M2)	$\sigma_{pc} = -95{,}21 - 0{,}77U + 19{,}73DS + 1{,}00RP - 0{,}20MO + 0{,}80CA + 4{,}32LL + 4{,}34LP$ (M1) R^2=0,83
		$\sigma_{pc} = -8974 - 0{,}64U + 16{,}32DS + 1{,}40RP - 0{,}30MO + +0{,}62CA + 4{,}46LL + 4{,}36LP$ (M2) R^2=0,80
Severiano et al. 2010	Modelo adaptado de Busscher (1990), cana-de-açúcar em Latossolo vermelho (LV) e Cambissolo (C).	$\sigma_{pc} = 2{,}64U^{-1{,}24}.DS^{4{,}83}$ (LV) R^2=0,83
		$\sigma_{pc} = 20{,}777U^{-0{,}91}.DS^{3{,}43}$ (C) R^2=0,72
Iori et al. 2012	Argissolo e Cambissolo.	$\sigma_{pc} = 10^{(2{,}9387 - 1{,}4868U)}$ R^2=0,81
Imhoff et al. 2013	Modelo Chernossolo argentino a partir da resistência a penetração	$\sigma_{pc} = -402{,}819 + 64\ln MO + 45{,}297\ln CA - 250{,}874\ln U$ R^2=0,77
Ortigara et al. 2015	Latossolo Vermelho distroférrico nas camadas de 0,055-0,105 m (A) e 0,135-0,185 m (B)	$\sigma_{pc} = -13{,}734 + 0{,}0326RP$ (A) R^2=0,66
		$\sigma_{pc} = -45{,}3 + 0{,}0418RP$ (B) R^2=0,95

σ_{pc} – Tensão de pré-consolidação; DS – densidade seca do solo; U – umidade ($g.g^{-1}$); MO – matéria orgânica; RP – resistência a penetração; CA – conteúdo de argila; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade.

Saffi-Hdadi et al. (2009) trabalharam para compor um modelo em solos franceses, traduzido em uma equação na qual a σ_{pc} é em função de parâmetros de fácil obtenção, como umidade, densidade e textura. A capacidade de suporte de solos com maior teor de argila foi superior, mesmo com maior umidade, não ocasionando compactação severa, já em solos arenosos houve maior dependência da densidade do que da umidade inicial do solo. Porém este fenômeno tem diversas outras variáveis com relação direta e indireta (Manly, 1994), desta forma o estudo isolado de apenas uma variável não é o suficiente para determinar o comportamento compressivo do solo, necessitando de uma abordagem multivariada.

Imhoff et al. (2013) realizaram um estudo para avaliar os indicadores físicos do solo, e relacionar o crescimento da planta com o comportamento do solo, estimando o impacto das cargas no solo à cultura. Obtendo relação significativa entre o índice de compressão e a densidade, conteúdo de água, matéria orgânica e teor de argila (R^2=0,77), e para a pressão de pré-consolidação houve correlação com a matéria orgânica e o conteúdo de argila (R^2=0,77). E gerando uma função não linear, para predição da máxima tensão aceitável nas operações agrícolas (R^2=0,88).

Ortigara et al. (2015) realizaram um trabalho de modelagem da tensão de pré-consolidação (σ_{pc}) e do índice de compressão (I_C) em função da resistência a penetração (RP) e do conteúdo de água no solo, em Latossolo Vermelho. A σ_{pc} teve um aumento e o I_C uma diminuição de forma linear, com o incremento da RP, além da umidade do solo influenciar diretamente no comportamento destas variáveis. Desta forma é possível estimar a capacidade de suporte de carga do solo e sua susceptibilidade a erosão, a partir da RP e da umidade.

An et al. (2015) examinaram os fatores dominantes que afetam a tensão de pré-consolidação (σ_{pc}) para dois solos aráveis no nordeste do Japão, avaliando o conteúdo de água no solo e a densidade. Para ambos os solos a σ_{pc} foi positivamente correlacionada à densidade, e negativamente correlacionada ao conteúdo de água.

Lima et al. (2015) realizaram um estudo com o intuito de avaliar a relação entre as propriedades físicas do solo e a variação da tensão de pré-consolidação (σ_{pc}) de um solo coeso cultivado com cana-de-açúcar no nordeste brasileiro. Concluindo que a densidade do solo, resistência a penetração, teor de argila, limite de liquidez e plasticidade tiveram relação positiva com a σ_{pc}, possuindo maior influência da densidade no modelo. Obtendo, desta forma, um modelo de regressão linear múltiplo para a σ_{pc}, estabelecendo as relações das variáveis, o conteúdo de água e o carbono orgânico que tiveram uma correlação negativa com a σ_{pc}, diferentemente da densidade, resistência a penetração, conteúdo de argila, porosidade e limites de liquidez e plasticidade, que apresentaram correlação positiva.

4. MATERIAL E MÉTODOS:

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar (EECAC), localizada no município Carpina, Zona da Mata Setentrional de Pernambuco, altitude média de 180 m, distando 56 km da cidade de Recife, PE. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a área é considerada tropical úmida do tipo “As” ou

pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmida, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C (Tavares, 2012), e precipitação pluviométrica média de 1.400 mm. O solo é caracterizado como Argissolo Amarelo distrocoeso EMBRAPA (2006), e classe textural franco-arenosa conforme a caracterização granulométrica (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição do Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC).

	Valores médios	
	0,00 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m
Areia ($g.kg^{-1}$)	793,63	802,28
Silte ($g.kg^{-1}$)	157,5	140,75
Argila ($g.kg^{-1}$)	43,75	48,5
Densidade do solo ($Mg.m^{-3}$)	1,56	1,61
Densidade de partículas ($Mg.m^{-3}$)	2,35	2,35
Limite de plasticidade* ($g.g^{-1}$)	12,55	12,55
Limite de liquidez*($g.g^{-1}$)	17,51	17,51

*Fonte: Lima et al., 2015.

Os ensaios de compressibilidade e caracterização do solo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos, enquanto a curva de retenção de água no solo foi realizada no Laboratório de Dinâmica de Águas no Solo, ambos da UFRPE.

As amostras foram coletadas no período de junho e novembro de 2016 em um talhão sob o cultivo de cana-de-açúcar, com o plantio realizado em 2012. O preparo do solo consistiu do uso de grade aradora e grade niveladora para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação de calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos com espaçamento de 1,10 m, para o plantio.

