



**WILLIAN SANTIAGO VILLAFUERTE CABRERA**

**PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO EM FUNÇÃO DO  
TEMPO E DA APLICAÇÃO DE PRESSÕES PRÉVIAS**

**LAVRAS-MG**

**2020**

**WILLIAN SANTIAGO VILLAFUERTE CABRERA**

**PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO EM FUNÇÃO DO  
TEMPO E DA APLICAÇÃO DE PRESSÕES PRÉVIAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. PhD. Moacir de Souza Dias Junior  
Orientador

Dr. Diego Tassinari  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Villafuerte Cabrera, Willian Santiago.

Pressão de pré-consolidação em função do tempo e da aplicação de  
pressões prévias / Willian Santiago Villafuerte Cabrera. - 2020.

58 p. : il.

Orientador(a): Moacir de Souza Dias Junior.

Coorientador(a): Diego Tassinari.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Compactação do solo. 2. Ensaio de compressão uniaxial. 3.  
Curva de compressão do solo. I. Dias Junior, Moacir de Souza. II.  
Tassinari, Diego. III. Título.

**WILLIAN SANTIAGO VILLAFUERTE CABRERA**

**PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO EM FUNÇÃO DO  
TEMPO E DA APLICAÇÃO DE PRESSÕES PRÉVIAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 01 de Junho de 2020.

Dr. Bruno Montoani Silva

Dr. Ivoney Gontijo

UFLA

UFES

Prof. PhD. Moacir de Souza Dias Junior  
Orientador

Dr. Diego Tassinari  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2020**

Em primeiro lugar a Deus, pela vida e me acompanhar em todos os momentos, por alcançar essa importante conquista na minha formação profissional.

Minha mãe Verónica Cabrera, pelo amor, por acreditar em mim e me apoiar sempre. Mãe, obrigado por ser o motor e meu modelo de vida, devo tudo isso a você.

Aos meus irmãos Anderson Villafuerte e Deyaneira Villafuerte por estarem sempre ao meu lado e me darem seu amor e apoio incondicional, pelos quais eu luto todos os dias e continuarei lutando até vê-los alcançar seus objetivos e sonhos.

Meus dois anjos que estão no céu Papi Elías e Mami Luz, por sempre acreditarem em mim e semear os melhores valores e virtudes que qualquer ser humano deseja, essa conquista também é para vocês.

À minha família em geral, porque eles me deram apoio de uma maneira ou de outra durante toda a minha formação acadêmica, obrigado do fundo do meu coração!

DEDICO!

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Ciência do Solo (DCS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelas oportunidades e apoio.

Às agências de fomento que financiaram este trabalho e que financiam o Laboratório de Física do Solo do DCS/UFLA, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e CAPES.

Ao professor Moacir de Souza Dias Junior, pela orientação prestada, pelas oportunidades abertas e pela confiança depositada.

Aos professores Dr. Bruno Montoani Silva, Dr. Ivoney Gontijo, e ao Dr. Diego Tassinari pela participação na banca e pelo esmero e zelo na correção do trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Doroteo, pelo solicitude desinteressada.

Aos funcionários do DCS, em especial à Dirce e Pezão, pelo excelente trabalho.

Aos colegas de equipe, Diego, Zélio e Geovanna, a ajuda na coleta de amostras, as ideias e apoio trocados, o companheirismo e amizade.

A Emmeline pela sua amizade, paciência e por tudo o que eu aprendi com ela durante estes 2 anos do mestrado, de coração muito obrigado.

Aos colegas do DCS, em especial ao meu primeiro grupo de trabalho na física, Diego, Francielle, Daniele e Flávia, pela sua compreensão, apoio e paciência quando eu cheguei no departamento.

A professora de português Dra. Débora Racy Soares, agradeço de forma especial pela sua paciência, carinho e por tudo o que eu aprendi com você, durante estes 2 anos de mestrado; além de ser minha professora é minha amiga e sempre vou ser muito grato a você.

Aos amigos que viraram família em especial a Marileydy, Nicolas, Alejandro, Bruna, Fernandes, Cintia, Rosa, Julia, Rafel, Ruby, e todos meus amigos estrangeiros que me ajudaram nesse caminho.

Ao meu professor da graduação o Dr. Manuel Danilo Carrillo Zenteno quem despertou o interesse em mim para estudar a pós-graduação aqui no Brasil.

A todos que contribuíram para a realização deste sonho, minha GRATIDÃO!

## RESUMO GERAL

A compactação é o principal processo de degradação física do solo. O processo é definido como uma redução no volume do solo parcialmente saturado induzida por causas antropogênicas que reduzem o espaço dos poros pela expulsão do ar. Nos últimos anos, novas técnicas e métodos, tanto de laboratório quanto de campo, têm contribuído para um novo enfoque da avaliação da estrutura dos solos agrícolas. A avaliação ocorre com base na pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), que é determinada a partir da curva de compressão obtida pelo ensaio de compressão uniaxial. O presente trabalho teve como objetivos determinar qual é o tempo adequado de aplicação das pressões durante o ensaio de compressão uniaxial, visando aperfeiçoar o tempo de duração destes (artigo 1) e verificar se a aplicação de pressões prévias iguais e maiores que  $\sigma_p$  induzem mudanças na resistência mecânica do solo (artigo 2). Foram coletadas amostras com estrutura preservada em três solos, um Cambissolo Háplico Tb Distroférico Típico (CXbd), um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico (LVAd) e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférico Típico (PVAd), nos horizontes A e B. As amostras foram equilibradas nos potenciais matriciais de -10, -33, -100 e -1500 kPa. No primeiro artigo, as amostras foram empregadas no ensaio de compressão uniaxial com aplicações de pressões durante uma hora em cada etapa do ensaio. No segundo artigo as amostras receberam pressões prévias de 65%, 90% e 125% da  $\sigma_p$  predita antes dos ensaios de compressão uniaxial. A curva de deformação em função do tempo ajustou-se adequadamente a modelos potência, indicando que existe arbitrariedade na definição da deformação máxima já que o modelo é assintótico. A aplicação de pressões por tempos superiores a quatro minutos não parece razoável para determinação da  $\sigma_p$  em solos parcialmente saturados. A aplicação de pressões prévias a 65 % da  $\sigma_p$  não resultou em aumento da resistência mecânica do solo e a aplicação de pressões prévias equivalentes a 125% da  $\sigma_p$  provocou aumento da resistência mecânica do solo para os potenciais matriciais de -33, -100 e -1500 kPa.

**Palavras-chave:** Compactação do solo. Ensaio de compressão uniaxial. Curva de compressão do solo.

## GENERAL ABSTRACT

Compaction is the main process of physical degradation of the soil. The process is defined as a reduction in the volume of partially saturated soil induced by anthropogenic causes that reduce the pore space by expelling air. In recent years, new techniques and methods, both in the laboratory and in the field, have contributed to a new focus on the evaluation of the structure of agricultural soils. The evaluation takes place based on the pre-consolidation pressure ( $\sigma_p$ ), which is determined from the compression curve obtained by the uniaxial compression test. The present work had as objectives to determine which is the adequate time of application of the pressures during the test of uniaxial compression, aiming to improve the duration of these (article 1) and to verify if the application of previous pressures equal and greater than  $\sigma_p$  induce changes in mechanical resistance of the soil (article 2). Samples with preserved structure were collected in three soils, a Typical Dystrophic Tb Cambisol (CXbd), a Typical Dystrophic Red Yellow Latosol (LVAd) and a Typical Dystrophic Red-Yellow Argisol (PVAd), in horizons A and B. The samples were balanced in the matrix potentials of -10, -33, -100 and -1500 kPa. In the first article, the samples were used in the uniaxial compression test with pressure applications for one hour at each stage of the test. In the second article, the samples received previous pressures of 65%, 90% and 125% of the predicted  $\sigma_p$  before the uniaxial compression tests. The curve of deformation as a function of time adjusted appropriately to power models, indicating that there is arbitrariness in the definition of maximum deformation since the model is asymptotic. The application of pressures for more than four minutes does not seem reasonable to determine  $\sigma_p$  in partially saturated soils. The application of previous pressures at 65 % of the  $\sigma_p$  did not result in an increase in the mechanical resistance of the soil and the application of previous pressures equivalent to 125% of the  $\sigma_p$  caused an increase in the mechanical resistance of the soil for matrix potentials of -33, -100 and -1500 kPa.

**Keywords:** Soil compaction. Uniaxial compression test. Soil compression curve.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
2.1 Compressibilidade.....	11
2.1.1 Pressão de Pré-consolidação.....	12
2.1.2 Ensaio de Compressão Uniaxial e Curva de Compressão .....	13
2.2 Fatores que Influenciam na Compreensibilidade do Solo .....	14
2.2.1 Potencial de Água no Solo .....	14
2.2.2 Densidade do Solo .....	16
2.2.3 Tempo de Carregamento e Descarregamento da pressão de pré-consolidação.....	17
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>20</b>
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....	<b>26</b>
<b>EFEITO DO TEMPO DE COMPRESSÃO NA PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
2.1 Caracterização da área de estudos e amostragem.....	30
2.2 Análise laboratorial e atributos físicos do solo .....	31
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
3.1 Efeito de solo, horizonte e tensão .....	32
3.2 Efeito do tempo na deformação .....	34
3.3 Efeito do tempo na determinação da pressão de pré-consolidação .....	37
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>38</b>
<b>EFEITO DA APLICAÇÃO DE PRESSÕES PRÉVIAS NA PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
2.1 Caracterização da área de estudos e amostragem.....	44
2.2 Análise laboratorial e atributos físicos do solo .....	45
2.3 Efeito da aplicação de pressões prévias na pressão de pré-consolidação .....	46
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
3.1 Variação entre solos e modelos de predição.....	47
3.2 - Efeito do pré-carregamento na densidade do solo .....	49
3.3 Efeito do pré-carregamento na pressão de pré-consolidação.....	52
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>

**PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as áreas agrícolas apresentam características de solo, relevo e clima muito variado, têm favorecido que a mecanização agrícola seja praticada de forma exaustiva, muitas vezes inadequada, não respeitando a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS). E muito menos a umidade ideal de tráfego.

A compactação é o principal processo pela degradação física do solo. O processo é definido como uma redução no volume do solo parcialmente saturado induzido por causas antropogênicas que reduzem o espaço dos poros pela expulsão do ar (HILLEL, 1982). Assim, a pressão aplicada sobre o solo resulta em energia de modificação na massa do solo, promovendo ruptura das pontes de contato das partículas, as quais podem não suportar o estresse causado e sofrer deslizamento e reacomodação (LAMBE; WHITMAN, 1969). Quando isso ocorre em condição de solo não saturado, sua densidade do solo aumenta e o espaço poroso diminui, afetando os fluxos de ar e de água no solo (GUPTA et al., 1989; HORN; LEBERT, 1994; PERTILE, 2015; REICHERT et al., 2010). Além da quantidade e intensidade da pressão externa aplicada, outros fatores são determinantes para esta variação, como a densidade do solo inicial, a distribuição de partículas por tamanho, o teor de matéria orgânica, a quantidade e tipo de raízes, a composição mineralógica, a distribuição e continuidade de poros e o potencial matricial e umidade. Para Goulart (2012), a densidade do solo, o teor de argila e o conteúdo de água são as propriedades que tem influência de forma direta no comportamento compressivo do solo.

Nos últimos anos, novas técnicas e métodos, tanto de laboratório quanto de campo, têm contribuído para um novo enfoque da avaliação da estrutura dos solos agrícolas. Ambos métodos são usados em solos parcialmente saturados, nos quais pressões são aplicadas uniformemente sobre uma amostra indeformada de solo por um determinado período de tempo e são feitas leituras das deformações por meio dos deslocamentos verticais do topo da amostra (REICHERT et al., 2010). A avaliação ocorre com base na pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), a qual é definida como a máxima pressão que o solo foi submetido no passado. Quando se aplicam pressões inferiores à  $\sigma_p$ , o solo sofre deformações elásticas e reversíveis, que não resultam em compactação adicional do solo. Por outro lado, quando o solo sofre pressões superiores à  $\sigma_p$ , ocorrem deformações plásticas e irreversíveis, resultando em compactação adicional do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Quando associada a  $\sigma_p$ , com o conteúdo de água no momento da aplicação da pressão, tem-se a estimativa da CSCS para um determinado conteúdo de água no solo.

A  $\sigma_p$  do solo é determinada a partir da curva de compressão obtida pelo ensaio de compressão uniaxial. A curva de compressão é uma relação entre o índice de vazios, ou densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada.

De acordo com Dias Junior e Pierce (1996) e Kondo e Dias Junior (1999), em solos que já foram submetidos a tensões, a curva é dividida em dois segmentos, sendo o primeiro chamado de compressão secundária e também denominado de recompressão, na qual ocorrem as deformações elásticas e, o segundo é chamado de curva de compressão virgem, em que ocorrem as deformações plásticas. Assim, quanto maior for a deformação da amostra no ensaio de compressão uniaxial, mais suscetível à compactação será o solo e menor será a sua CSCS (SUZUKI et al., 2008).

Além da  $\sigma_p$ , a curva de compressão do solo fornece outros parâmetros importantes para avaliação estrutural do solo, como o índice de compressibilidade (IC), que indica a suscetibilidade do solo à compactação; e o índice de recompressibilidade (IR), que mede a resiliência mecânica do solo (KELLER et al., 2011; KUAN et al., 2007). Esses parâmetros são obtidos de equações matemáticas a exemplo dos modelos de Casagrande (HOLTZ; KOLVACS, 1981) e de Dias Junior e Pierce (1995).

O estudo das curvas de compressão do solo é importante do ponto de vista prático, por auxiliar a tomada de decisões do manejo do solo a ser adotado, a fim de reduzir os impactos causados pelo processo de compactação do solo (ASSIS; LANÇAS, 2005). Assim, nas atividades agroflorestais, a aplicação no solo de pressões maiores do que a pressão de pré-consolidação deve ser evitada para que deformações não recuperáveis ocorram, mantendo, portanto, a condição de sustentabilidade da estrutura do solo (GUPTA et al., 1989; LEBERT; HORN, 1991). A pressão de pré-consolidação vem sendo utilizada por diversos pesquisadores como indicadora da capacidade de suporte de carga do solo e da qualidade estrutural (DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; DIAS JUNIOR et al., 2005; LIMA, 2004; OLIVEIRA, 2002; PENG et al., 2004; SILVA et al., 2006, 2000).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Compressibilidade**

A compressibilidade é a propriedade que certos corpos apresentam pela mudança de forma ou volume quando lhes são aplicadas forças externas.

Esta compressão é atingida de várias maneiras, inclusive por meio do rearranjo das partículas sólidas do solo e da compressão ou expulsão da água ou do ar dos poros.

Define-se a compressibilidade do solo, como sendo a resistência do solo em diminuir seu volume quando submetido à pressão, é menos pronunciada em solos arenosos e menos agregados (HORN; LEBERT, 1994). Assim há alguns fatores dependentes da resistência do solo que são a distribuição do tamanho de partículas, o tipo de argilomineral, o conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, a distribuição de raízes, a densidade do solo, a distribuição do tamanho de poros, a continuidade dos poros no solo e nos agregados simples e o conteúdo e, ou, potencial de água no solo.

O solo se torna mais compressível quanto maior for o conteúdo de argila e menor for o conteúdo de substâncias orgânicas, para uma mesma densidade do solo e para um mesmo potencial de água. Onde há um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressível quanto menor a densidade e maior o potencial de água. Solos arenosos apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade, causando maior deformação (BRAIDA, 2004; LIMA et al., 2004).