A cana foi semeada manualmente, com a variedade RB922579, distribuindo os rebolos de maneira que obtivessem 18 gemas por metro linear. O talhão encontrava-se com a cultura no seu quarto ciclo produtivo, consequentemente houve o tráfego correspondente à colheita, com carregadoras convencionais e caminhões que se deslocam paralelos ao talhão.

A coleta das amostras deformadas para a caracterização do solo foi realizada na área nos pontos que foram realizadas as coletas das amostras não deformadas. As frações granulométricas foram obtidas pelo método do densímetro de Boyoucos;

enquanto a densidade seca do solo (DS) foi obtida pelo método do anel volumétrico e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011).

Seguindo com a caracterização do solo foi utilizada a curva característica de retenção de água, coletando amostras não deformadas com anéis de metal rígido de diâmetro de 0,05 m, altura de 0,05 m no local do experimento, nas camadas de 0,00 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, em 20 pontos aleatórios na área. O material coletado foi protegido em sacos plásticos e acomodado em caixa de isopor para que não alterar a estrutura natural no transporte ao laboratório (Figura 1).

As amostras foram saturadas por 24 horas, por elevação gradual do nível d'água até o limite de dois terços da altura do anel em seguida submetidas a sucções de 1; 2; 6 kPa na mesa de tensão, e na câmara de Richards e aplicadas as tensões de 0,33; 0,6; 1,0; 5,0; 15,0 kPa.

Figura 1. Vista da mesa de tensão (à esquerda) e câmara de Richards (à direita), utilizadas para confecção da curva de retenção de água no solo.

Em seguida os dados de conteúdo de água saturado, conteúdo de água residual e conteúdo de água no ponto de murcha permanente foram submetidos ao modelo de ajuste proposto por Van Genuchten, para a confecção da curva de retenção de água no solo (Figura 2).

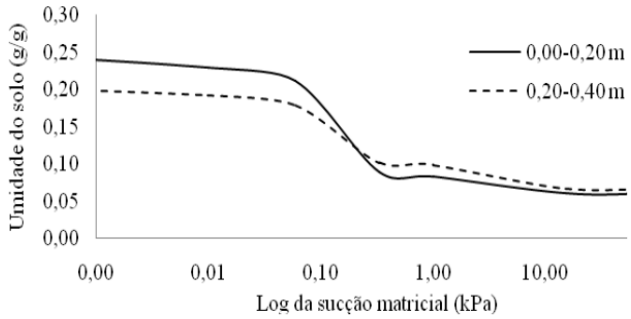

Figura 2. Curva característica de sucção do Argissolo Amarelo distrocoeso.

Para o ensaio de adensamento foram utilizadas as amostras não deformadas em anel metálico rígido de 0,0635 m de diâmetro por 0,025 m de altura (Figura 3), nas camadas de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m (Figura 3).

Figura 3. Vista do cilindro metálico para coleta de amostra não deformada com diâmetro de 0,065 m e altura de 0,025 m, do ensaio de compressibilidade.

As coletas de amostras não deformadas do solo, para o ensaio de adensamento, foram realizadas em 12 pontos de forma aleatória, num total de 120 corpos-de-prova, nos meses de junho e novembro de 2016. Quanto à distribuição, os pontos de coleta encontravam-se nas entre linhas do canavial com espaçamento de aproximadamente 16 metros entre pontos na mesma entre linha, e 10 metros nas entre linhas. Em cada ponto foram retiradas 10 amostras, sendo cinco na camada de 0,00 a 0,20 m e cinco na de 0,20 a 0,40 m, os quais foram submetidos a cinco conteúdos de água (0,09; 0,12; 0,15; 0,17 e 0,20 $g.g^{-1}$). O material coletado foi protegido por filme plástico e acomodado em uma caixa de isopor para não alterar a estrutura natural durante o transporte até o laboratório.

As umidades (U) submetidas aos ensaios de adensamento foram escolhidas a partir do comportamento da curva característica de sucção do solo (Figura 2), na qual a umidade de saturação encontra-se em 0,20 $g.g^{-1}$ e ocorre uma mudança no comportamento da curva a 0,09 $g.g^{-1}$, desta forma os outros três pontos foram obtidos com os valores intermediários, totalizando cinco umidades.

A obtenção das umidades nos corpos-de-prova se deu por diferença gravimétrica, adicionando a massa de água a partir da massa de solo seco presente em cada amostra, excluindo a massa do anel metálico, previamente pesado isolado, submetendo a 0,09 ($U_{9\%}$); 0,12 ($U_{12\%}$); 0,15 ($U_{15\%}$); 0,17 ($U_{17\%}$) e 0,20 ($U_{20\%}$) $g.g^{-1}$, com uma variação de ±1. As amostras que apresentaram umidade fora destas faixas, após o termino do ensaio de adensamento, foram descartadas para os cálculos.

Os ensaios foram realizados em uma prensa de adensamento, tipo Bishop, da Solotest (Figura 4) com a metodologia da NBR 1200790 (ABNT, 1990). Na prensa cada

amostra foi submetida a tensões verticais estáticas com razão igual a dois, com sequência de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, cada tensão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima, em seguida manteve-se a amostra por 30 segundos sem peso para a recarga do corpo-de-prova, dando prosseguimento com o ensaio de adensamento aplicando as demais cargas. Após o ensaio as amostras foram levadas a estufa para a secagem e obtenção do conteúdo de água.

Figura 4. Vista da prensa de adensamento Solotest tipo Bishop, com relação 1:10.

Com base nos resultados obtidos no ensaio as curvas de compressibilidade foram traçadas, com o auxilio da planilha eletrônica Compress 1.0. O eixo das abcissas é composto pelo logaritmo das pressões aplicadas, e nas ordenadas o índice de vazios. A curva apresenta duas regiões distintas: a primeira, onde ocorrem pequenas deformações elásticas e reversíveis (Figura 5), outra região corresponde à reta virgem de compressão (realçada pela linha B) a partir da qual a tensão aplicada ao solo leva a deformações irreversíveis. O valor da tensão de pré-consolidação encontra-se na intersecção destas duas curvas.

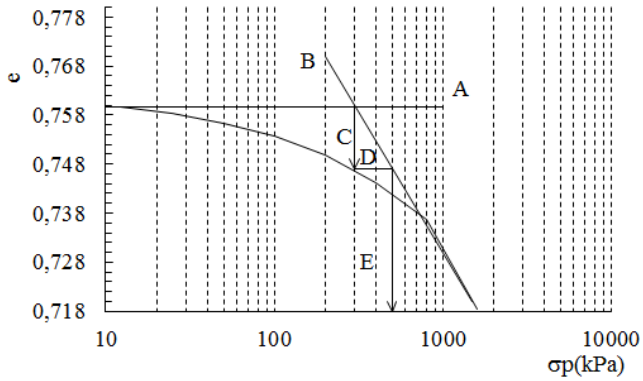

Figura 5. Tensão de pré-consolidação pelo método de Pacheco Silva.

O programa Compress 1.0 adota a equação de Van Genutchen (1980) substituindo umidade pelo índice de vazios (*e*), e os valores de potenciais de água pelas tensões verticais aplicadas (σ):

$$e = e_f + \frac{(e_i - e_f)}{(1 + \alpha\sigma^n)^m}$$

Onde, os índices *i* e *f* tratam do valor inicial e final de *e*, respectivamente. Assumindo a situação de contorno, cuja máxima compactação possível o $e_f = 0$, a equação se reduz a:

$$e = \frac{e_i}{(1 + \alpha\sigma^n)^m}$$

Determinando a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão pelo método de Casagrande (1936), para a curva *e=f(σ)*, determinando o raio da curva num ponto qualquer pela equação:

$$R = \frac{[1 + (de/d\sigma)^2]^{3/2}}{d^2\, e/d\sigma^2}$$

na qual $de/d\sigma$ é a primeira derivada e $d^2\, e/d\sigma^2$ é a segunda derivada da curva *e=f(σ)*.

As variáveis foram analisadas por meio de estatística descritiva, onde se obtiveram os valores da média, mediana, coeficiente de variação, valores de mínimo e máximo, assimetria e curtose.

O grau de variação ou dispersão dos dados foi estimado pelo coeficiente de variação (CV), conforme descrito em Warrick e Nielsen (1980), que classificam como baixa variabilidade o CV < 12%; média para o intervalo 12 a 60% e alta variabilidade quando CV > 60%.

As análises de variância foram efetuadas utilizando o pacote estatístico Assistat, versão 7.7, avaliando a hipótese de que o solo apresenta um incremento da tensão de pré-consolidação a medida que se aumenta a umidade no meio, sendo que este incremento pode ser estipulado através de um modelo matemático. Quando necessário efetuou-se comparação de médias entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a elaboração dos modelos utilizados, foram testados os ajustes em modelos de regressão, para a variável tensão de pré-consolidação em função da umidade e da densidade, nas camadas trabalhadas (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m), conforme a descrição abaixo:

a) Modelo de regressão linear

Em função da tensão de pré-consolidação um modelo linear múltiplo foi ajustado de acordo com a equação:

$$Yi = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 DS + \beta_3 TA + \varepsilon$$

onde, *Yi* é o i-ésimo valor da tensão de pré-consolidação observado, β_1, β_2 e $\beta_3$são os parâmetros do modelo e ε é o erro aleatório associado a observação y*i*.

Os parâmetros β_j foram submetidos ao teste t-Student, para verificar quais dos atributos físicos altera significativamente a σ_{pc}. Então com os fatores significativos foi construído o modelo de regressão e o teste novamente aplicado para confirmação dos parâmetros do modelo.

b) Modelos de regressão não linear

Um modelo de regressão não linear múltiplo (Lyra et al., 2003) também foi ajustado:

$$Yi = \beta_0 \times U^{\beta_1} \times DS^{\beta_2} \times TA^{\beta_3} + \varepsilon$$

as estimativas dos parâmetros β_1, β_2 e β_3 se deu com os mínimos quadrados do algoritmo de Gauss-Newton. A partir dos atributos significativos um submodelo de regressão foi confeccionado e o teste t novamente aplicado para confirmar os parâmetros no modelo.

c) Modelo de Busscher (1990)

Neste ajuste, a σ_{pc} varia com a U a e DS em um comportamento não linear dado por Busscher (1990):

$$Y_i = \beta_1 \times U^{\beta_2} \times DS^{\beta_3} + \varepsilon$$

onde β_1, β_2 *e* β_3 são parâmetros de ajustes do modelo.

Todos os procedimentos gráficos e de ajustes foram feitos usando o Software R (R Core Team, 2017).

d) Modelo Dias Júnior (1994)

O terceiro modelo foi o proposto por Dias Júnior (1994), em que σ_{pc} é função da umidade do solo (U) na forma de logaritmo, conforme a equação:

$$Yi = 10^{(\beta 0 + \beta 1 U)} + \varepsilon$$

em que *Yi* é a i-ésima observação de tensão de pré-consolidação, β_0 e β_1 são os parâmetros do modelo e ε é o erro aleatório da observação.

e) Modelo linear quadrático:

Neste modelo, a σ_{pc} varia linearmente com a U e quadraticamente com a DS. Considerando ambos os efeitos, temos:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 U + \beta_3 DS + \beta_4 DS^2 + \varepsilon$$

Onde, β_1, β_2, β_3 e β_4 são parâmetros de ajustes do modelo.

Dentre os modelos, os que mais se ajustaram para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m foram separados e realizadas também, análises exploratórias a fim de verificar o comportamento da tensão de pré-consolidação (σ_{pc}) em função da umidade (U) e da densidade inicial (DS).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo estudado foi classificado como franco arenoso, o que corrobora os resultados de outros pesquisadores para os solos de EECAC (Tavares et al., 2017; Ortiz et al., 2017) que apresenta elevados teores de areia. A granulometria do solo apresentou média variabilidade (12% < CV < 60%) para a areia e baixa variabilidade (CV<12%) para silte e argila, segundo Warrick e Nielsen (1980), resultados obtidos devido sua distribuição uniforme nas camadas estudadas (Tabela 3).

Tabela 3. Estatística descritiva da granulometria do Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC).