### **2.1.1 Pressão de Pré-consolidação**

Dentre as limitações para que o desenvolvimento sustentável seja alcançado na agricultura, uma está relacionada com a compactação do solo, que ocorre na maioria das vezes devido ao manejo inadequado. Diferentes manejos têm alterado as propriedades físicas do solo (AJAYI et al., 2009; DIAS JUNIOR et al., 2007), causando compactação e restringindo a penetração do sistema radicular devido a pressão de turgor ser insuficiente para vencer a resistência mecânica do solo (GYSI, 2001).

Diversos atributos como densidade do solo, porosidade, capacidade de infiltração e resistência à penetração têm sido utilizados para identificar a compactação dos solos. Porém somente esses atributos físicos não permitem medir e avaliar o processo de compressão do solo, o que é feito por meio da compressibilidade (LIMA et al., 2004).

Os primeiros cálculos de pressão de pré-consolidação, baseados em um procedimento de estimativa gráfica, foram descritos por Casagrande (1936). Este autor definiu a pressão de pré-consolidação como a máxima pressão efetiva vertical já aplicada ao solo e a correlacionou com a mudança na inclinação de uma curva de taxa de vazios versus o logaritmo da pressão efetiva vertical obtida de um teste de consolidação unidimensional (LEROUEILL; SAMSON; BOZOUK, 1983). Essa aproximação representa um modelo elástico-plástico (KELLER et al., 2011), com a pressão de pré-consolidação representando o ponto de transição entre a curva de compressão secundária (deformação elástica) e a curva de compressão virgem (deformação

plástica). A compressão secundária é geralmente aceita para refletir o histórico de manejo do solo.

A compactação adicional ao solo pode ser ou não causada pelo aumento da densidade e com a redução do volume do solo. Assim aplicando menores pressões podem-se ter efeitos benéficos, mesmo que no passado o solo passou por uma pressão de aplicação maior. Assim se torna importante conhecer os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e, ou, a umidade do solo no momento das operações agrícolas, evitando, dessa forma, compactação adicional (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Solos formados por partículas de diferentes tamanhos normalmente são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores (TORRES et al., 1993). Em várias literaturas tem sido apresentado relação significativa entre a resistência à penetração e a pressão de pré-consolidação (CANARACHE et al., 2000; DIAS JUNIOR et al., 2004; LIMA et al., 2006; MOSADDEGHI et al., 2003). Assim o aumento da compactação do solo, representado pela sua resistência à penetração, aumenta a pressão de pré-consolidação. A relação significativa da pressão de pré-consolidação e umidade, densidade e resistência do solo à penetração são importantes, pois, a partir dessas propriedades de maior simplicidade de determinação, pode-se estimar a pressão de pré-consolidação.

A pressão de pré-consolidação equivale à capacidade de suporte de carga de solos não saturados, onde o entendimento se torna importante para a análise do comportamento da curva de compressão em diferentes sistemas de manejo, permitindo assim avaliar a susceptibilidade do solo à deformação e, conseqüentemente, à compactação (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999).

### **2.1.2 Ensaio de Compressão Uniaxial e Curva de Compressão**

A compressibilidade do solo pode ser determinada por meio do ensaio de compressão uniaxial, que consiste basicamente em aplicar sucessiva e continuamente pressões crescentes e pré-estabelecidas (por exemplo, 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa) a uma amostra de solo na condição parcialmente saturada (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017).

De acordo com Gill e Vanden Berg (1968), a compactação dos solos agrícolas pode ser assimilada a um fenômeno de compressão, em que dois processos são engajados em função da intensidade de carga aplicada: uma deformação elástica do material que desaparece, caso ocorra a supressão da carga; e, uma deformação plástica durável mesmo após a supressão da carga aplicada. No ensaio de compressão uniaxial estes dois tipos de deformação são representados por duas partes da curva de pressão–deformação: a primeira parte é chamada curva de

compressão secundária, e a segunda parte é chamada curva de compressão virgem, e representa a deformação plástica (LARSON et al., 1980).

A curva de compressão do solo permite estimar parâmetros que auxiliam a análise do processo de compactação dos solos agrícolas. Essa curva relaciona o índice de vazios (ou densidade do solo) com o logaritmo da pressão aplicada no solo e, a partir dela, obtém-se a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), que é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR; PEIRCE, 1996); e, o índice de compressibilidade (IC), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (HOLTZ; KOVACS, 1981; LARSON et al., 1980).

A curva de compressão do solo têm sido determinada, no entanto, com diferentes tempos de aplicação da pressão vertical compressiva, com carregamentos que duram quatro a quinze minutos (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; DIAS JUNIOR, 2003; DIAS JUNIOR et al., 2005, 2004; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999), cinco minutos (BRAIDA et al., 2008; LIMA et al., 2004; SILVA et al., 2000), sete minutos (SILVA; CABEDA, 2006), trinta minutos (ARVIDSSON, 1998; VEIGA et al., 2007) e até duas horas (CANARACHEA et al., 2000). A maioria desses autores argumenta que referidos tempos de aplicação de cada pressão vertical nas amostras foram necessários para o solo atingir cerca de 98% da deformação máxima.

A redução da porosidade do solo decorrente de pressões externas exercidas sobre ele por máquinas agrícolas têm sido simulada por meio do teste de compressão uniaxial, obtendo-se a curva de compressão do solo, a qual representa graficamente a relação entre algum parâmetro ligado à estrutura do solo, como índice de vazios, porosidade ou densidade do solo, em função da pressão vertical aplicada (CAVALIERI et al., 2008; KRUMMELBEIN et al., 2008). Pelo emprego da curva de compressão se determina a  $\sigma_p$ , que indica a capacidade de suporte de carga do solo, correspondendo à pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional (STONE; LARSON, 1980).

A avaliação da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga, sob diferentes condições de umidade e diversos sistemas de manejo, é de grande importância não só para determinar as pressões máximas que o solo pode suportar nessas condições, mas também para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados.

## **2.2 Fatores que Influenciam na Compreensibilidade do Solo**

### **2.2.1 Potencial de Água no Solo**

A água é uma das mais importantes substâncias da crosta terrestre, elemento vital para a existência de todos os seres vivos (REICHARDT, 1985a) sendo o solo o reservatório de água

em potencial para as plantas (VIEIRA, 2006). O solo é composto basicamente de duas partes: uma sólida, que seria a matriz do solo, e a parte não ocupada pelos sólidos, denominado de espaço poroso ou poros do solo. Os espaços porosos são ocupados por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada de água no solo e de uma solução gasosa denominada de ar no solo (LIBARDI, 2010).

Como qualquer corpo na natureza, a água pode ser caracterizada por um estado de energia de diferentes formas e quantidades, e para o estado de energia da água utiliza-se o termo potencial total da água, que é representado pela letra grega  $\Psi$ , e representa a somatória dos trabalhos realizados para levar a água de determinado estado ao estado padrão (REICHARDT, 1985a).

O potencial total da água no solo é a somatória de quatro potenciais: pressão ( $\Psi_P$ ), gravitacional ( $\Psi_g$ ), osmótica ( $\Psi_{os}$ ) e matricial ( $\Psi_m$ ). Então, a equação pode ser descrita para a água do solo da seguinte forma (CAMPBELL, 1988; LIBARDI, 2010; REICHARDT, 1985b):

$$\Psi = \Psi_P + \Psi_g + \Psi_{os} + \Psi_m$$

$\Psi_P$ : ocorre toda vez que a pressão que atua sobre a água do solo é diferente da pressão  $P_0$  que atua sobre a água padrão. Tem importância quando o solo encontra-se saturado e sujeito à carga hidráulica de uma coluna de água.

$\Psi_g$ : potencial gravitacional, ocorre devido à presença do campo gravitacional terrestre, estando sempre presente.

$\Psi_{os}$ : potencial osmótico, ocorre pelo fato da água no solo ser uma solução de sais e outros solutos e a água padrão ser pura.

$\Psi_m$ : denominado de potencial matricial, tensão da água no solo, sucção ou pressão negativa é a somatória de todos os outros trabalhos que envolvem a interação entre a matriz sólida do solo e a água, como a força capilar e de adsorção.

A retenção de água na matriz do solo é conduzida por dois tipos de forças mátricas, que são as forças capilares (ocorre nos poros capilares do solo) e forças de adsorção (ocorre nas superfícies dos sólidos do solo). Devido a essas forças e a presença da matriz do solo originou-se o termo potencial matricial de água no solo (LIBARDI, 2010; VIEIRA, 2006), que surge a partir da atração da água pela matriz do solo e da atração de moléculas de água por outras (CAMPBELL, 1988), este fenômeno é denominado de tensão superficial (LIBARDI, 2010).

A água no solo como toda matéria na natureza tem a tendência espontânea e universal de assumir um estado de energia mínima. A taxa de decréscimo de potencial ao longo de uma direção é uma medida de força responsável pelo movimento. Assim, o conhecimento do seu estado de energia em cada ponto dentro do sistema pode nos permitir o cálculo das forças que

atuam sobre a água e determinar quanto pode se afastar do estado de equilíbrio (REICHARDT, 1985b).

O conteúdo de água também tem grande importância e, em solos não saturados, está associado à sua condição estrutural. A variação no conteúdo de água no solo tem reflexos diretos sobre a sua consistência, ou seja, sobre a manifestação das forças físicas de coesão e adesão, alterando sua resistência.

Embora o processo de compressibilidade do solo seja desencadeado no âmbito dos pontos de contato entre as partículas, seu reflexo se dá sobre o espaço poroso do solo, que pode ser totalmente ou parcialmente preenchido por água. No solo a água pode transmitir dois efeitos deletérios (LAMBE; WHITMAN, 1969). Primeiramente, a presença da água faz com que as forças de atração entre as partículas de argila (especialmente) diminuam, porém não desaparecem totalmente. Quando em contato com as partículas de argila ou coloides orgânicos, a água “penetra” entre as partículas, enfraquecendo a ligação direta entre elas. Entretanto, elas ainda permanecem próximas, podendo transmitir pressões normais e, eventualmente, tangenciais para as adjacentes, processo este conhecido como interação água-solo, que pode levar à deformação da massa de solo.

O segundo efeito se deve ao fato de a água presente nos poros poder transmitir a pressão aplicada e influenciar o comportamento do solo (LAMBE; WHITMAN, 1969). Neste caso, quando um poro contém água e este sofre uma rápida pressão não permitindo a saída da água, a massa de solo não se deforma, mas há uma redução na força de contato entre as partículas, podendo estas se movimentarem e gerar deformação após a saída da água pelo alívio de pressão.

Por outro lado, o aumento da resistência do solo à deformação com o decréscimo no conteúdo de água pode ser explicado pela redução do potencial matricial (mais negativo), tornando o solo mais seco e aumentando a coesão entre partículas minerais, juntamente com o aumento das forças coesivas da água no interior do capilar (HILLEL, 2004). Por estar ligada às partículas de argila, a redução no conteúdo de água e aumento da quantidade de ar nos capilares, gera um aumento na tensão superficial e consequente aumento efetivo da cimentação do material (LAMBE; WHITMAN, 1969), havendo uma relação linear direta entre o potencial de água com a resistência mecânica do solo (OLIVEIRA et al., 2003, 2004) e com a resistência tênsil de agregados (MULLINS; PANAYIOTOPOULOS, 1984; MULLINS et al., 1992).

### **2.2.2 Densidade do Solo**

A densidade do solo ou densidade aparente é definida como o quociente da massa de sólidos e o volume total do solo. A densidade do solo é afetada pelo manejo do solo que altera

a estrutura e, conseqüentemente, a orientação e volume dos poros. Klein e Libardi (2002) ressalta que essas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração.

Para autores como Beltrame e Taylor (1980), as causas naturais nas alterações da densidade do solo, são de fato lentas, e as antrópicas, como a mecanização, são bastante rápidas, no campo a roda do trator leva menos de 1,0 s para passar sobre determinado ponto.

O aumento da densidade do solo provoca redução no volume de poros, que pode comprometer a respiração das raízes, dificultando e/ou diminuindo sua penetração no solo. Além disso, a maior densidade do solo tende a aumentar a resistência do solo à penetração e restringir o desenvolvimento das raízes, podendo comprometer a produtividade agrícola. A relação entre resistência à penetração e densidade do solo é afetada principalmente pela textura e teor de água do solo (DEXTER, 2004; LETEY, 1985; LIMA et al., 2009).

Outros pesquisadores sugerem, porém, que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, que pode ser determinada por um penetrômetro (VOORHEES, 1983).

Em estudos comparativos entre os sistemas de plantio direto e convencional, Albuquerque et al. (1995) não encontraram diferenças em densidade do solo, porosidade total e macro e microporosidade, num Latossolo Vermelho (LV). Anjos et al. (1994) não verificaram diferenças na densidade do solo em quatro solos de Santa Catarina. Nesse aspecto, Silva et al. (2000) ressaltam que a maior quantidade de matéria orgânica e atividade biológica na superfície de solos sob plantio direto pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas, mesmo com densidade do solo igual ou maior do que se cultivados convencionalmente.

A densidade do solo, pode ser alterada de forma relativamente rápida por práticas de manejo do solo inadequadas, as quais geralmente desencadeiam mudanças na estrutura do solo, afetando o arranjo e o volume de poros e, por consequência, influenciando as propriedades físico-hídricas do solo (BELTRAME; TAYLOR, 1980; KLEIN, 2014). Por outro lado, as mudanças na densidade do solo podem ser naturais, como por exemplo, devido a lenta mobilidade de partículas causada pela eluviação de argilas (SILVA et al., 2002) ou ciclos de umedecimento e secagem do solo.

### **2.2.3 Tempo de Carregamento e Descarregamento da pressão de pré-consolidação**

Com a intensificação no uso do solo, especialmente para produção de alimentos, fibras e energia, aumentou-se também a utilização de conjuntos motomecanizados, capazes de realizar

as operações agrícolas dentro das “janelas de semeadura” ideais para cada cultura. Muitas destas operações são realizadas em condições de umidade do solo acima do ideal, causando a compactação do solo, principal processo responsável pela degradação física dos solos cultivados (KELLER et al., 2014; TANG et al., 2009).

Como efeito da degradação física tem-se a alteração da estrutura do solo responsável pela manutenção de processos importantes, como, por exemplo, a movimentação de ar e água e a variação na temperatura do solo, envolvidos, não somente na produção das culturas, mas também na regulação do ambiente (CHAN et al., 2006).

O entendimento do processo de compactação nas áreas agrícolas e, por consequência seu controle, tem dois fatores principais: i) o agente causador, ou seja, as características das máquinas e equipamentos como a carga sobre o eixo, o tipo de pneus e a carga aplicada, a área de contato pneu-solo, a velocidade de operação, a patinagem dos rodados de tração, a distância entre eixos (CHAMEN et al., 2003, KELLER; LAMANDÉ, 2010) e ii) o meio onde a máquina trafega, ou seja, as características e propriedades do solo (KELLER et al., 2013), como o conteúdo de água, o teor de matéria orgânica, a quantidade e proporcionalidade entre os componentes da fração sólida mineral, a mineralogia e o estado de agregação do solo.

Embora ao fator velocidade se tenha dado pouca importância, estudos mais recentes têm mostrado que a compactação do solo é dependente da duração de aplicação da carga (CHAMEN et al., 2003; KELLER et al., 2013; OR; GHEZZEHEI, 2002). O tempo de carregamento está relacionado com a energia aplicada ao sistema, à semelhança do que é realizado no ensaio de Proctor normal, ou seja, aplicação e dissipação de energia (VARGAS, 1977). Assim, o estresse aplicado ao solo pela carga sobre os pneus das máquinas em operação é uma força transiente, de curta duração e que apresenta características distintas de carregamentos estáticos, realizados em laboratórios com consolidômetros.

Assim, da quantidade de energia aplicada, parte pode ser dissipada pela deformação da massa de solo durante um curto espaço de tempo em que a carga é aplicada, sendo essa deformação plástica. Entretanto, parte dessa energia é armazenada na forma de deformação elástica, que é restaurada após a passagem da máquina, permitindo certa recuperação da estrutura do solo.

Este processo de particionamento da energia aplicada em duas formas de deformação (elástica e plástica) foi ilustrado por Horn e Baumgartl (1999). Lebert et al. (1989) e Fazekas e Horn (2005) mostraram, em ensaios estáticos usando consolidômetros, que os valores da pressão de pré-consolidação diminuíram e o índice de compressibilidade aumentou na medida em que houve um aumento no tempo de carregamento. Estes resultados vão ao encontro dos

obtidos por Or e Ghezzehei (2002) que demonstraram haver uma redução da deformação com decréscimo do tempo de aplicação de carga, bem como um aumento nas deformações plásticas com o aumento do tempo de carregamento. Este efeito aparenta ser mais expressivo para solos que apresentam uma textura mais argilosa, podendo os valores de pressão de pré-consolidação ser duas vezes maior, quando comparado a mesma carga nestes solos em longos e curtos intervalos de tempo (HORN et al., 1994).

Juntamente com o tempo de carga, a intensidade de tráfego afeta a estrutura do solo, especialmente porque as maiores deformações que o solo sofre, aumentando seu grau de compactação, ocorrem após os primeiros tráfegos (BOTTA, 2005; HAMZA; ANDERSON, 2005). Entretanto, tais deformações atingem camadas mais profundas (abaixo de 20 cm) dificultando a correção do problema (ARVIDSSON et al., 2011, BOTTA, 2005; MOSADDEGHI et al., 2000), quando há novos tráfegos sobre o solo.

Tal fato pode estar relacionado com dois fatores: o primeiro fator se deve à diminuição no intervalo de tempo entre a aplicação de uma carga e outra, não permitindo a recuperação total de parte da estrutura do solo que não sofreu deformação plástica, conforme processo de particionamento da energia aplicada ilustrado por Horn e Baumgartl (1999). O segundo fator pode estar relacionado com o primeiro, ou seja, com a aproximação das partículas (em função da deformação da estrutura após as primeiras passadas), há um aumento na magnitude de transferência de tensões às camadas mais profundas do solo, deformando-as, conforme foi comprovado por Schäffer et al. (2007).

## REFERÊNCIAS

- AJAYI, A. E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, v. 105, p. 122-127, 2009.
- ALBUQUERQUE, J. A., REINERT, D. J., FIORIN, J. E., et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 115-119, 1995.
- ANJOS, J. T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 139-145, 1994.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil and Tillage Research**, Sweden, v. 49, p. 159-170, 1998.
- ARVIDSSON, J. et al. Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 103-109, 2011.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 507-514, 2005.
- BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, v. 33, p. 59-62, 1980.
- BOTTA, D. et al. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 1, p. 9-14, 2005.
- BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de material orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 477-785, 2008.
- CAMPBELL, G.S. Soil water potential measurement: An overview. **Irrigation Science**, v. 9, n. 1, p. 265-273, 1988.
- CANARACHEA, A.; HORNB, R.; COLIBASC, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, v. 56, p. 185-196, 2000.
- CASAGRANDE, A. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. **Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Cambridge, v. 3, p. 60-64, 1936.
- CAVALIERI, K. M. V. et al. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, v. 98, p. 17-26, 2008.

CHAMEN, W.T.C. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

CHAN, K.Y. et al. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 13-21, 2006.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, v. 2, p. 139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo, In: TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3. p. 152–171.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p.175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Metodologia para determinação do limite de contração modificada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 22, n. 3, 1998.

DIAS JUNIOR, M. S. A soil mechanics approach study soil compaction In: ACHYUTHAN, H. (Ed.). **Soil and Soil Physics in Continental Environment**. Chenna: Allied Publishers Private, p. 179-199, 2003.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 805-810, 2004.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Efeitos do tráfego sobre a pressão de pré-consolidação devido às operações de colheita de eucalipto. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Compactação do solo devido a operações de colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 42, n. 2, p. 257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Compactação do solo. In: SEVERIANO, E. C.; MORAES, M.F.; PAULA, A.M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 1, p. 7-69.

FAZEKAS, O.; HORN, R. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, United Kingdom, v. 168, p. 60-67, 2005.

GILL, W. R.; VANDEN BERG, G. E. Soil dynamics intillage and traction. Washington: Agricultural Research Service. **United States Department of Agriculture**, 1968. 511p.

GOULART, R. Z. **Modelagem da curva de compressão e da pressão de preconsolidação do solo**. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós graduação em Ciência do Solo - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUPTA, S. C.; SHARMA, P. P.; DEFRANCHI, S. A. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 42, p. 311-338, 1989.

GYSI, M. Compaction of a eutric cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 133-142, Sept. 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 121-145, 2005.

HILLEL D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press; 1982.

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

HORN, R.; LEBERT, M. Solo e compressibilidade. **Desenvolvimentos em Engenharia Agrícola**. v. 11, p. 45-69, 1994.

HORN, R., BAUMGARTL, T. **Dynamic properties of soils**. In: HANDBOOK of Soil Science. Boca Raton: CRC Press, 1999.

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

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, Wageningen, v. 163, n. 1-2, p. 13-23, 2011.

KELLER, T. et al. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, p. 61-80, 2013.

KELLER, T. et al. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 106-117, 2014.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-67, 2002.

KLEIN, V. A. Física do solo. 3. ed. Passo Fundo: **EDIUPF**, 2014. 263 p.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999.

KRUMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil and Tillage Research**, v. 99, p. 139-148, 2008.

KUAN, H. L. et al. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. **European Journal of Soil Science** Amsterdam v. 58, n. 3, p. 811-821, 2007.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**. Massachusetts: Institute of Technology, 1969.

LARSON, W.E. et al. Compression of agricultural soil from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 450-7, 1980.

LEBERT, M.; BURGER, M.; HORN, R. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: **MECHANICS and Related Processes in Structured Agricultural Soils**. Dordrecht: Kluwer, 1989. p. 73–80. (NATO ISI Series, E: Applied Sciences 172).

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p.274-286, 1991.

LEROUEILL, S.; SAMSON, L.; BOZOZUK, M. Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at Gloucester. **Canadian Geotechnical Journal**, Birmingham, v. 20, n.3, p. 477-490, ago, 1983.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop reduction. **Adv. Soil Science**, v. 1, p. 27-294, 1985.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VANLIER, Q. de J. Física do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do solo**, 2010. p. 103-152.

LIMA, C. L. R. et al. Compressibilidade de um solo sob os sistemas de pastejo rotacionado irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 945-951, 2004.

LIMA, C. L. R. et al. 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. et al. Resistência a penetração e densidade do solo como indicativos de compactação do solo em área de cultivo da cana de açúcar. In: **XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do solo**, Fortaleza, 2009.

MOSADDEGHI, M. R. et al. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in Central Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 70, p. 53-64, 2003.

MULLINS, C.E.; BLACKWELL, P.S.; TISDALL, J.M. Strength development during drying of a cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. I. Comparison with a structurally stable soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 113- 128, 1992.

MULLINS, C.E.; PANAYIOTOPOULOS, K.P. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and concept of effective stress. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 459-468, 1984.

OLIVEIRA, G.C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 78p. (Tese de Doutorado)

OLIVEIRA, G.C.; et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, G. C.; et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após 20 anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 335-344, 2004.

OR, D.; GHEZZEHEI, T.A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 41-59, 2002.

PENG, S.H.; HORN, R.; ZHANG, B. & ZAHO, Q.G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompactd Ultisols. **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 125-137, 2004.

PÉRTILE, P. **Propriedades mecânicas em micro e macroescala de solos do Rio Grande do Sul**. 2015. 166 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

REICHARDT, K. Parte I: A água. In: REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4º edição revista e ampliada. Campinas: Fundação Cargil, 1985a. p. 10-19.

REICHARDT, K. Parte II: **Os processos. A água** em equilíbrio. In: REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4º edição revista e ampliada. Campinas: Fundação Cargil, 1985b. p. 98-165.

REICHERT, J. M. et al. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. J. (Ed.). Física do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2010. p. 30-102.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery-Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 28-43, 2007.

SILVA, M. L .N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, R. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras 2002.

SILVA, A. R.; et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 30, p. 207-216, 2006.

STONE, J. O.; LARSON, W. E. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, p. 819-822, 1980.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

TANG, A. M. et al. Analisando a forma da curva de compressão uniaxial confinada de vários solos. **Geoderma**, v. 148, n. 3-4 p. 282-290, 2009.

TORRES, E.; ODILON, F. S.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 1993. (Circular Técnica, 12).

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed da Universidade de São Paulo, 1977.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, p. 104-113, 2007.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) –Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 129-133, 1983.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**

## **EFEITO DO TEMPO DE COMPRESSÃO NA PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO**

**Artigo formatado nas normas da Revista Ciência e Agrotecnologia (versão preliminar)**

### **RESUMO**

O ensaio de compressão uniaxial permite caracterizar propriedades mecânicas dos solos por meio da relação pressão-deformação, quanto maior o tempo de aplicação de cargas, mais susceptível o solo é à compactação e menor sua capacidade de suporte de carga. Objetivou-se no presente estudo, determinar o tempo de duração mais adequado dos testes de aplicação das pressões durante o ensaio de compressão uniaxial. As classes de solos estudados foram um Cambissolo Háptico Tb Distroférico Típico (CXbd), um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico (LVAd) e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférico Típico (PVAd). As amostras foram coletadas no campus da Universidade Federal de Lavras – MG. Foi avaliado a densidade de partículas, a textura, e submetidas aos ensaios de compressão uniaxial, para determinação da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Cada pressão foi aplicada por uma hora e comparados entre si por análise de variância posteriormente pelo teste de Tukey a 5% de significância. O efeito do tempo na deformação observou-se que os dados de leitura do extensômetro e altura da amostra, que são as medidas da deformação acumulada ao longo do tempo não se ajustaram a modelos assintóticos, apenas a modelos potência. Esse resultado é indicativo de que a deformação é contínua mesmo em tempos muito longos, ainda que a taxas pequenas. Dessa forma, a determinação do tempo de aplicação da pressão no ensaio de compressão uniaxial será sempre arbitrária. Ressalta-se porém, que o presente estudo empregou tempo máximo de aplicação das pressões de uma hora. Considerando o método da raiz quadrada do tempo, proposto por Taylor (1948) e comumente empregado na definição da duração dos ensaios de compressão uniaxial, verifica-se novamente que não são necessários muitos minutos para que seja atingido o que o autor define como 90% da deformação máxima. O efeito do tempo na determinação da  $\sigma_p$  verificou-se que o tempo de aplicação das pressões não afetou a determinação da  $\sigma_p$ . Isso indica que a adoção de tempos de aplicação de pressões extremamente longos, além de tornarem o ensaio de compressão uniaxial extremamente moroso, não afeta significativamente os valores determinados de  $\sigma_p$ . Não houve diferença significativa entre os valores de  $\sigma_p$  determinados considerando-se diferentes tempos de aplicação das pressões. O método de Taylor (1948), baseado na raiz quadrada do tempo, indicou que até quatro minutos são suficientes para que se atinja 90% da deformação máxima nas amostras parcialmente saturadas testadas. A aplicação de pressões por tempos superiores a quatro minutos não parece razoável para determinação da  $\sigma_p$  em solos parcialmente saturados.

**Palavras-chaves:** Grau de compactação; tensão de água; densidade do solo.

## EFFECT OF COMPRESSION TIME ON PRECONSOLIDATION PRESSURE

### ABSTRACT

The uniaxial compression test allows characterizing the mechanical properties of soils through the pressure-deformation ratio, the longer the load application time, the more susceptible the soil is to compaction and the lower its load-bearing capacity. The present study aimed to determine what is the appropriate time for applying the pressures during the uniaxial compression test, aiming to improve their duration. The soil classes studied were a Typical Dystrophic Tb Cambisol (CXbd), a Typical Dystrophic Red Yellow Latosol (LVAd) and a Typical Dystrophic Red-Yellow Argisol (PVAd). The samples were collected in an area located at the Federal University of Lavras - MG. Particle density, texture, and uniaxial compression tests were evaluated to determine the pre-consolidation pressure ( $\sigma_p$ ). Each pressure was applied for one hour and compared to each other by analysis of variance later by Tukey's test at 5% significance. The effect of the pressure application time on the strain was observed that the reading data of the strain gauge and sample height (measures of the accumulated strain) over time did not adjust to asymptotic models, only to power models. This result is indicative that the deformation is continuous even over very long times, even at small rates. Thus, the determination of the pressure application time in the uniaxial compression test will always be arbitrary. It is noteworthy, however, that the present study employed a maximum pressure application time of one hour. Considering the square root method of time, proposed by Taylor (1948) and commonly used in defining the duration of uniaxial compression tests, it is verified again that it does not take many minutes to reach what the author defines as 90% maximum deformation. The effect of time in the determination of the pre-consolidation pressure was found that the time of application of the pressures did not affect the determination of  $\sigma_p$ . This indicates that the adoption of extremely long pressure application times, in addition to making the uniaxial compression test extremely time consuming, does not significantly affect the determined  $\sigma_p$  values. There was no significant difference between the  $\sigma_p$  values determined considering different pressure application times. Taylor's method (1948), based on the square root of time, indicated that four minutes are sufficient to reach 90% of the maximum deformation in the partially saturated samples tested. The application of pressures for more than four minutes does not seem reasonable to determine  $\sigma_p$  in partially saturated soils.

**Keywords:** Degree of compaction; water tension; soil density.

## 1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da densidade do solo em consequência da redução do seu volume (Gupta; Sharma; Defranchi, 1989), devido a expulsão de ar dos poros do solo em decorrência do manejo inadequado (Dias Junior et al., 2019).

Segundo Suzuki et al. (2008), quanto maior a deformação total da amostra no teste de compressão uniaxial, mais susceptível o solo é à compactação e menor é sua capacidade de suporte de carga (CSC), sendo portanto uma proposta viável e exequível, mesmo que ainda praticada por um grupo restrito de pesquisadores no Brasil (Silva et al., 2003; Dias Junior et al., 2005; Severiano et al., 2008; Araujo-Junior et al., 2011; Iori et al., 2013; Pais et al., 2013).

A aplicação de modelos de CSC para prever as consequências do tráfego sobre a estrutura do solo, baseia-se na utilização da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) (Severiano et al., 2008; Kamimura et al., 2012; Ajayi et al., 2013; Martins et al., 2013). A pressão de pré-consolidação é uma propriedade mecânica do solo indicadora da pressão máxima que pode ser aplicada ao solo de maneira a não compactar o mesmo (Dias Júnior; Pierce, 1996).