	Argila	Areia	Silte
		0,00-0,20 m	
Média	43,75	793,63	157,50
Mediana	43,50	800,00	158,50
Assimetria	0,29	-0,49	0,15
Curtose	-0,81	-0,25	-0,89
DP	15,06	22,25	8,00
CV	34,43	2,80	5,08
		0,20-0,40 m	
Média	48,50	802,28	140,75
Mediana	48,00	806,00	143,00
Assimetria	-0,64	-1,33	0,45
Curtose	0,69	0,09	0,09
DP	13,85	5,82	15,68
CV	28,56	0,72	11,14

DP – desvio padrão, CV – coeficiente de variação,

Houve incremento dos teores de Areia e Argila com a profundidade e decréscimo do teor de silte. O decréscimo do silte em profundidade também foi observado por Tavares (2016) após o revolvimento do solo durante seu preparo com grade aradora e sulcador. Valores de assimetria e curtose próximos a zero indicaram que as variáveis apresentam distribuição próxima a normal, com exceção da areia em 0,2-0,4 m, que indica uma distribuição para os maiores valores.

Em se tratando da relação densidade e textura, solos arenosos apresentam maiores valores de densidade, seguido dos solos siltosos e os argilosos os que possuem menores valores de densidade (Libardi, 2005)

Ao utilizar a estatística experimental em delineamento inteiramente casualizado (Tabela 4) pode-se observar o comportamento da deformação em cada umidade. Na camada superficial de 0,00 a 0,20 m, para um total de 48 repetições, obtive o coeficiente de determinação (R^2) de 0,67 e coeficiente de variação (CV) de 11,69%, classificando-o segundo Warrick e Nielsen (1980) como média dispersão de dados. Na analise de variância (ANOVA) pode-se observar o valor de p menor que 0,0001, desta forma rejeitamos a hipótese de nulidade do experimento (H_0), e afirmamos que há diferença significativa entre os tratamentos estudados.

Tabela 4. Analise de Variância da tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na camada de 0,00 a 0,20 m.

F.V.	SQ	GL	QM	F	p-valor
Tratamento	7166,71	4	1791,68	21,51	<0,0001
Erro	3580,97	43	83,28		
Total	10747,68	47			

Para a camada subsuperficial (0,20 a 0,40 m) a estatística experimental em delineamento inteiramente casualizado (Tabela 5) denota o comportamento da tensão de pré-consolidação em cada umidade. Na análise de variância (ANOVA) pode-se observar o valor de p menor que 0,0002, desta forma rejeitamos a hipótese de nulidade do experimento (H_0), e afirmamos que há diferença significativa entre os tratamentos estudados.

Aplicando o teste de Tukey a 5% na camada 0,00-0,20 m, (Tabela 6) para comparar a diferença mínima significativa entre as médias pode-se observar que nos tratamentos com maior umidade, até de 0,20 a 0,15 $cm^3.cm^{-3}$ não houve diferença significativa, sendo estatisticamente semelhantes, porém diferem a 0,12 e 0,09 $cm^3.cm^{-3}$. Caracterizando o comportamento da camada superficial como mais resistentes à tensão

de pré-consolidação quando mais secos. Ao aplicar o teste de Tukey a 5%, avaliando as médias na camada 0,20-0,40 m pode-se observar que o solo com 0,22 $cm^3.cm^{-3}$ de umidade difere estatisticamente do solo a 0,09 $cm^3.cm^{-3}$, porem os valores intermediários se comportam de forma semelhante, variando pouco ao apresentar a classificação "B" nos mesmos.

Tabela 5. Analise de Variância da tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na camada de 0,2 a 0,4 m.

F.V.	SQ	GL	QM	F	p-value
Tratamento	2955,82	4	738,95	7,12	0,0002
Erro	4046,78	39	103,76		
Total	7002,59	43			

Tabela 6. Teste de Tukey a 5% para a tensão de pré-consolidação sob diferentes umidades de um Argissolo Amarelo distrocoeso.

Umidade ($cm^3.cm^{-3}$)	Média (kPa)	
0,00 - 0,20 m		
0,20	66,06	a
0,17	68,78	a
0,15	72,07	a
0,12	92,7	b
0,09	96,11	b
0,20 - 0,40 m		
0,22	75,38	a
0,17	84,79	ab
0,15	90,5	bc
0,12	96,83	bc
0,09	99,22	c

Os valores médios obtidos neste trabalho foram superiores, devido à idade do talhão (quatro safras), o que confere ao solo um maior nível de compactação. Para a mesma classe de solo Lima et al (2013) verificou σ_{pc} de 73,03 kPa para preparo composto de uma gradagem pesada e duas passadas com grade niveladora, logo após, sulcada com o espaçamento de 1,0 m, irrigado.

Souza et al. (2012) propõe o uso do controle de tráfego para diminuir a homogeneidade da compactação e aumentar a capacidade de suporte de carga na linha do rodado, possibilitando o tráfego em maiores umidades sem que haja danos à cultura. Para Silva e Cabeda (2006) o reflexo do histórico de tensões dos solos cultivados, em

que cargas aplicadas pelas máquinas agrícolas nas operações de cultivo promoveram maior grau de compactação nos solos, conferindo uma maior resistência à compressão.

A Figura 6, apresenta a distribuição dos dados da tensão de pré-consolidação (σ_{pc}) em função da umidade (w) e densidade do solo (Bd) nas duas profundidades, agrupando os dados de tensão de pré-consolidação. Pode-se observar uma tendência no comportamento do solo similar nas duas camadas, nas quais com o aumento da umidade há uma queda nos valores das tensões, e em amostras que apresentaram maior densidade do solo a tendência é apresentarem um aumento também na tensão.