Estudos desenvolvidos por Or e Ghezzehei (2002), Chamen et al. (2003) e Keller et al. (2013) têm mostrado que a compactação do solo também é dependente do tempo de aplicação da carga, ou seja, o tempo de carregamento relacionado com a aplicação e dissipação de energia, sendo reproduzida em laboratório com o uso de consolidômetros em ensaios de compressão uniaxial. Tais ensaios permitem caracterizar propriedades mecânicas dos solos por meio da relação pressão-deformação, descrita pelo modelo elastoplástico (formato bi linear), mais utilizado atualmente. Este modelo divide o conjunto de dados em duas partes: uma parte elástica, relacionada a baixas pressões e de caráter recuperável após alívio da tensão aplicada e, uma parte plástica, chamada de curva de compressão virgem, relacionada a altas pressões e de caráter irrecuperável após alívio da tensão aplicada (Dias Junior et al., 2019).

Diferentemente do que ocorre no campo quando uma carga é aplicada ao solo pelos pneus das máquinas em operação, gerando uma pressão transiente e de curta duração, a aplicação de cargas em laboratório realizada com o uso de consolidômetros é uma pressão confinada e de maior duração. Além de distorções que podem ocorrer na modelagem dos dados para obtenção dos parâmetros mecânicos, há uma série de diferenças, tanto na forma e tempo de aplicação de carga, quanto na metodologia para determinação dos parâmetros mecânicos, quando se quer comparar os valores obtidos *in situ* (no campo) com aqueles obtidos em laboratórios.

Estudos realizados por Lebert et al. (1989) e Fazekas e Horn (2005) mostraram diferenças nos valores, tanto da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), bem como no Índice de compressão (IC). Segundo estes autores, houve redução da  $\sigma_p$ , e aumento nos valores de IC com o aumento do tempo de carregamento, em ensaios estáticos usando consolidômetros. Similarmente, Or e Ghezzehei (2002) observaram redução na deformação do solo com tempos menores de aplicação de pressões e aumento nas deformações plásticas mediante o aumento do tempo de aplicação de carga, respectivamente. Embora pouco questionado em ensaios desta natureza, o tempo de carregamento é uma variável importante, especialmente quando se busca comparar valores aferidos in situ com valores obtidos em ensaios laboratoriais.

Objetivou-se no presente estudo, determinar o tempo de duração mais adequado dos testes de aplicação das pressões durante o ensaio de compressão uniaxial.

## 2.1 Caracterização da área de estudos e amostragem

O experimento foi conduzido em área localizada na Universidade Federal de Lavras (UFLA) no município de Lavras, Minas Gerais. O clima da região é classificado segundo Köppen como Cwa (Alvares et al., 2013), com invernos amenos e secos e verões quentes e chuvosos, precipitação média anual em torno de 1500 mm (INMET, 2018). As classes de solos estudados foram um Cambissolo Háptico Tb Distroférico Típico (CXbd), com horizonte A proeminente e vegetação nativa, um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico (LVAd), com horizonte A proeminente e plantios de eucaliptos, e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférico Típico (PVAd), com horizonte A moderado e vegetação nativa, caracterizados na Tabela 1. Esses solos foram escolhidos por representarem classes texturais distintas.

**Tabela 1:** Características granulométricas dos solos.

Solo	Horizonte	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classe Textural
		----- g kg <sup>-1</sup> -----			
CXbd	A	39	18	43	Franco Argilosa
	B	36	20	44	Franco Argilosa
LVAd	A	47	15	38	Argilosa
	B	59	16	25	Argilosa
PVAd	A	46	11	43	Argilosa
	B	51	15	34	Argilosa

Foram coletadas 216 amostras indeformadas com o auxílio do amostrador de Uhland em cilindros de alumínio com 2,5 cm de altura e 6,4 cm de largura. Todas as amostras coletadas com os anéis foram envolvidas em filme plástico.

## 2.2 Análise laboratorial e atributos físicos do solo

Após a coleta, todas as amostras foram enviadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo (DCS/UFLA), onde foram preparadas removendo-se o solo excedente dos cilindros, que foram secos e peneirados para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) (< 2 mm), com a qual foram realizadas as determinações de densidade e textura. A densidade de partículas ( $D_p$ ) foi determinada usando método balão volumétrico (Viana et al., 2017). A textura do solo foi determinada após dispersão com NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e agitação de 16 h (30 rpm) pelo método de pipeta (Donagemma et al., 2017).

Após a preparação, um tecido de nylon foi anexado às amostras, as quais foram saturadas em bandejas plásticas com água destilada. Quando a saturação foi atingida, as amostras foram pesadas e ajustadas para equilibrar em quatro sucções: 10, 33, 100 e 1500 kPa. Foram empregadas três amostras indeformadas em cada combinação de solo, horizonte e potencial matricial, resultando em 72 amostras indeformadas (3 solos x 2 horizontes x 4 sucções x 3 amostras).

Após o equilíbrio, as amostras não perturbadas foram pesadas e submetidas aos ensaios de compressão uniaxial drenados e confinados em consolidômetros eletropneumáticos (modelo S-450, Durham GeoSlope, EUA), de acordo com Dias Junior e Martins (2017). Uma sequência de pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa foi aplicada às amostras sem descompressão entre cada aplicação de pressão. As deformações foram registradas por um extensômetro. Cada pressão foi aplicada por uma hora, com leituras de deformação tomadas nos seguintes intervalos de tempo em minutos: 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55 e 60. Após a compressão, as amostras foram secas em estufa por 48 h a 105-110° C para determinação da massa seca do solo e, em seguida, usadas para calcular a densidade e umidade do solo nas amostras processadas.

A deformação resultante em cada tempo de aplicação de pressão foi modelada a partir de dois modelos não lineares com três parâmetros: um modelo potência (equação 1), e um modelo exponencial (equação 2), que tem a vantagem de ser um modelo assintótico, isto é, permitirá identificar um valor de deformação constante a partir de determinado tempo de duração do ensaio (assíntota horizontal).

$$H = a + bt^c \quad (\text{Equação 1})$$

$$H = a + (c - a)e^{(bx)} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

H = altura da amostra (altura inicial do anel menos a deformação em dado tempo) (cm)

t = tempo de aplicação da pressão (min)

a, b e c = parâmetros de ajuste dos modelos.

A  $\sigma_p$  foi determinada para cada um dos tempos de leitura a partir de 0,5 min de acordo com a metodologia proposta por Dias Junior e Pierce (1995), para cada amostra foram determinados valores de  $\sigma_p$  para os tempos de leitura de 0,5; 1; 2; 4; 8; 15, 30 e 60 min. Dessa forma, cada amostra originou oito valores de  $\sigma_p$ . Os valores de  $\sigma_p$  determinados em cada tempo foram comparados entre si por análise de variância e posteriormente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Efeito de solo, horizonte e tensão

Os valores de densidade do solo e porosidade total apresentaram efeito significativo da interação entre solo e horizonte ( $p = 0,025$ ). Observando os resultados obtidos de Ds, verifica-se que no horizonte A, o PVA apresentou maior valor, diferindo estatisticamente do CX e LVA, apresentando menores valores de Ds (Tabela 2). Quanto à porosidade total, de maneira complementar, observou-se menor valor no horizonte A do PVA quando comparado aos demais solos, que não diferiram entre si. Nos horizontes B, observou-se que o LVA diferiu significativamente dos demais solos, apresentando menor valor de Ds e maior valor de porosidade total. Tal resultado provavelmente decorre da presença de estrutura microgranular presente no horizonte B do LVA em contraste com a estrutura em blocos presente nos horizontes B no PVA e CX.

**Tabela 2:** Valores médios de densidades do solo e porosidade total dos diferentes solos e seus horizontes.

Solo	Ds		Porosidade	
	---- Mg m <sup>-3</sup> ----		---- Mg m <sup>-3</sup> ----	
	A	B	A	B
CX	1,01 Bb	1,32 Aa	0,62 Aa	0,50 Bb
LVA	0,95 Bb	1,14 Ba	0,64 Aa	0,57 Ab
PVA	1,07 Ab	1,26 Aa	0,60 Ba	0,52 Bb

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em cada horizonte e mesma letra minúscula em cada solo, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Valores médios de doze repetições.

A umidade do solo com base em peso (U) foi significativamente ( $p < 0,001$ ) afetada pelo potencial e pela interação entre solo e horizonte ( $p = 0,014$ ), enquanto a umidade com base em volume ( $\theta$ ) foi influenciada pelos fatores solo, horizonte e potencial ( $p = 0,016$ ;  $p < 0,001$  e  $p < 0,001$  respectivamente), mas sem interação significativa.

Quanto ao efeito de tensão de água no solo, tanto para U quanto para  $\theta$  a tensão de -

1500 kPa foi maior que a de -100 kPa e as tensões de -33 kPa e -10 kPa apresentaram menor influência na umidade que tensões maiores aplicadas ao solo. (Tabela 3).

Para U, no horizonte A não houve diferença entre os solos, enquanto houve diferença significativa entre os solos apenas nos horizontes B, com o CX apresentando menor retenção que o PVA e o LVA. Verificando a Tabela 1, pode-se observar que o horizonte B do CX apresenta menor conteúdo de argila e maiores concentrações de silte e areia quando comparados aos demais solos, o que provavelmente contribuiu para tal resultado.

Para  $\theta$ , observou-se maior retenção no PVA em ambos os horizontes, possivelmente devido à sua maior  $D_s$ , enquanto o LVA e CX não diferiram significativamente entre si. Quanto ao efeito de horizonte, foram observados maiores valores de U nos horizontes A do CX e LVA, enquanto no PVA não houve diferença entre os horizontes. Para  $\theta$ , maiores valores foram sempre observados nos horizontes B de todos os solos em estudo devido à maior  $D_s$  nestes.

**Tabela 3:** Valores médios de umidade do solo com base em peso (U), e em umidade com base em volume ( $\theta$ ), em equilíbrio nos potenciais de -10, -33, -100 e -1500kPa, para os diferentes solos e horizontes.

Solo	Horizonte	-10kPa	-33kPa	-100kPa	-1500kPa
		----- (g g <sup>-1</sup> ) -----			
U					
CX	A	0,28 Aa $\alpha$	0,28 Aa $\alpha$	0,27 Aa $\alpha$	0,22 Ba $\alpha$
	B	0,22 Ab $\beta$	0,24 Ab $\beta$	0,23 Ab $\beta$	0,19 Bb $\beta$
LVA	A	0,26 Aa $\alpha$	0,30 Aa $\alpha$	0,28 Aa $\alpha$	0,25 Ba $\alpha$
	B	0,28 Aa $\beta$	0,26 Aa $\beta$	0,25 Aa $\beta$	0,23 Ba $\beta$
PVA	A	0,27 Aa $\alpha$	0,28 Aa $\alpha$	0,27 Aa $\alpha$	0,21 Ba $\alpha$
	B	0,27 Aa $\alpha$	0,27 Aa $\alpha$	0,25 Aa $\alpha$	0,22 Ba $\alpha$
$\theta$					
CX	A	0,28 Ab $\beta$	0,28 Ab $\beta$	0,27 Ab $\beta$	0,23 Bb $\beta$
	B	0,29 Ab $\alpha$	0,31 Ab $\alpha$	0,29 Ab $\alpha$	0,25 Bb $\alpha$
LVA	A	0,24 Ab $\beta$	0,29 Ab $\beta$	0,27 Ab $\beta$	0,24 Bb $\beta$
	B	0,31 Ab $\alpha$	0,28 Ab $\alpha$	0,28 Ab $\alpha$	0,27 Bb $\alpha$
PVA	A	0,28 Aa $\beta$	0,31 Aa $\beta$	0,29 Aa $\beta$	0,23 Ba $\beta$
	B	0,33 Aa $\alpha$	0,34 Aa $\alpha$	0,32 Aa $\alpha$	0,28 Ba $\alpha$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam tensões de água dentro do mesmo solo e horizonte. Letras minúsculas comparam solos no mesmo horizonte e tensão. Letras gregas comparam horizontes no mesmo solo e tensão. Valores médios de três repetições.

Observando os resultados obtidos na tabela 4 das diferentes tensões, verifica-se que não houve diferença estatística significativa para a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) entre as tensões dentro do solo em de -10 e -33 kPa. Para o CX e o PVA, a  $\sigma_p$  nessas tensões também igualou-se à  $\sigma_p$  na tensão de -100 kPa. A  $\sigma_p$  na tensão de -1500 kPa foi em geral significativamente

maior que em todas as demais tensões de água, porém no CX igualou-se à  $\sigma_p$  na tensão de -100 kPa. Quanto aos diferentes tipos de solos, observou-se que não houve diferença significativa nas  $\sigma_p$  para as tensões de -33 e -100 kPa. Nas tensões de -10 e -1500 kPa o LVA apresentou valores de  $\sigma_p$  significativamente menores que os demais solos. Comparando os horizontes dentro das tensões observou-se que não houve diferença significativa nos horizontes A e B nas tensões de -10 e -33 kPa, quanto as tensões de -100 e -1500 kPa houve diferença significativa, com o horizonte A apresentando valores mais baixos de  $\sigma_p$  que o horizonte B (Tabela 4).

**Tabela 4:** Efeito de tensão matricial, solo e horizonte na média da pressão de pré-consolidação (média de todos os tempos).

Solo	Horizonte	-10kPa	-33kPa	-100kPa	-1500ka
		----- (g g <sup>-1</sup> ) -----			
CX	A	157,6 Ba $\alpha$	127,7 Ba $\alpha$	137,5 Ba $\beta$	242,2 Aa $\beta$
CX	B	186,5 Ba $\alpha$	192,2 Ba $\alpha$	222,0 Ba $\alpha$	312,2 Aa $\alpha$
LVA	A	135,4 Bb $\alpha$	151,7 Ba $\alpha$	162,1 Aa $\beta$	181,8 Ab $\beta$
LVA	B	105,5 Bb $\alpha$	125,8 Ba $\alpha$	207,6 Aa $\alpha$	198,3 Ab $\alpha$
PVA	A	142,4 Ba $\alpha$	118,7 Ba $\alpha$	152,3 Ba $\beta$	271,1 Aa $\beta$
PVA	B	183,3 Ba $\alpha$	191,3 Ba $\alpha$	257,9 Ba $\alpha$	316,6 Aa $\alpha$

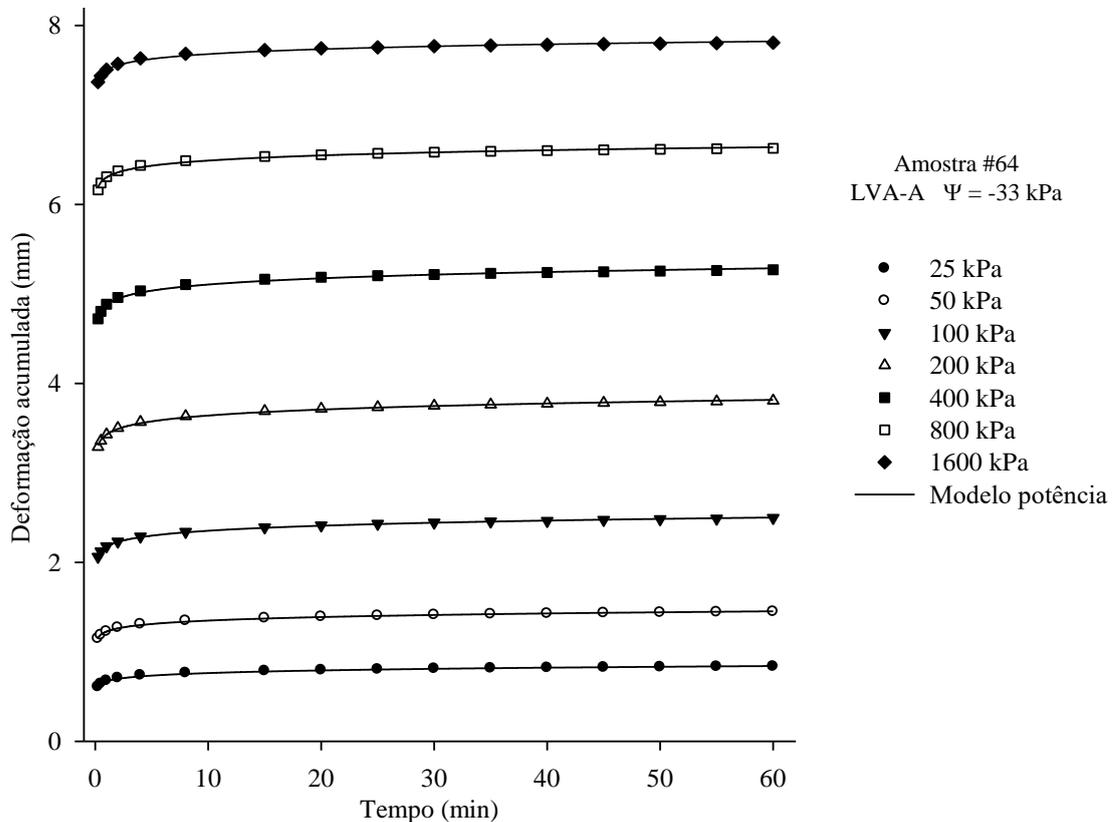
Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam tensões de água dentro do mesmo solo. Letras minúsculas comparam solos dentro da mesma tensão de água e horizonte. Letras gregas comparam horizontes dentro da mesma tensão de água e do mesmo solo. Valores médios de três repetições.