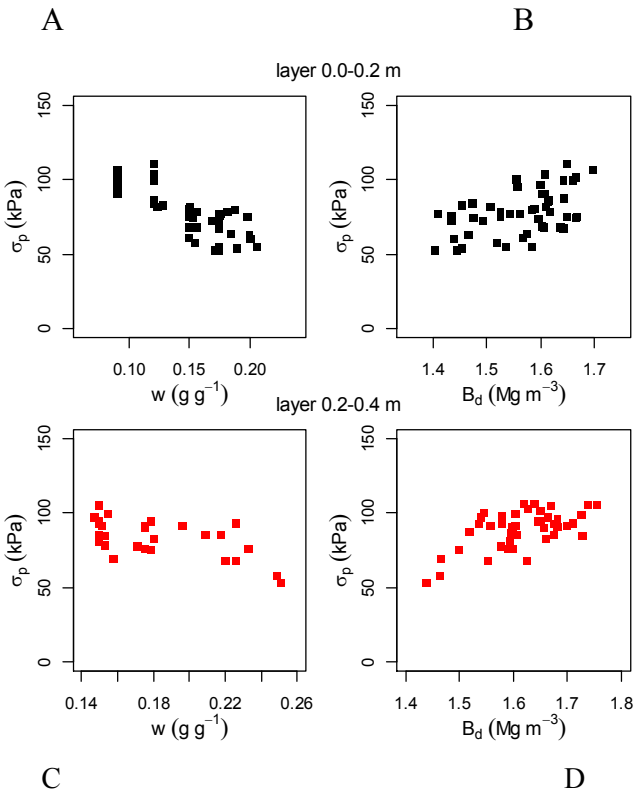

Figura 6. Dispersão dos dados de tensão de pré-consolidação em função do conteúdo de água ($g.g^{-1}$) (A e C) e da densidade do solo ($Mg.m^{-3}$) (B e D), nas camadas de 0,00 - 0,20 m e de 0,20 - 0,40 m. (w = umidade; Bd = densidade)

Cortez et al. (2014) relatam que com o aumento do número de passadas de máquinas agrícolas, principalmente de maquinário com o rodado estreito, há um aumento da densidade do solo, com isso o nível de compactação também sofre um aumento e a porosidade é afetada negativamente com a compactação. Esta condição foi observada por Mion et al. (2013), em que a σ_{pc} aumentou com o número de passadas de veículos sobre a área.

Vischi Filho et al. (2015) relatam em seu trabalho que o aumento da umidade do solo reduz a resistência interna das partículas, visto que é formada uma película líquida que envolve os agregados, reduzindo o atrito e facilitando a deformação.

Na Figura 7 pode-se observar o comportamento do modelo linear, imprimindo a resposta as suas variáveis, evidenciando que os menores valores de tensão de pré-consolidação se fazem presentes em condições de alta umidade e baixa densidade. Resultados semelhantes a esses foram encontrados por Lima et al. (2015), Saffih-Hdadi et al. (2009) e por Vischi Filho et al. (2015).

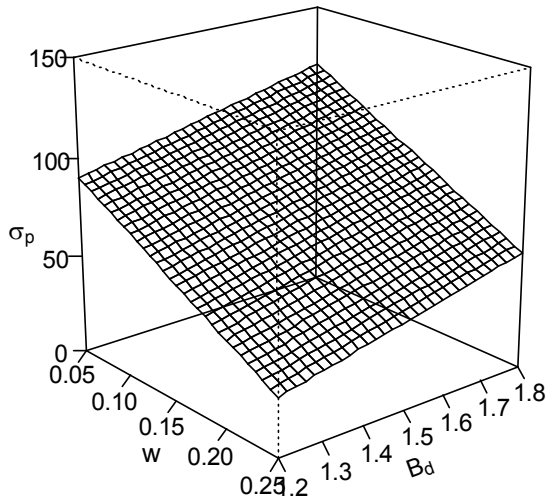

Figura 7. Modelo ajustado Linear para a capacidade de suporte de carga na camada de 0,00 - 0,20 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar. σ_p – tensão de pré-consolidação, w – umidade do solo; bd – densidade do solo

Os dados ajustados pelo o modelo (Figura 7) denotam um comportamento linear da relação umidade e tensão de pré-consolidação, no qual a σ_{pc} decresce com conteúdo de água no solo em ambas as profundidades. Quanto a relação da σ_{pc} e a densidade do solo, há um comportamento linear do modelo, e as camadas diferenciam-se novamente pela inclinação da reta, denotando a maior susceptibilidade à compactação da camada superficial.

A Ds pode influenciar no incremento do estado de compactação do solo por contribuírem na força de atrito entre as partículas (Imhoff et al., 2004) e pela diminuição do espaço poroso (Debiasi et al., 2008), o que pode gerar maior resistência do solo ao crescimento de raízes no seu interior quanto a capacidade de suporte de carga como a de um veículo.

Klein (2008) relata que a densidade do solo traduz o estado do solo a partir da relação peso/volume de solo, porém é um atributo naturalmente variável em função do

manejo aplicado, textura, estrutura, mineralogia e teor de matéria orgânica também são fatores que influenciam esta variável. Geralmente em profundidade há o aumento da densidade seca do solo, visto que as camadas superiores inferem tensões verticais às camadas inferiores, proporcionando o adensamento, além dos mecanismos de eluviação da argila, que interferem na diminuição da porosidade (Pádua et al. 2015).

Para o modelo linear na camada 0,20 a 0,40 m (Figura 8) pode ser observado, tanto a umidade com a σ_{pc}, quanto a densidade com a σ_{pc} tem um comportamento linear inversamente e diretamente proporcionais.

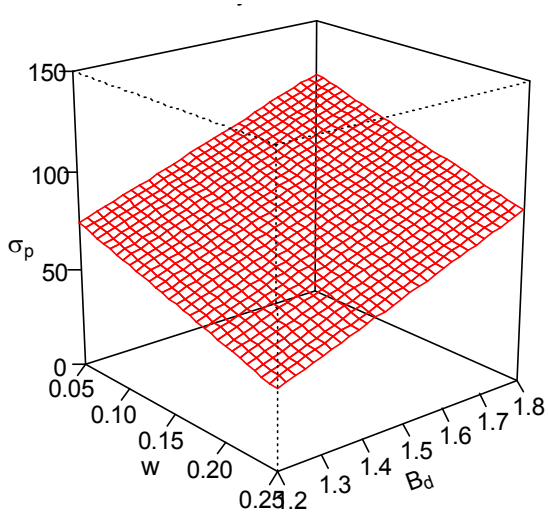

Figura 8. Modelo Linear ajustado para a capacidade de suporte de carga na camada de 0,20 - 0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.

A variação da σp em função da umidade e Ds foi mais acentuada na camada 0,00-0,20 m. O modelo desenvolvido que mais se adequou a realidade da área foi obtido pelo método linear apresentando os melhores R^2 (Tabela 7). A densidade do solo de ambas as equações foram significativas a *p* é < 0,001 e a umidade também a *p* é < 0,0001 demonstrando a força que estas duas variáveis físicas possuem na característica mecânica deste solo, visto que as condições granulométricas não diferiram significativamente na composição dos modelos.

Pacheco e Cantalice (2010) verificaram que camadas coesas apresentam DS de 1,5 a 1,8 $Mg.m^{-3}$, nos horizontes superficiais em condição natural varia de 1,2 a 1,4 Mg m^{-3} e nas zonas canavieiras a DS varia de 1,3 a 1,8 $Mg.m^{-3}$. O presente estudo apresentou DS acima da condição natural e abaixo do que foi observado por Pacheco e Cantalice (2010) em áreas muito manejadas. Segundo o autor, a intensidade e frequência do preparo do solo afeta sua estrutura e isto repercute nos atributos de densidade seca do solo, umidade e porosidade.

Ortiz et al. (2016) ao avaliar a densidade em Argilossolo Amarelo distrocoeso no EECAC, em talhões de cana-de-açúcar observou valores na cana planta de 1,4 $Mg.m^{-3}$ e na terceira rebrota valores de 1,73 $Mg.m^{-3}$, dados que são similares aos encontrados na pesquisa.

Tabela 7. Modelos de capacidade de suporte de carga selecionados, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivados com cana-de-açúcar nas camadas de 0,00 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, respectivamente.

Camada	Modelo Linear	R^2
0,0-0.2	$\sigma_p = 46{,}40 - 303.83U^{***} + 49.25DS^{**}$	0,70
0,2-0.4	$\sigma_p = -12{,}25 - 173.05U^{***} + 79{,}62DS^{***}$	0,71

*** *p*-value < 0,0001; ** *p*-value < 0,001;σ_{ps} – tensão de pré-consolidação; U – umidade gravimétrica; DS – densidade seca do solo.

A umidade apresenta um comportamento inversamente proporcional, caracterizado pelo sinal negativo na função, apresentando um decréscimo na σ_{pc} com o aumento do conteúdo d'água. Em contrapartida a σ_{pc} reproduz uma atuação diretamente proporcional à densidade do solo, tendo um incremento da tensão com o aumento da densidade. Porem dentre as duas variáveis físicas a que mais se destaca na composição da variável mecânica é a umidade. Distinguindo as camadas ao apresentar maior inclinação na superfície, e em subsuperfície essa inclinação ser mais branda, evidenciados a partir dos valores de coeficiente das equações e o comportamento dos modelos (Figuras 7 e 8), caracterizando a maior susceptibilidade do solo a degradação na camada superficial.

Autores (Tabela 1) encontraram bons ajustes e correlação semelhante, $R^2 > 50\%$, ao ajustarem modelos para σ_{pc} com atributos do solo como umidade, densidade, limites de consistência, matéria orgânica, resistência a penetração, teor de argila. O que mais se assemelha a este trabalho é o de Salffi-Hdadi et al. (2009) para solos de textura média a fina, tendo como componentes da variável σ_{pc}, umidade e densidade do solo, contribuindo de forma semelhante a obtida neste trabalho e com R^2 de 0,76, bem próximo a 0,70 para camada superficial e 0,71 em subsuperfície, Salffi-Hdadi também obteve os R^2 foram de 0,50 para solos médios e 0,57 para solos grossos.

Lima et al. (2015), obtiveram boa correlação das suas variáveis em condições semelhantes, gerando um modelo para tensão de pré-consolidação com R^2 de 0,83 e

0,80 nas camadas de 0,10-0,13 e 0,30 a 0,33 respectivamente. Diferentemente do realizado neste trabalho, Lima et al. (2015) elaboraram modelos com mais variáveis físicas e mecânicas, porém não trabalharam com uma faixa de umidade baseada na curva característica de retenção de água; também comprovaram que o conteúdo de água e o carbono orgânico, tiveram correlação negativa no modelo, e a densidade do solo, mais resistência a penetração, conteúdo de argila, porosidade e os limites de liquidez e plasticidade, apresentaram correlação positiva.

Severiano et al. (2010) fizeram uma adaptação do modelo não linear proposto por Busscher (1990), em Latossolo vermelho e em Cambissolo variando a umidade do solo e a densidade do solo, substituindo a resistência a penetração pela tensão de pré-consolidação pela relação positiva existente entre estas variáveis. Os autores consideraram os modelos com elevada predição, porém não apresentaram elevada significância em suas variáveis, diferentemente dos modelos aqui propostos. Iori et al. (2012) compôs um modelo não linear para Argissolos e Cambissolos, levando apenas em consideração o conteúdo de água.

Imhoff et al. (2013) elaboraram um modelo para Chenossolo argentino, a partir da resistência a penetração e sua relação positiva com a tensão de pré-consolidação, cujas variáveis, matéria orgânica, conteúdo ou teor de argila e umidade, se comportaram na forma de logaritmo natural. An et al. (2015) registrou resultados semelhantes a esses, tendo no seu modelo uma correlação positiva com a densidade e negativa com a umidade. Ortigara et al. (2015) também obteve a correlação negativa com a umidade, cujo modelo apresentou um aumento linear da tensão de pré-consolidação com o aumento da resistência a penetração, e a umidade teve sua contribuição direta no comportamento destas duas variáveis.

Um exemplo para esta camada é supor uma densidade de 1,56 $Mg.m^{-3}$, verificando-se no solo, sob a maior condição de umidade (0,20 $g.g^{-1}$), tensão de pré-consolidação de 63 kPa, e sob a menor condição de umidade (0,09 $g.g^{-1}$) uma tensão de pré-consolidação de 96,5 kPa. Em relação à camada 0,20-0,40 m a σp limitou-se de 77 e 96,19 kPa, sob as condições sugeridas aqui.

Sendo assim, a variação entre os valores denotam uma inclinação nos modelos e, portanto, o quanto cada camada esta susceptível a degradação por compactação, então a camada superficial possui valores de tensão baixos resultando em compactação adicional mesmo com cargas reduzidas aplicadas, já em subsuperfície os implementos que revolvem o solo não atingem tal profundidade, ocasionando tensões maiores e um

suporte maior de cargas. Então o mesmo maquinário que causa compactação adicional em superfície pode não degradar o solo em subsuperfície.

Keller et al. (2011) encontrou resultados semelhantes, ao investigar o tamanho das partículas do solo e sua relação com a tensão de pré-consolidação, no qual houve aumento da tensão de pré-consolidação com a diminuição do índice de vazios, ou aumento da densidade do solo.

Hamza et al. (2011) também observou que o aumento da umidade juntamente com a aplicação de cargas no solo acarreta num aumento preocupante da densidade do solo e da resistência a penetração na camada superficial.