### 3.2 Efeito do tempo na deformação

Os dados de leitura do extensômetro e altura da amostra (Figura 1), medidas da deformação acumulada ao longo do tempo não se ajustaram a modelos assintóticos, apenas a modelos potência. Esse resultado é indicativo de que a deformação é contínua mesmo em tempos muito longos, ainda que a taxas pequenas. Diante dessa realidade, torna-se questionável a definição de um ponto de deformação máxima, já que o modelo empregado, não assintótico, indica apenas que a tendência é de crescimento contínuo, ainda que com taxas muito pequenas quanto mais longo o tempo. Dessa forma, a determinação do tempo de aplicação da pressão no ensaio de compressão uniaxial será sempre arbitrária.

Ressalta-se, porém, que o presente estudo empregou-se tempo máximo de aplicação das pressões de uma hora. Outros estudos empregaram tempos de formação de cinco minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga. Na prática geotécnica com solos saturados, os tempos de aplicação de pressões comumente excedem 12-24 h como define Jucá (1993), outros autores como Bucio (2002) utilizou um período de três a quatro dias e Romero et al. (1997) utilizaram um período de 5 dias, porém nesse tipo de ensaio a deformação é limitada pela condutividade hidráulica do

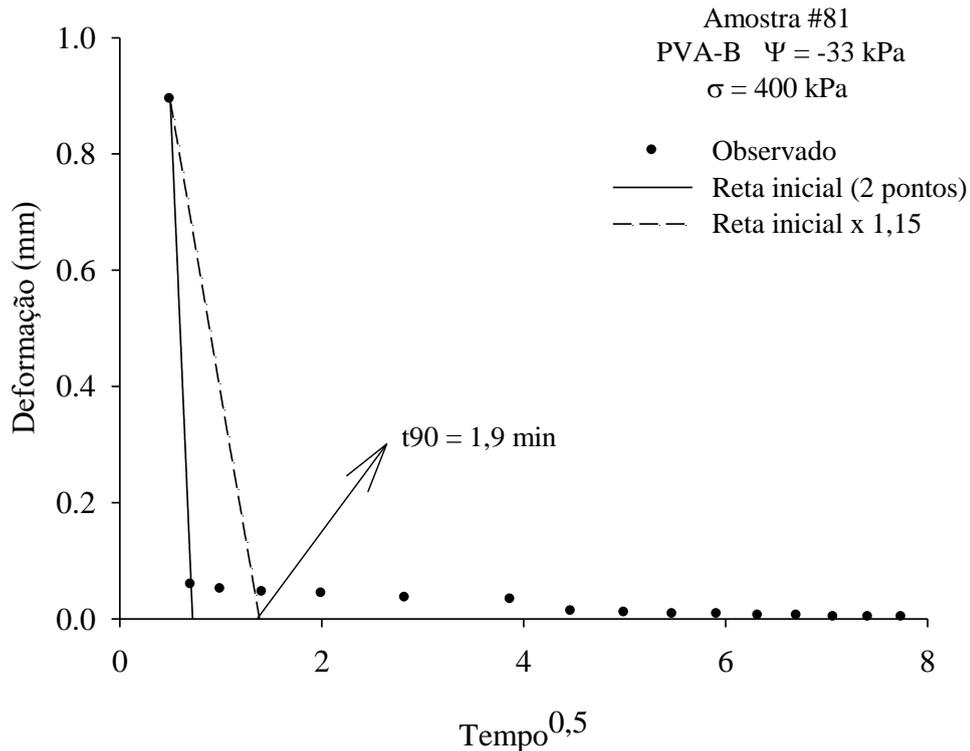
solo saturado ao longo do processo de compressão. Já em solos agrícolas parcialmente saturados, as deformações são mais rápidas pois a expulsão do ar dos poros é um processo muito mais ágil.



**Figura 1:** Exemplo de ajuste do modelo potência (Equação 1) para as diferentes pressões aplicadas no ensaio de compressão uniaxial em função do tempo de aplicação de cada pressão.

Considerando o método da raiz quadrada do tempo, proposto por Taylor (1948) e comumente empregado na definição da duração dos ensaios de compressão uniaxial (Neves Junior, 2008; Almeida, 2008; Seben Junior, 2010), verifica-se novamente que não são necessários muitos minutos para que seja atingido o que o autor define como 90% da deformação máxima (Tabela 5). O método de Taylor (1948) é de natureza gráfica, tendo sido empregado no presente estudo a partir do ajuste de equações lineares aos primeiros pontos da curva de deformação em função do tempo de cada pressão (Figura 1). No método original, traça-se uma reta pelos primeiros pontos da curva de compressão, definindo-se a seguir uma reta que passe por valores de  $x$  1,15 vezes maiores. A partir da interseção dessa segunda reta com a curva traçada pelos pontos observados, define-se a projeção dessa interseção no eixo  $x$  como a raiz do tempo correspondente a 90% ( $t_{90}$ ) de deformação. No presente trabalho, considerou-se como  $t_{90}$  a interseção no eixo  $x$  da reta 1,15 vezes maior que a reta que passa

pelos pontos iniciais, o que superestima o tempo em relação ao método original de Taylor (1948), ou seja, os tempos efetivamente necessários pelo método original seriam consideravelmente menores. O método gráfico original se baseia na definição da porção linear inicial da curva de deformação x tempo, sendo substituído no presente estudo por equações lineares empregando 2, 3 ou 4 pontos iniciais.



**Figura 2:** Determinação do tempo necessário para atingir 90% da deformação máxima a partir do ajuste de equação linear aos primeiros dois pontos da curva de deformação em função do tempo.

O método de Taylor (1948) simplificado, ilustrado na figura 2, indicou baixos tempos de aplicação de pressões para que fosse atingido 90% da deformação máxima (Tabela 5).

**Tabela 5:** Proporção de amostras que atingem 90% da deformação máxima.

Pontos iniciais considerados na regressão	Proporção de amostras que atingiram 90% da deformação máxima pelo método da raiz quadrada do tempo (Taylor, 1948) (%)			
	< 1 min	< 2 min	< 4 min	< 8 min
2 pontos (0,25 e 0,5 min)	97,6	99,4	99,6	99,6
3 pontos (0,25; 0,5 e 1 min)	0,4	95,8	99,0	99,4
4 pontos (0,25; 0,5; 1 e 2 min)	0,2	3,0	93,8	97,2

### 3.3 Efeito do tempo na determinação da pressão de pré-consolidação

O tempo de aplicação das pressões não afetou a determinação da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), conforme pode ser observado na distribuição da soma de quadrados da análise de variância (Tabela 6). Isso indica que a adoção de tempos de aplicação de pressões extremamente longos, além de tornarem o ensaio de compressão uniaxial extremamente moroso, não afeta significativamente os valores determinados de  $\sigma_p$ .

**Tabela 6:** Distribuição da soma de quadrados da análise de variância

Solo	Horizonte	Soma de quadrados do resíduo	Proporção da soma de quadrados (%)			
			Potencial	Tempo	Interação	Resíduo
CX	A	28.315	87,2**	0,2 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>	11,6 <sup>ns</sup>
	B	66.466	80,3**	0,6 <sup>ns</sup>	1,3 <sup>ns</sup>	17,8 <sup>ns</sup>
LVA	A	690.262	4,0**	6,7 <sup>ns</sup>	22,5 <sup>ns</sup>	66,8 <sup>ns</sup>
	B	158.181	57,9**	0,0 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>ns</sup>	41,7 <sup>ns</sup>
PVA	A	71.222	83,4**	0,0 <sup>ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>	15,6 <sup>ns</sup>
	B	115.315	72,4**	0,1 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>ns</sup>	27,1 <sup>ns</sup>

\*\* : Significativo em 5%. ns: não significativo na análise de variância.

## 4 CONCLUSÕES

A curva de deformação em função do tempo ajustou-se adequadamente a modelos potência, indicando que existe arbitrariedade na definição da deformação máxima.

Não houve diferença significativa entre os valores de pressão de pré-consolidação determinados considerando-se diferentes tempos de aplicação das pressões.

O método de Taylor (1948), baseado na raiz quadrada do tempo, indicou que até quatro minutos são suficientes para que se atinja 90% da deformação máxima nas amostras parcialmente saturadas testadas.

A aplicação de pressões por tempos superiores a quatro minutos não parece razoável para determinação da pressão de pré-consolidação em solos parcialmente saturados.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2008. 103p. (Tese de Doutorado).
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711-728, 2013.
- ARAUJO-JÚNIOR, C. F. et al. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 115-31, 2011.
- AJAYI, A. E. et al. Compressive response of some agricultural soils influenced by the mineralogy and moisture. **International Agrophysics**, 27: 239-46, 2013.
- BUCIO, M. B. **Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables**. Barcelona, Universidad Politécnica da Catalunya, 2002. 450p. (Tesis de Doctorado).
- CHAMEN, W. T. C. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, 73: 161-174, 2003.
- DIAS JUNIOR, M. S., MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo, In: TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3. p. 152–171.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, 8(2): 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**, 20: 175-82, 1996.
- DIAS JUNIOR, M. S. et al. Efeitos do tráfego sobre a pressão de pré-consolidação devido às operações de colheita de eucalipto. **Scientia Agrícola**, 62(3): 248-255, 2005.
- DIAS JUNIOR, M.S.; TASSINARI, D.; MARTINS, PAULA CRISTINA CARUANA. Compactação do solo: atualização. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. X, p. 7-69, 2019.
- DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica, In: Teixeira, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3. p. 95–116.
- FAZEKAS, O.; HORN, R. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, 168: 60-67, 2005.
- GUPTA, S. C.; SHARMA, P. P.; DEFRANCHI, S. A. Compaction effects on soil structure.

**Advances in Agronomy**, 42: 311-338, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil**, 1981-2010, Brasília. 2018.

IORI, P. et al. Comparison of field and laboratory models of the load bearing capacity in coffee plantations. **Ciência e Agrotecnologia**, 37: 130-7, 2013.

JUCÁ, J. F. T. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo rodada**. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – Laboratório de Geotécnica – Madrid, 1993. 44p.

KAMIMURA, K. M. et al. Load bearing capacity of a Red-Yellow Latosol in a coffee plantation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36: 1457-65, 2012.

KELLER, T. et al. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, 128: 61-80, 2013.

LEBERT, M.; BURGER, M.; HORN, R. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: **MECHANICS and Related Processes in Structured Agricultural Soils**. Dordrecht: Kluwer, 1989. p. 73–80. (NATO ISI Series, E: Applied Sciences 172).

MARTINS, P. C. C. et al. Levels of induced pressure and compaction as caused by forest harvesting operations. **Cerne**, 19: 83-91, 2013.

NEVES JUNIOR, A. F. **Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2008. 93p. (Tese de Doutorado).

OR, D.; GHEZZEHEI, T.A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. **Soil and Tillage Research**, 64: 41-59, 2002.

PAIS, P. S. M. et al. Load-bearing capacity of a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee plants subjected to different weed managements. **Ciência e Agrotecnologia**, 37: 145-51, 2013.

ROMERO, E. et al. A new suction and temperature controlled triaxial apparatus. Proc. 14th Int. **Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Hamburg, v1, 185-188, 1997.

SEBEN JUNIOR, G. F. **Resistência tênsil de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sequências de culturas em semeadura direta**. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2010. 88p. (Tese de Mestrado).

SEVERIANO, E. C. et al. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32: 1419-27, 2008.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 4: 239-249, 2000.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídras e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 973-983, 2003.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(3): 963-973, 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soils mechanics**. New York: John Wiley & Sons, USA, 1948.

VIANA, J. H. M., TEIXEIRA, W. G., DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas, In: TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3 pp. 76–81.

## EFEITO DA APLICAÇÃO DE PRESSÕES PRÉVIAS NA PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO

Artigo formatado nas normas da Revista Ciência e Agrotecnologia (versão preliminar)

### RESUMO

A compactação ocorre quando a pressão aplicada supera a resistência mecânica do solo causando uma deformação irreversível com uma redução significativa do espaço poroso. Objetivou-se no presente estudo, verificar se a aplicação de pressões prévias iguais e maiores que a pressão de pré-consolidação induzem mudanças na resistência mecânica do solo. As classes de solos estudados foram um Cambissolo Háplico Tb Distroférico Típico (CXbd), um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico (LVAd) e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférico Típico (PVAd). As amostras foram coletadas no campus da Universidade Federal de Lavras – MG. As variáveis avaliadas foram: densidade de partículas, textura, limites de consistência e a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Determinou-se a  $\sigma_p$  para as amostras que foram equilibradas nas tensões ( $\Psi$ ) de -10, -33, -100 e -1.500 kPa. A partir destas foi elaborado um modelo preditivo  $\sigma_p = f(\Psi, \rho_s, \theta)$ . Durante o preparo das demais amostras foi separado o solo excedente para determinar a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e densidade do solo ( $\rho_s$ ), com as quais foram feitas as previsões da  $\sigma_p$  com o modelo descrito anteriormente, determinando-se, assim, as pressões de pré-carregamento (65%, 95% e 125% da  $\sigma_p$  predita). As amostras foram então levadas ao ensaio de compressão uniaxial, em uma sequência de pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Os dados de deformação no pré-carregamento e de  $\sigma_p$  após a aplicação de pressões prévias foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 5% de significância quando for verificado efeito significativo de alguma fonte de variação (solo, horizonte, potencial matricial e pressão de pré-carregamento). A densidade do solo variou significativamente entre as classes de solos e horizontes. Maiores valores foram observados sempre no horizonte B, enquanto os menores valores foram observados no LVA, independente do horizonte. O modelo de previsão empregado foi considerado adequado pela análise gráfica dos resíduos, apresentado normalidade e homocedasticidade na distribuição dos resíduos. O efeito do pré-carregamento na densidade do solo aumentou significativamente com a aplicação de pressões prévias ao ensaio de compressão uniaxial, independente do nível de pressão de pré-carregamento aplicado. Os valores de  $\sigma_p$  observados após o ensaio de compressão uniaxial variaram significativamente com a tensão de água ( $\Psi$ ) da amostra e com a condição de pré-carregamento. A aplicação de pressões próximas à  $\sigma_p$  pode levar ao aumento progressivo da resistência mecânica do solo. A aplicação de pressões prévias equivalentes a 65% da  $\sigma_p$  não resultou em aumento da resistência mecânica do solo para tensões de água de -33, -100 e -1500 kPa. A aplicação de pressões prévias equivalentes a 125% da  $\sigma_p$  provocou aumento da resistência mecânica do solo, resultando em  $\sigma_p$  equivalentes às pressões aplicadas no pré-carregamento para tensões de água de -10 e -33 kPa.

**Palavras-chaves:** Resistência mecânica; limites de consistência; modelo preditivo; pré-carregamento

## EFFECT OF THE APPLICATION OF PRIOR PRESSURES ON PRECONSOLIDATION PRESSURE

### ABSTRACT

Compaction occurs when the applied pressure exceeds the mechanical resistance of the soil causing irreversible deformation with a significant reduction of the porous space. This study aimed to verify if the application of previous pressures equal to and greater than the pre-consolidation pressure induces changes in the mechanical resistance of the soil. The soil classes studied were a Typical Dystrophic Tb Cambisol (CXbd), a Typical Dystrophic Red Yellow Latosol (LVAd) and a Typical Dystrophic Red-Yellow Argisol (PVAd). The samples were collected in an area located at the Federal University of Lavras - MG. The variables evaluated were: particle density, texture and consistency limits.  $\sigma_p$  was determined for samples that were balanced at the stresses ( $\Psi$ ) of -10, -33, -100 and -1,500 kPa. From these, a predictive model  $\sigma_p = f(\Psi, \rho_s, \theta)$  was elaborated. During the preparation of the other samples, the excess soil was separated to determine the volumetric moisture ( $\theta$ ) and soil density ( $\rho_s$ ), with which predictions of  $\sigma_p$  were made with the model previously described, thus determining the pre-loading pressures (65%, 95% and 125% of the predicted  $\sigma_p$ ). The samples were then taken to the uniaxial compression test, in a sequence of pressures of 25, 50, 100, 200, 400, 800 and 1600 kPa, deformation data in the preload and  $\sigma_p$  after the application of previous pressures were subjected to analysis of variance and Tukey test at 5% significance when a significant effect of some source of variation is verified (soil, horizon, matrix potential and preload pressure). Soil density varied significantly between soil classes and horizons. Higher values were always observed in horizon B, while lower values were observed in LVA, regardless of horizon. The prediction model used was considered adequate by the graphic analysis of the residues, presenting normality and homoscedasticity in the distribution of residues. The effect of pre-loading on soil density increased significantly with the application of pressures prior to the uniaxial compression test, regardless of the level of pre-loading pressure applied. The  $\sigma_p$  values observed after the uniaxial compression test varied significantly with the water tension ( $\Psi$ ) of the sample and with the preload condition. The application of pressures close to  $\sigma_p$  can lead to a progressive increase in the mechanical resistance of the soil. The application of previous pressures equivalent to 65% of  $\sigma_p$  did not result in an increase in the mechanical resistance of the soil for water tensions of -33, -100 and -1500 kPa. The application of previous pressures equivalent to 125% of the  $\sigma_p$  caused an increase in the mechanical resistance of the soil, resulting in  $\sigma_p$  equivalent to the pressures applied in the preload for water tensions of -10 and -33 kPa.

**Keywords:** Mechanical strength; consistency limits; predictive model; preload.

## 1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo é o resultado de pressões externas aplicadas principalmente pelo tráfego de máquinas e pelo pisoteio de animais. O aumento do grau de compactação pode afetar a sustentabilidade da produção agrícola (Beutler et al., 2001; Collares et al., 2011; Cortez et al., 2014).

A compactação ocorre quando a pressão aplicada supera a resistência mecânica do solo, causando uma deformação irreversível com uma redução significativa do espaço poroso, quando é superada a resistência mecânica do solo, impede o deslocamento reversível das partículas do solo.

Essa força aplicada em uma determinada área define uma pressão ( $P$ , kPa), que está intimamente ligada a curva de compressão do solo. Nessa, a região de compressão secundária e a reta de compressão virgem (RCV), são separados por uma região visivelmente curva, dentro da qual é representada pela pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) que é estimada por diferentes técnicas gráficas e matemáticas (Casagrande, 1936; Dias; Pierce, 1995; Fritton, 2001; Baumgartl; Köck, 2004; Gregory et al., 2006; Gubiani et al., 2017).

A principal hipótese de Casagrande (1936) ao propor uma técnica gráfica para calcular  $\sigma_p$  é uma região de deformações elásticas, cuja deformações são recuperáveis, e o RCV é uma região de deformações predominantemente plásticas, em que as deformações são irrecuperáveis. A  $\sigma_p$  representa a pressão que separa as regiões de deformações plásticas e elásticas. Essa suposição também é usada para a proposição de várias técnicas matemáticas posteriores a Casagrande (1936), como as de Holtz e Kovacs (1981) e Peth e Horn (2006).

Quando o solo recebe uma carga menor que sua  $\sigma_p$ , o solo sofrerá deformação elástica e reversível, sem aumentar o grau de compactação. Se a carga aplicada for maior que  $\sigma_p$ , ocorrerá a deformação plástica, aumentando o grau de compactação (Dias Junior; Pierce, 1995, 1996; Assouline, 2002; Fritton, 2001; Silva et al., 2002; Iori et al., 2012, Marasca et al., 2012; Ortigara et al., 2014;).

A  $\sigma_p$  é considerada como um registro do histórico de pressões do solo e é um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo sendo, portanto, uma ferramenta capaz de identificar a degradação física nos solos (Iori et al., 2012). Nessa perspectiva, a aplicação de pressões superiores à  $\sigma_p$  levaria à compactação adicional do solo, com prejuízos à sua estrutura, reduzindo a porosidade e a livre circulação de água e ar, bem como aumentando a resistência para penetração das raízes, e afetando diretamente a produtividade.

Quando as pressões aplicadas sobre o solo são maiores do que a capacidade de suporte,

o risco de compactação se torna elevado, sendo a umidade um dos fatores responsáveis por essa diminuição da capacidade de suporte de carga (Alakukku et al., 2003). Cada classe de solo apresenta um comportamento em relação à compactação, principalmente pela sua distribuição do tamanho de partículas e mineralogia.

A compactação adicional do solo causa aumento de sua densidade e redução dos macroporos o que é prejudicial ao desenvolvimento das plantas. Assim se torna importante conhecer os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e, ou, a umidade do solo no momento das operações agrícolas, evitando, dessa forma, compactação adicional (Dias Junior; Pierce, 1996). Para investigar os aspectos importantes desta questão, objetivou-se no presente estudo, verificar se a aplicação de pressões prévias iguais e maiores que a pressão de pré-consolidação induzem mudanças na resistência mecânica do solo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudos e amostragem

O experimento foi conduzido em área localizada na Universidade Federal de Lavras (UFLA) no município de Lavras, Minas Gerais. O clima da região é classificado segundo Köppen como Cwa (Alvares et al., 2013), com invernos amenos e secos e verões quentes e chuvosos, precipitação média anual em torno de 1500 mm (INMET, 2018). As classes de solos estudados foram um Cambissolo Háplico Tb Distroférico Típico (CXbd), com horizonte A proeminente e vegetação nativa, um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico (LVAd), com horizonte A proeminente e plantios de eucaliptos, e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférico Típico (PVAd), com horizonte A moderado e vegetação nativa, caracterizados na Tabela 1. Esses solos foram escolhidos por representarem classes texturais distintas, assim como também de seus limites de consistência, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 1:** Características granulométricas dos solos.

Solo	Horizonte	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classe Textural
		----- g kg <sup>-1</sup> -----			
CXbd	A	39	18	43	Franco Argilosa
	B	36	20	44	Franco Argilosa
LVAd	A	47	15	38	Argilosa
	B	59	16	25	Argilosa
PVAd	A	46	11	43	Argilosa
	B	51	15	34	Argilosa

**Tabela 2:** Limites de Consistência dos solos.

Solo	Horizonte	LC	LP		LL
			g g <sup>-1</sup>		
CXbd	A	0,22	0,41		0,57
	B	0,28	0,36		0,57
LVAd	A	0,18	0,38		0,52
	B	0,26	0,36		0,52
PVAd	A	0,20	0,30		0,55
	B	0,24	0,32		0,56

LC: limite de contração, LP: limite de plasticidade e LL: limite de liquidez

Foram coletadas 216 amostras indeformadas com o auxílio do amostrador de Uhland em cilindros de alumínio com 2,5 cm de altura e 6,4 cm de largura. Todas as amostras coletadas com os anéis foram envolvidas em filme plástico para não perder umidade do solo.

## 2.2 Análise laboratorial e atributos físicos do solo

Após a coleta, todas as amostras foram enviadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo (DCS/UFLA), onde foram preparadas removendo-se o solo excedente dos cilindros, que foi seco e peneirado para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) (< 2 mm), com a qual foram feitas as determinações de densidade de partículas ( $D_p$ ), textura e limites de consistência. A  $D_p$  foi determinada pelo método do balão volumétrico (Viana et al., 2017). A textura do solo foi determinada após dispersão com NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e agitação por 16 h (30 rpm) pelo método da pipeta (Donagemma et al., 2017). A consistência do solo foi avaliada através da determinação dos limites de contração, plasticidade e liquidez com solo peneirado < 0,4 mm, de acordo com o procedimento de McBride (2007).

Após a preparação das amostras indeformadas, um tecido de nylon foi anexado às amostras, as quais foram saturadas em bandejas plásticas com água destilada. Quando a saturação foi atingida, as amostras foram pesadas e equilibradas em quatro sucções: 10, 33, 100 e 1500 kPa. Foram empregadas três amostras indeformadas em cada combinação de solo, horizonte e potencial matricial, resultando em 72 amostras indeformadas (3 solos x 2 horizontes x 4 sucções x 3 amostras).

Após o equilíbrio, as amostras foram pesadas e submetidas aos ensaios de compressão uniaxial drenados e confinados em consolidômetros eletropneumáticos (modelo S-450, Durham GeoSlope, EUA), de acordo com Dias Junior e Martins (2017). Uma sequência de pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa foi aplicada às amostras por 4 minutos por carga sem descompressão entre cada aplicação de pressão. As deformações foram registradas por um extensômetro. Cada pressão foi aplicada por uma hora, com leituras de deformação tomadas nos seguintes intervalos de tempo em minutos: 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45;

50; 55 e 60. Após a compressão, as amostras foram secas em estufa por 48 h a 105-110° C, para determinação da massa seca do solo e, em seguida, usadas para calcular as densidades do solo e as umidades.

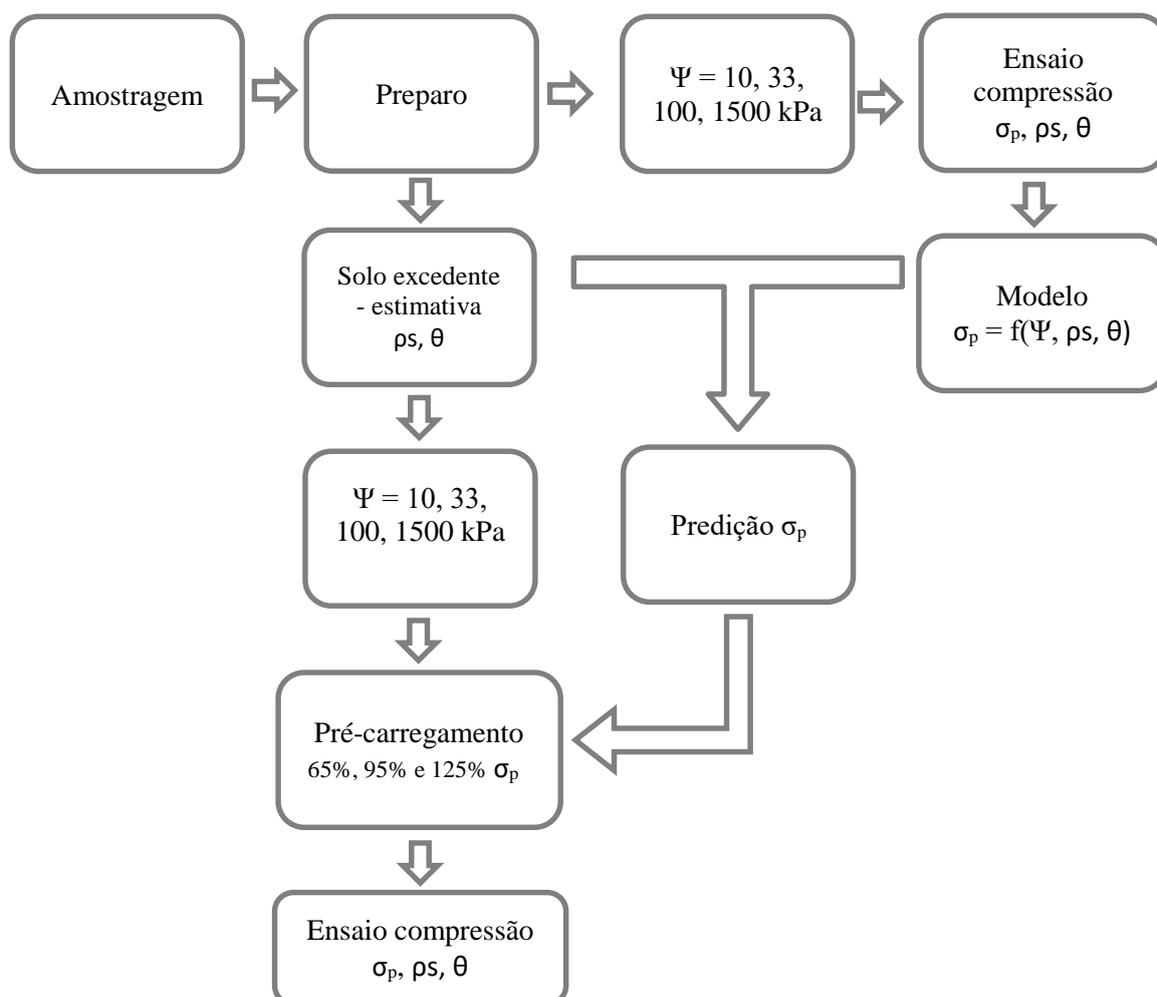
Posteriormente foi determinada a  $\sigma_p$  para as amostras que foram equilibradas nas tensões ( $\Psi$ ) de -10, -33, -100 e -1500 kPa, sendo então elaborado um modelo preditivo linear  $\sigma_p = f(\Psi, \rho_s, \theta)$ . Durante o preparo das demais amostras, foi separado o solo excedente para determinação da umidade e densidade de partículas, com as quais foram feitas previsões de  $\sigma_p$  e foram determinadas as pressões de pré-carregamento (65%, 95% e 125%). A  $\sigma_p$  foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Dias Junior e Pierce (1995).