6. CONCLUSÕES

As médias da tensão de pré-consolidação apresentaram diferença significativa quando comparadas por camada, apresentando maiores valores de tensão nas menores umidades.

O modelo linear se ajustou as condições do solo e manejo da área nas duas camadas analisadas, sendo a tensão de pré-consolidação em função da umidade e da densidade do solo.

O conteúdo de água no solo apresentou correlação negativa com a tensão de pré-consolidação, e a densidade do solo apresentou correlação positiva.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12007: Solo. Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro; ABNT, p. 13, 1990.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo. Determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro, p. 3, 1984a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo. Determinação do limite de plasticidade e índice de plasticidade em solos. Rio de Janeiro, p. 6 1984b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7182: Solo: ensaio de compactação – procedimento. Rio de Janeiro, p. 10, 1986.

Aguiar, D. A.; Silva, W. F.; Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M.; Carvalho, M. A. Expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: safras 2003/2004 a 2008/2009. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, p. 9-16, abril 2009.

Alaoui, A.; Lipiec, J.; Gerke, H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. Soil and Tillage Research, v.115, p.1-15, 2011.

An, J.; Zhang, Y.; Yu, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. Soil and Tillage Research, v.145, p.216-223, 2015.

Arvidsson, J.; Keller, T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. Soil and Tillage Research, v.96, p.284-291, 2007.

ASTM – American Society for Testing and Materials. D 6528: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. West Conshohocken, p. 9, 2007.

Bengough, A. G.; Mullins, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science, v.41, p.341-358, 1990.

Boussinesq, J. Application des potentiels à l'étude de l'e ´quilibre et des mouvements des solides élastiques. Gauthier-Villars, Paris, p. 30, 1885.

Busscher, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.3, n.2, p.519-524, 1990.

Casagrande, A. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: Proc. Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass, USA, v.3, p.60-64, 1936.

Chaplain, V.; Défossez, P.; Richard, G.; Tessier, D.; Roger-Estrade, J. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. Soil and Tillage Research, v.111, p.105-114, 2011.

Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v.3, safra 2016/2017. n.3, Terceiro levantamento. Brasília, p.1-78, dezembro, 2016.

Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Available at: http://www.R-project.org/. Accessed 20 Jan 2017. 2017.

Cortez, J. W.; Olszevski, N.; Pimenta, W. A.; Patrocínio Filho, A. P.; Souza, E. B.; Nagahama, H. J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, p. 1000-1010, 2014.

Costa, A. R. F. C.; Rolim, M. M.; Bonfim-Silva, E. M.; Simões Neto, E. E.; Silva, E. F. F.; Pedrosa, E. M. R. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. Australian Journal of Crop Science, v. 10, p. 362-369, 2016.

Coulomb, C. A. Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie royale des sciences par divers savants, v.7, p.343-382, 1776.

Cui, K.; Défossez, P.; Cui, Y. J.; Richard, G. Quantifying the effect of matric suction on the compressive properties of two agricultural soils using an osmotic oedometer. Geoderma, v.156, p.337-345, 2010.

Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.2629-2637, 2008.

De Pádua, E. J., Guerra, A. R., Zinn, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.39, n.3, p. 725-736, 2015.

Dias Junior, M. S. Compression of three soils longterm and wheel traffic. Tese (doutorado). Michigan State University, East Lansing, p. 114, 1994.

Dias Junior, M.; Pierce, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technology, v.8, p.139-151, 1995.

Dias Junior, M. S.; Pierce, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.20, p.175-182, 1996.

Eavis, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. Plant and Soil, v.36, p.613-622, 1972.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. Ed. Rio de Janeiro, p.306, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de analises de solo. 2.Ed. Rio de Janeiro, 2011.

Farias, I. L.; Pacheco, E. P.; Viégas, P. R. A. Characterisation of the optimal hydric interval for a Yellow Argisol cultivated with sugarcane on the coastal plains of Alagoas, Brazil. Revista Ciência Agronômica, v.44, p.669-675, 2013.

Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley e Sons, p. 517, 1993.

Fröhlich, O. K. Druckverteilung im Baugrunde [Pressure Distribution in Foundation Soils]. Springer Verlag, Wien, Austria, p.183, 1934.

Giarola, N. F. B.; Silva, A. P.; Inholff, S.; Dexter, A. R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. Geoderma, v.113, p.95-108, 2003.

Gomes, A. W. AL.; Saad, J. C. C.; Barros, A. C. Simulação da produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* l.) na região nordeste do Brasil, utilizando o modelo DSSAT. Irriga, v.19, p.160, 2014.

Haines, W. B. Studies of Physical properties of Soils: The hysteresis effects in capillarity properties and modes of moisture distribution associated. Journal Agricultural Science. V.20, p.97-116, 1930.

Hamza, M. A.; Al-Adawi, S. S.; Al-Hinai, K. A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. Soil and Tillage Research, v.49, p.135-142, 2011.

Hillel, D. Fundamentals of soil physics. In: Fundamentals of soil physics. Academic Press, p.365-413, 1980.

Holtz, R. D.; Kovacs, W. D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, p.733, 1981.

Iaia, A. M.; Maia, J. CS.; Kim, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.523-530, 2006.

Imhoff, S.; Silva, A. P.; Ghiberto, P. J.; Tormena, C. A.; Pilatti, M. A.; Libardi, P. L. Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina. Plos One, v.11, p.1-21, 2013.

Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Júnior, M. S.; Lima, J. M. Pressão de pré-consolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de Cambossolo Háplico, Argissolo Amarelo e Gleissolo Háplico em Registro, SP. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, p.1448-1456, 2012.

Keller, T.; Arvidsson, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. Soil and Tillage Research, v.79, p.191-205, 2004.

Keller, T.; Lamandé, M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. Soil and Tillage Research, v.111, p.54-64, 2010.

Keller, T.; Lamandé, M.; Peth, S.; Berli, M.; Delenne, J. Y.; Baumgarten, W.; Or, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. Soil and Tillage Research, v.128, p.61-80, 2013.

Keller, T.; Lamandé, M.; Schjønning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. Geoderma, v.163, p.13-23, 2011.

Kimpe, C. R.; Laverdiere, M. R.; Dejou, J. Distribution of silica, sesquioxides, and clay in Quebec podzolic soils and their effects on subsoil cementation. Soil Science Society of America Journal, v.47, p.838-840, 1983.