### **2.3 Efeito da aplicação de pressões prévias na pressão de pré-consolidação**

Para verificar o papel da  $\sigma_p$  como o valor de pressão que separa as deformações elásticas e plásticas, amostras indeformadas sofreram um carregamento prévio e depois foram conduzidas ao ensaio de compressão uniaxial para determinação da pressão de pré-consolidação.

A partir dos valores de  $\sigma_p$  determinados, foram estabelecidos os valores de pressões de pré-carregamento, que foram aplicadas às amostras indeformadas nos próprios consolidômetros. A deformação resultante da aplicação dessas pressões prévias foi determinada após o carregamento e também após a remoção da pressão aplicada, denominada de descarregamento. Foram aplicadas pressões prévias correspondendo a: 65%, 95% e 125% da  $\sigma_p$ . Após a aplicação dessas pressões prévias, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial conforme descrito anteriormente, sendo a pressão de pré-consolidação determinada conforme Dias Junior e Pierce (1995). Cada pressão de pré-carregamento foi aplicada a duas amostras, totalizando 144 amostras nesse experimento (3 solos x 2 horizontes x 4 sucções x 3 pressões de pré-carregamento x 2 amostras)

Os dados de deformação no pré-carregamento e de  $\sigma_p$  após a aplicação de pressões prévias foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 5% de significância quando for verificado efeito significativo de alguma fonte de variação (solo, horizonte, potencial matricial e pressão de pré-carregamento). As pressões aplicadas variaram de 56% a 155% da pressão de pré-consolidação predita pelo modelo desenvolvido, sendo agrupadas em níveis de pré-carregamento de 65% ( $63,3\% \pm 4,6\%$ ), 95% ( $94,6\% \pm 6,9\%$ ) e 125% ( $126,5\% \pm 9,0\%$ ), um fluxograma do experimento é apresentado na figura 1.



**Figura 1:** Fluxograma do desenvolvimento do experimento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Variação entre solos e modelos de predição

A densidade do solo ( $\rho_s$ ) variou significativamente entre solos e horizontes (Tabela 3). Maiores valores foram observados sempre no horizonte B, enquanto os menores valores foram observados no LVA, independente do horizonte.

**Tabela 3:** Valores de densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) observados nos solos e horizontes avaliados ( $n = 144$  amostras).

Horizontes	LVA	PVA	CX
A	0,92 Cb	1,08 Ab	1,03 Bb
B	1,16 Ca	1,30 Ba	1,36 Aa

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Skott-Knott.

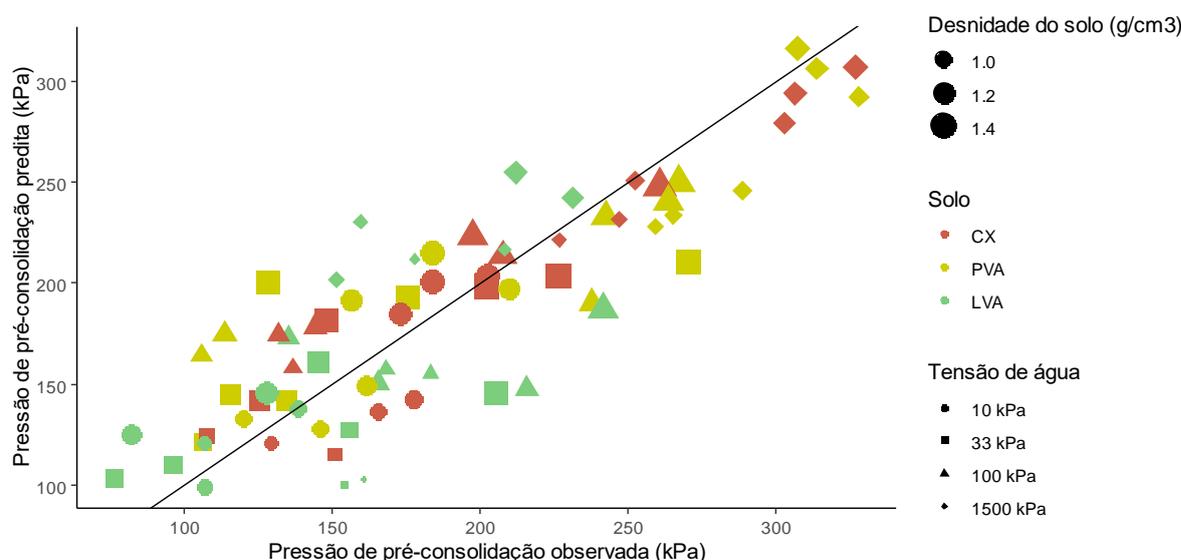
O modelo de predição para pressão de pré-consolidação (Tabela 4) apresentou coeficiente de determinação de 74% e erro padrão da estimativa de 34,5 kPa. A pressão de pré-

consolidação ( $\sigma_p$ ) é uma propriedade do solo que apresenta alta variabilidade (Oliveira et al., 2003; Silva et al. 2010), o que limita a obtenção de modelos de predição mais precisos. O modelo incorporou as variáveis categóricas solo, horizonte e tensão de água (cujos efeitos somados encontram-se expresso pelos diferentes valores de intercepto na Tabela 4) e a variável contínua  $\rho_s$ , cujo valor foi de 165,9, isto é, o aumento da  $\rho_s$  em  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$  em média eleva a  $\sigma_p$  em 165,9 kPa (ou 16,6 kPa para cada aumento de  $0,1 \text{ g cm}^{-3}$  na  $\rho_s$ ). Esse resultado decorre do efeito não significativo da interação entre  $\rho_s$  e as demais variáveis, ou seja, apenas um valor de taxa de variação da  $\sigma_p$  em função da  $\rho_s$  foi suficiente para caracterizar o efeito desta variável naquela.

**Tabela 4:** Modelos para predição da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) a partir da densidade do solo para os diferentes solos e horizontes avaliados.

Tensão de água	LVA	CX	PVA
	Horizonte A		
-10 kPa	$\sigma_p = -32,2 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -33,9 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -39,4 + 165,9 \cdot \rho_s$
-33 kPa	$\sigma_p = -35,9 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -37,5 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -43,0 + 165,9 \cdot \rho_s$
-100 kPa	$\sigma_p = 4,8 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 3,2 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -2,3 + 165,9 \cdot \rho_s$
-1500 kPa	$\sigma_p = 64,8 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 63,2 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 57,7 + 165,9 \cdot \rho_s$
	Horizonte B		
-10 kPa	$\sigma_p = -62,5 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -23,4 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -5,0 + 165,9 \cdot \rho_s$
-33 kPa	$\sigma_p = -66,2 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -27,0 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = -8,6 + 165,9 \cdot \rho_s$
-100 kPa	$\sigma_p = -25,5 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 13,7 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 32,1 + 165,9 \cdot \rho_s$
-1500 kPa	$\sigma_p = 34,5 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 73,7 + 165,9 \cdot \rho_s$	$\sigma_p = 92,1 + 165,9 \cdot \rho_s$

O modelo de predição empregado foi considerado adequado pela análise gráfica dos resíduos, apresentado normalidade e homocedasticidade na distribuição dos resíduos. A figura 2 indica boa distribuição dos valores preditos e observados ao longo da reta 1:1.



**Figura 2:** Valores observados de pressão de pré-consolidação e valores preditos pelos modelos da tabela 4. O tamanho dos símbolos se correlaciona com a densidade do solo, a coloração indica o solo e o formato indica a tensão de água.

### 3.2 - Efeito do pré-carregamento na densidade do solo

A densidade do solo aumentou significativamente com a aplicação de pressões prévias ao ensaio de compressão uniaxial, independente do nível de pressão de pré-carregamento aplicado (Tabela 5). Após a aplicação da pressão de pré-carregamento, a  $\rho_s$  atingiu seu valor mais alto antes do início do ensaio ( $\rho_s$  de carregamento), retrocedendo para valores significativamente menores após cessar a aplicação da pressão de pré-carregamento ( $\rho_s$  de descarregamento), porém ainda significativamente maiores que a  $\rho_s$  inicial. Esses resultados apontam que ocorreu deformação plástica com a aplicação de pressões menores ou iguais à  $\sigma_p$ , porém esse aumento foi maior com a aplicação de pressões de pré-carregamento de 125% da  $\sigma_p$  predita.

**Tabela 5:** Valores de densidade do solo após a aplicação dos diferentes níveis de pressão de pré-carregamento.

Pré-carregamento	Densidade do solo -----g cm-3-----		
	Inicial	Descarregamento	Carregamento
65%	1,15 Ca	1,21 Bb	1,24 Ab
95%	1,14 Ca	1,21 Bb	1,24 Ab
125%	1,14 Ca	1,25 Ba	1,28 Aa

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Skott-Knott.

O aumento da  $\rho_s$  que permaneceu mesmo após cessar a aplicação das pressões de pré-carregamento foi significativamente afetado pela interação entre pressão de pré-carregamento e tensão de água do solo (Tabela 6) pela interação entre solo e horizonte (Tabela 7 e figura 3).

Quanto às tensões de água houve menor aumento da  $\rho_s$  na tensão de -1500kPa, quando comparado com as demais tensões, que não diferem entre si.

**Tabela 6:** Aumento da densidade do solo, %, após a aplicação dos diferentes níveis de pressão de pré-carregamento seguida de descarregamento em função da tensão de água da amostra.

Tensão de água	Nível de pré-carregamento		
	65%	95%	125%
-10 kPa	5,0 Ca	7,1 Ba	11,5 Ab
-33 kPa	6,1 Ba	7,0 Ba	11,2 Ab
-100 kPa	6,7 Ba	6,8 Ba	10,5 Ab
-1500 kPa	5,0 Ba	6,8 Aa	7,3 Aa

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Skott-Knott.

A interação entre solo e horizonte afetou significativamente o aumento da  $\rho_s$ , bem como a proporção entre deformações plásticas e elásticas (Tabela 7). As deformações plásticas representaram em média de 64 a 77% das deformações totais após a aplicação das pressões de

pré-carregamento, enquanto as deformações elásticas representaram cerca de um terço a um quarto das deformações totais.

A maior proporção de deformações elásticas foi observada no horizonte B do PVA e CX, devido a estrutura em blocos, e assim maior resistência à compactação.

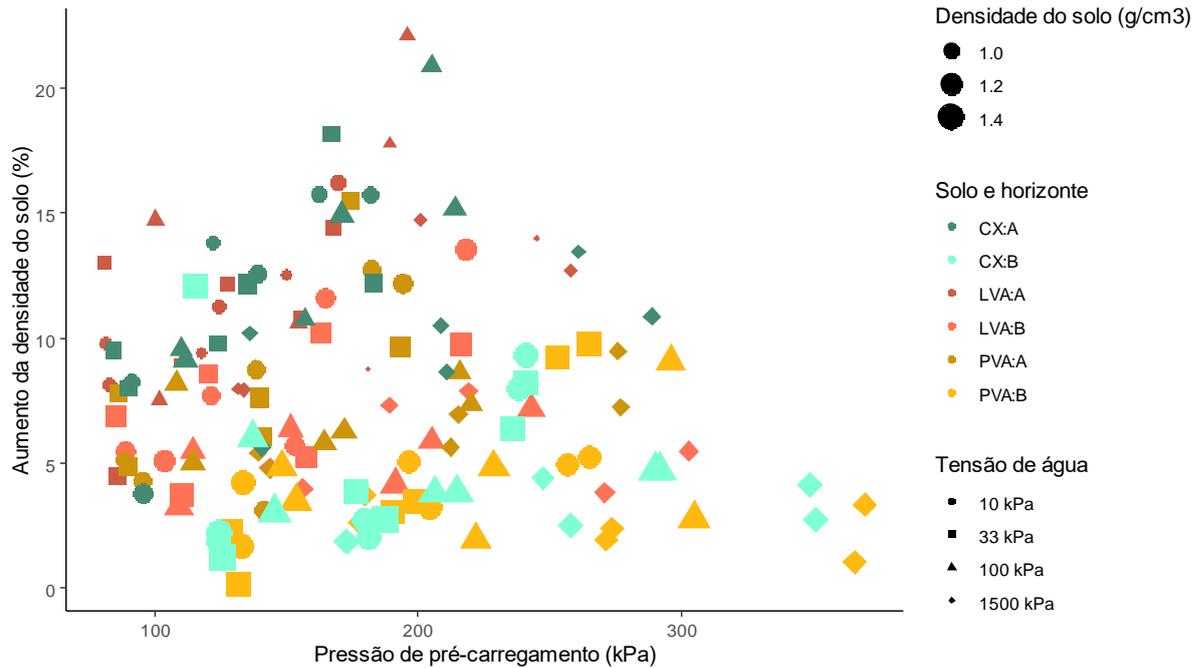
**Tabela 7:** Porcentual de deformações plásticas e elásticas e aumento da densidade do solo, em %, após a aplicação das pressões de pré-carregamento em função do solo e horizonte.

	LVA		PVA		CX	
	A	B	A	B	A	B
Plástica	77,3 Aa	78,3 Aa	73,5 Aa	64,2 Bb	75,3 Aa	64,7 Bb
Elástica	22,7 Aa	21,7 Ba	26,5 Ab	35,3 Aa	24,7 Ab	35,3 Aa
Aumento	11,6 Aa	6,6 Ab	7,4 Ba	3,9 Bb	11,6 Aa	4,3 Bb

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Skott-Knott. Letras maiúsculas comparam solo dentro de horizonte. Letras minúsculas comparam horizontes dentro de cada solo.

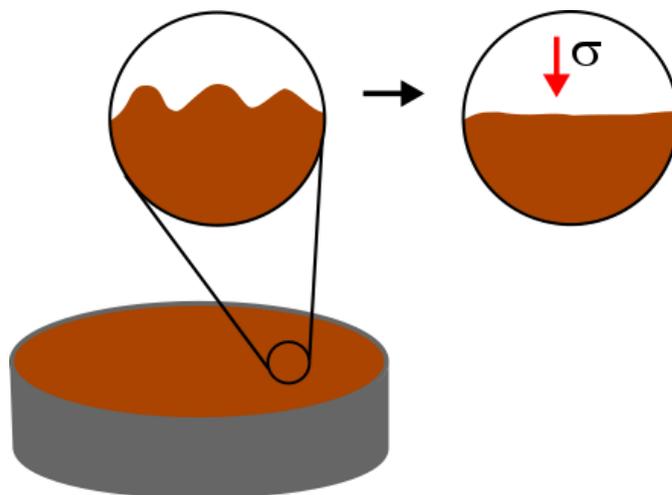
O aumento da  $\rho_s$  foi diretamente proporcional ao comportamento da proporção de deformações plásticas, sendo em geral maior no LVA.

Verifica-se na figura 3 que o aumento da densidade foi visivelmente afetado pelo efeito de solo e horizonte, além da pressão de pré-carregamento. Para o horizonte B do CX e do PVA, os pontos distribuem-se com um aumento bem suave ao longo do eixo x, ou seja, à medida que aumenta a pressão de pré-carregamento. Já para as amostras do horizonte A, a distribuição dos pontos em relação ao aumento da pressão de pré-carregamento indica aumentos bem mais intensos de densidade do solo. Na análise gráfica da figura 3, o efeito de tensão de água e densidade do solo é pouco perceptível. Efeito nas tensões de -33, -100 e -1500 kPa. Entretanto, esses diferem na tensão de -10 kPa.



**Figura 3:** Aumento da densidade do solo em função da pressão de pré-carregamento aplicada. Notar o significativo efeito de solo e horizonte.

O forte efeito de solo e horizonte no aumento da  $\rho_s$  após a aplicação das pressões de pré-carregamento e o aumento da  $\rho_s$  mesmo para pressões menores ou iguais à  $\sigma_p$  possivelmente também seria favorecido pelo ajustamento do solo mais solto na superfície da amostra e ao preenchimento das irregularidades superficiais com material solto durante o preparo (Figura 4). Essa acomodação inicial seria contabilizada como deformação plástica já que decorre da movimentação de material mais solto e provavelmente seria bem mais intensa nas amostras com estrutura granular, já que durante o preparo os grânulos são mais facilmente rompidos entre si do que cortados.



**Figura 4:** Representação esquemática do aumento da densidade do solo por acomodação da superfície da amostra.

### 3.3 Efeito do pré-carregamento na pressão de pré-consolidação

Os valores de pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) observados após o ensaio de compressão uniaxial variaram significativamente com a tensão de água ( $\Psi$ ) da amostra e com a condição de pré-carregamento. Para as amostras que sofreram pré-carregamento com pressões equivalentes a 65% da  $\sigma_p$  predita, houve diferença significativa entre os valores observados e preditos pela densidade do solo ( $\rho_s$ ) inicial de  $\sigma_p$  apenas para  $\Psi = -10$  kPa.

Para essa tensão de água e pressão previa de 65% da  $\sigma_p$  observada igualou-se  $\sigma_p$  predita a partir do valor de  $\rho_s$  observado após a aplicação da pressão de pré-carregamento. Essa observação pode indicar que a aplicação de pressões bastante inferiores à  $\sigma_p$  em amostras excessivamente úmidas, próximo do limite de plasticidade (Tabela 2), pode levar ao aumento da resistência mecânica do solo. Essa preocupação foi expressa em diversos estudos com amostras com umidade elevada (Keller et al., 2011; Peth et al., 2010). Esse mesmo comportamento foi observado nas amostras com  $\Psi = -10$  kPa submetidas ao pré-carregamento com 95% da  $\sigma_p$ , enquanto nas amostras que receberam pressões prévias de 125%, as  $\sigma_p$  observadas após o ensaio de compressão não deferiram das pressões de pré-carregamento aplicadas.

Contudo, para os demais valores de  $\Psi$  na pressão de pré-carregamento de 65%, não houve diferença significativa entre os valores de  $\sigma_p$  observados (determinados após o ensaio completo) e aqueles preditos pelos modelos (a partir dos valores de  $\rho_s$  inicial e  $\rho_s$  após o descarregamento), indicando que não houve aumento na resistência mecânica do solo com aplicação dessa pressão de pré-carregamento. Essa observação corrobora o modelo elastoplástico de compressibilidade do solo, que considera que pressões abaixo da  $\sigma_p$  acarretam deformações elásticas e recuperáveis.

Os valores observados de  $\sigma_p$  das amostras submetidas ao pré-carregamento com 95% da  $\sigma_p$  predita pela  $\rho_s$  inicial foram significativamente maiores que as  $\sigma_p$  preditas com a  $\rho_s$  inicial e também maiores que as pressões aplicadas no pré-carregamento.

Para  $\Psi$  de -10 e -1500 kPa, ou seja, para as amostras mais úmidas e mais secas, as  $\sigma_p$  observadas se igualaram às  $\sigma_p$  preditas pela  $\rho_s$  atingida após a aplicação das pressões de pré-carregamento. Já para  $\Psi$  de -33 e -100 kPa as  $\sigma_p$  observadas foram significativamente maiores que os valores preditos pela  $\rho_s$  atingida após a aplicação das pressões de pré-carregamento. Esse resultado pode ser devido à precisão do modelo de predição, que apresentou erro padrão igual a 34,5 kPa; porém, esse mesmo erro não ocorreu para as amostras de pré-carregamento a 65% com  $\Psi$  igual a -33, -100 e -1500 kPa. Assim, esse resultado poderia ser tomado como uma

recomendação prática, de que a implantação de práticas de prevenção da compactação do solo deveria ter como limite máximo de aplicação de pressões o limite inferior do intervalo de confiança das pressões estimadas (Tabela 8).

**Tabela 8:** Valores de pressão de pré-consolidação (preditos pelas equações da tabela 4 a partir da densidade do solo inicial das amostras e da densidade do solo após o pré-carregamento e observada após o ensaio de compressão uniaxial) e de pressões de pré-carregamento aplicadas para diferentes tensões de água ( $\Psi$ ) e condições de pré-carregamento.

Condição de pré-carregamento	Pressões			
	Preditas pela $\rho_s$ inicial	Preditas pela $\rho_s$ após o descarregamento	Aplicadas no pré-carregamento	Observadas
$\Psi = -10$ kPa				
65%	159,2 Ba	173,7 Aa	103,2 Cc	180,6 Ab
95%	155,2 Ba	175,2 Aa	151,4 Bb	189,1 Ab
125%	155,9 Ca	185,1 Ba	201,9 Aa	209,5 Aa
$\Psi = -33$ kPa				
65%	154,8 Aa	172,0 Aa	101,0 Bc	167,6 Ab
95%	155,0 Ca	174,9 Ba	150,4 Cb	201,0 Aa
125%	153,2 Ca	181,6 Ba	201,2 Aa	210,4 Aa
$\Psi = -100$ kPa				
65%	194,4 Ba	213,0 Aa	121,1 Cc	182,9 Bc
95%	195,0 Ca	214,1 Ba	180,9 Cb	247,9 Ab
125%	192,8 Da	218,9 Ca	239,3 Ba	272,6 Aa
$\Psi = -1500$ kPa				
65%	257,7 Aa	271,6 Aa	152,2 Bc	255,4 Ac
95%	252,2 Ba	269,9 Aa	223,9 Cb	280,9 Ab
125%	254,4 Da	273,0 Ca	301,3 Ba	336,0 Aa

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Skott-Knott. Letras maiúsculas comparam valores de pressão dentro de cada condição de pré-carregamento e tensão de água. Letras minúsculas comparam condições de pré-carregamento dentro de cada uma das pressões e tensões de água.

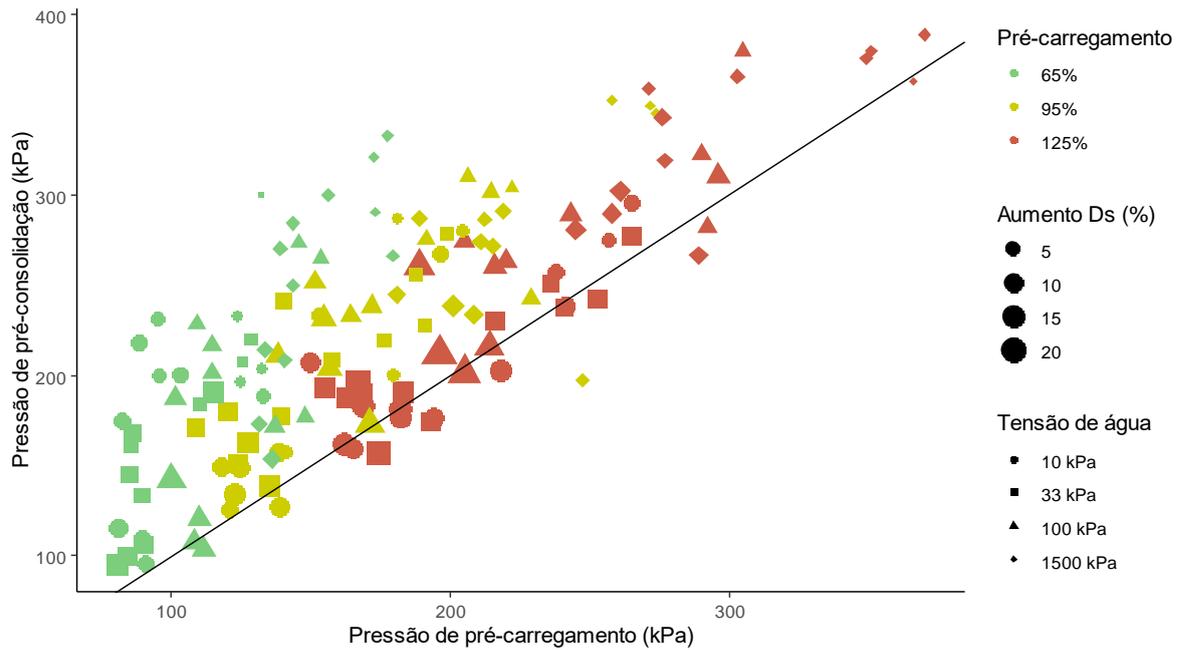
Outra hipótese seria que as pressões de pré-carregamento próximas à pressão de pré-consolidação já foram suficientes para promover aumento da resistência mecânica do solo. Nesse caso, antes de se refutar a  $\sigma_p$  como indicador da capacidade de suporte de carga do solo, deve-se inicialmente inquirir a adequabilidade do método empregado para sua determinação. A maioria dos métodos de determinação da  $\sigma_p$  são testados apenas entre si e em relação a um método padrão, muito raramente sendo testados contra pressões aplicadas previamente (Gregory, 2006). O método empregado nesse trabalho é derivado de tentativas de emular o método clássico de Casagrande (1936) pelo ajuste de equações lineares. Contudo, ainda que pese seu uso disseminado, esse método foi raramente testado da forma como foi feito no presente estudo.

A diferença entre as pressões preditas e observadas era esperada para as amostras que sofreram pré-carregamento de 125%, já que a aplicação de pressões maiores que a  $\sigma_p$  leva ao

aumento da resistência mecânica do solo (Dias Junior et al., 2005; Severiano et al., 2010; Souza et al., 2012; Vischi Filho et al., 2016). Contudo, o modelo da  $\sigma_p$  como um registro da máxima pressão que o solo sofreu no passado só foi confirmado para as condições de solo mais úmido ( $\Psi$  igual a -10 e -33 kPa). Nessa situação, o solo encontrava-se próximo do limite de plasticidade e a aplicação de pressões maiores que a  $\sigma_p$  levou ao aumento da resistência mecânica do solo até não diferir da pressão aplicada. Assim, quando o solo se encontrava mais úmido, a  $\sigma_p$  igualou-se à máxima pressão aplicada no pré-carregamento, corroborando o modelo do histórico de tensão do solo para essa condição de umidade.

Para as amostras equilibradas com  $\Psi$  igual a -100 e -1500 kPa, a aplicação de pressões de pré-carregamento de 125% da  $\sigma_p$  predita pela  $\rho_s$  inicial induziu aumentos significativos da  $\sigma_p$ , tanto em relação aos valores preditos com a  $\rho_s$  inicial e preditos com a  $\rho_s$  atingida após o descarregamento, quanto em relação às pressões aplicadas no pré-carregamento. Essas diferenças também poderiam ser devidas à dificuldade do método de captar acertadamente o valor da  $\sigma_p$ , porém os resultados para as amostras com  $\Psi$  igual a -10 e -33 kPa não corroboram essa hipótese, já que nesse caso tanto a  $\sigma_p$  quanto o modelo do histórico de tensão do solo foram verificados. Assim, deve-se levantar a possibilidade de que o solo sofreu um aumento de resistência acima das pressões aplicadas, indicando que, para condições de umidade abaixo do limite de plasticidade, o modelo da  $\sigma_p$  como registro exato da  $U$  abaixo do LP compreende a região de friabilidade, portanto é a faixa mais adequada de preparo do solo.

Nos níveis de pré-carregamento de 65% e 95%, quanto menores as pressões aplicadas, mais próximas destas foram as pressões observadas (Figura 5). Isso poderia indicar que o modelo de predição subestimou particularmente as menores pressões, porém a análise de resíduos indicou que o modelo gerado é homocedástico (variância constante do erro).



**Figura 5:** Relação entre as pressões aplicadas no pré-carregamento e a pressão de pré-consolidação observada após os ensaios de compressão uniaxial. A cor dos símbolos indica o nível da pressão aplicada no pré-carregamento, o formato indica a tensão de água do solo e o tamanho do símbolo varia conforme o aumento da densidade do solo observado durante o pré-carregamento.

#### 4 CONCLUSÃO

A aplicação de pressões prévias equivalentes a 65% da pressão de pré-consolidação não resultou em aumento da resistência mecânica do solo para tensões de água de 33, 100 e 1500 kPa.

A aplicação de pressões prévias equivalentes a 125% da pressão de pré-consolidação provocou aumento da resistência mecânica do solo, resultando em pressões de pré-consolidação equivalentes às pressões aplicadas no pré-carregamento para tensões de água de 10 e 33 kPa.

A aplicação de pressões próximas da pressão de pré-consolidação pode levar ao aumento progressivo da resistência mecânica do solo, indicando a necessidade de estudos futuros para que a aplicação dessa propriedade mecânica na prevenção da compactação em solos agrícolas seja devidamente corroborada.

## REFERÊNCIAS

- ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, 73:145-160, 2003.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22: 711-728, 2013.
- ASSOULINE, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. **Soil Science Society of America Journal**, 66(6):1784-1787, 2002.
- BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, 68:57-65, 2004.
- BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:167-177, 2001.
- CASAGRANDE, A. Determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University; 1936. p. 60-64.
- COLLARES, G. L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura-pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 41:246-250, 2011.
- CORTEZ, J. W. et al. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1000-1010, 2014.
- DIAS JUNIOR, M. S., MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo, In: TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3. p. 152-171.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A. Simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, 8:139-151, 1995.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, S. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 20:175-182, 1996.
- DIAS JUNIOR, M. S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, 62(3):248-255, 2005.
- DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica, In: Teixeira, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3. p. 95-116.
- FRITTON, D. D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. **Soil Science Society of America Journal**, 65:678-684, 2001.
- GREGORY, A. S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from

soil compression test data. **Soil and Tillage Research**, 89:45–57, 2006.

GUBIANI, P. I. et al. Excel add-in to model the soil compression curve. **Ingeniería Agrícola**, 37:603–610, 2017.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. **PrenticeHall**, Englewood Cliffs.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil**, 1981-2010, Brasília. 2018.

IORI, P. et al. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:1448–1456, 2012.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma** 163:13–23, 2011.

MARASCA, I. et al. Capacidade de suporte de carga e densidade do solo em áreas de plantio direto com e sem escarificação. **Energy in Agriculture**, 27: 81–91, 2012.

MCBRIDE, R. A. Soil consistency: upper and lower plastic limits, In: CARTER, M.R., GREGORICH, E.G. (Eds.), **Soil sampling and methods of analysis**. Crc Press, Boca Raton, 2007. v2. p. 761-770.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38:291-299, 2003.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:619–626, 2014.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structure and homogenized soil under repeated loading. **Journal Soil Science and Plant Nutrition**, 169:401–410, 2006.

PETH, S. et al. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. **Soil and Tillage Research**, 106: 317–328, 2010.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - Quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, 30(3):414-423, 2010.

SILVA, R. B, et al. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 33:376- 389, 2010.

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:1–8, 2002.

SOUZA, G. S. et al. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 47(4):603-612, 2012.

VIANA, J. H. M., TEIXEIRA, W. G., DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas, In: TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. (Eds.), **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, 2017. v3 pp. 76–81.

VISCHI FILHO, O. J. et al. Intervalo hídrico ótimo em área de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de colheita mecanizada. **Irriga**, 1:96-108, 2016.