Klar, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. Nobel, São Paulo. 2 ed., p. 408, 1988.

Klein, V. A. Física do solo. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

Kondo, M. K.; Dias Junior, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, p.211-218, 1999.

Libardi, P. L. Dinâmica da Água no Solo. v. 61. Edusp, 2005.

Lima, C. L. R. D.; Silva, A. P. D.; Imhoff, S.; Leão, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, p.217-223, 2006.

Lima, R. P.; De Leon, M. J.; Silva, A. R. D. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. Revista Ceres. v.60, p.016-020, 2013.

Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Silva, A. R.; Pedrosa, E. M. R.; Ferreira, R. L. C. Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. Journal of Terramechanics, v.58, p.51-58, 2015.

Lipiec, J.; Ferrero, A.; Giovanetti, V.; Nosalewicz, A.; Turski, M. Response of structure to simulated trampling of woodland soil. Advances in Geoecology, v.35, p.133-140, 2002.

Lyra, G. B.; Zolnier, S.; Costa, L. D.; Sediyama, G. C.; Sediyama, M. A. N. Modelos de crescimento para alface (Lactuca sativa L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa de vegetação. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.11, n.1, p.69-77, 2003.

Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with soilflex during sugarcane harvest. Soil and Tillage Research. v.129, p.61–68, 2013.

Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.812-818, 2010.

Manly, B. F. J. Multivariate Statistical Methods: A Primer, second ed. Chapman e Hall, London, 1994.

Mion, R. L.; Pereira, V. P.; Sombra, W. A.; Andrade, R. R.; Cordeiro, I. M.; Nunes, K. G. Preconsolidation of ultisol subjected to the traffic of agricultural tractors. Revista Ciência Agrárias. v.56, p.69-72, 2013.

Nielsen, D. R.; Jackson, R. D.; Cary, J. W.; DD (Ed.) Evans. Soil water. Madison, WI: American Society of Agronomy, p. 145, 1972.

Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.435-442, 2011.

Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F.; Costa, Y. D.; Pedrosa, E. M. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.914-920, 2010.

Ortigara, C.; Moraes, M. T. D.; Debiasi, H.; Silva, V. R. D.; Franchini, J. C.; Luz, F. B. D. Modeling of Soil load-Bearing Capacity as a function of Soil Mechanical resistance to penetration. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.39, p.1036-1047, 2015.

Ortiz, P. F. S.; Silva, J. L. B.; Bezerra, R. R.; Oliveira, J. D. A.; Dantas, M. S. M.; Rolim, M. M. Densidade do solo como um dos indicadores de qualidade física para solos produtores de cana-de-açúcar. In: XVI Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFRPE 2016, Recife. JEPEX 2016. Recife, 2016.

Ortiz, P. F. S.; Rolim, M. M.; Lima, J. L. P.; Pedrosa, E. M. R.; Dantas, M. S. M.; Tavares, U. E. Physical qualities of na Ultisol under sugarcane and Atlantic Forest in Brazil. Geoderma Regional, v. 11, p. 62-70, 2017.

Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, p.403-415, 2011.

Portugal, A. F.; Costa, O, v.; Costa, L. M.; Santos, B. C. M. Características químicas e físicas de um Argissolo submetido a diferentes usos agrícolas. Ceres, v.54, p.412-421, 2007.

Rankine, W. J. M. A Manual of Applied Mechanics. Richard Griffin Co.; London Glasgow, p.640, 1858.

Richards, L.A.; Fireman, M. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. Soil Sciency. v.56, p.395-404, 1943.

Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. Soil and Tillage Research, v.105, p.96-103, 2009.

Schäffer, B.; Boivin, P.; Schulin, R. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. Soil Science Society of America Journal, v74, p.1483-1492, 2010.

Severiano, E. D. C.; Oliveira, G. C. D.; Dias Júnior, M. D. S.; Castro, M. B. D.; Oliveira, L. F.; Costa, K. A. D. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I-modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.1419-1427, 2010.

Shikida, P. F. A.; Moraes, M. A. F. D.; Alves, L. R. A. Agroindústria canavieira do Brasil: intervencionismo, desregulamentação e neocorporatismo. Revista de Economia e Agronegócio, v.2, p.361-382, 2015.

Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, p.921-930, 2006.

Silva, A. J. N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 120p. Tese de Doutorado, 2003.

Silva, R. D.; Lanças, K. P.; Miranda, E. E, V.; Silva, F. A. D. M.; Baio, F. H. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State–Brazil. Soil and Tillage Research, v.103, p.265-270, 2009.

Soane, B. D.; Van Ouwerkerk, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soil compaction in crop production. Elsevier Amsterdam, p. 1-26, 1994.

Souza, G. S.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Araújo, F. S.; Barbosa, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, p.603-612, 2012.

Tang, A. M.; Cui, Y. J.; Richard, G.; Défossez, P. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. Geoderma, v.162, p.171-181, 2011.

Tavares Filho, J.; Barbosa, G. M. C.; Guimarães, M. F.; Fonseca, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (Zea mays) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.725-730, 2001.

Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R.; Montenegro, A. A. A.; Magalhães, A. G.; Barreto, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, p.1206-1214, 2012.

Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, Ê. F. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.21(11), p. 752-757, 2017.

Taylor, H.; Brar, G. S. Effect of soil compaction on root development. Soil and Tillage Research, v.19, p.111-119, 1991.

Tekeste, M. Z.; Raper, R. L.; Schwab, E. B. Soil drying effects on soil strength and depth of hardpan layers as determined from cone index data. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Manuscript LW 07 010, v. X, 2008.

Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley Sons Inc, New York, 1943.

Trevisan, R. G.; Freddi, O. S.; Wruck, F. J.; Tavanti, R. R.; Peres, F. S. C. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. Bragantia, Epub January 30, 2017.

Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, v.41, p.892-898, 1980.

Vereecken, H.; Schnepf, A.; Hopmans, J. W.; Javaux, M.; Or, D.; Roose, T.; Allison, S. D. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. Vadose zone journal, v.15, n.5, 2016.

Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M. D.; Silva, R. B. D.; Lima, C. C. D.; Pereira, G.; de Moraes, D.; Souza, G. S. D. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.30, p. 322-332, 2015.

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. p. 319-344, 1980.