

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS DA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

JOEZ ANDRÉ DE MORAES RODRIGUES

RECIFE – PE

2023

JOEZ ANDRÉ DE MORAES RODRIGUES

**COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS DA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de *Doutor* em Engenharia Agrícola.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

CO-ORIENTADOR: Dr. Renato Paiva de Lima

RECIFE - PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696c

Rodrigues, Jozé André de Moraes

Comportamento compressivo de solos da Zona da Mata de Pernambuco cultivados com cana-de-açúcar / Jozé André de Moraes Rodrigues. - 2023.
60 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.
Coorientador: Renato Paiva de Lima.
Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2023.

1. Compactação de solos. 2. ensaio edométrico. 3. Tráfego agrícola. I. Rolim, Mario Monteiro, orient. II. Lima, Renato Paiva de, coorient. III. Título

CDD 630

A Deus por proporcionar tudo em minha vida,
A minha família, em especial aos meus amados pais,
Ana Vângela e João Luis (*in memoriam*) por me ensinarem que
por mais difíceis que pareçam ser as dificuldades, serei sempre
capaz de superá-las. E ao meu querido irmão Jânus André, que
sempre manteve o apoio para minhas decisões.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo durante todo o período do Doutorado.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade concedida de cursar o Doutorado.

À Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), na pessoa do Dr. Djalma Simões, à São José Agroindustrial S/A e a Usina Trapiche S/A por permitirem as coletas de solos em suas áreas.

À minha família pelo apoio e por acreditarem sempre em mim, em especial minha mãe Ana Vângela, meu pai João Luis (*in memoriam*), meu irmão Jânus André, minha avó Nadir e aos demais membros desta tão amada família, e a Fernanda Andrade pelo companheirismo, carinho e paciência.

Ao professor Dr. Mário Monteiro Rolim, pela orientação, dedicação, paciência e por ter me dado plena confiança para realização desta pesquisa. Também, ainda, agradeço por ter contribuído de forma ímpar para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu Co-orientador, Dr. Renato Paiva de Lima pelas contribuições para este trabalho e para minha vida profissional e pessoal, além da amizade construída.

A toda equipe de professores, discentes, secretários e demais profissionais que compõem o Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

A todos com quem convivi neste período do Doutorado no Laboratório de Mecânica do Solo e Aproveitamento de Resíduos: Roberta Queiroz, Talita Gouveia, Brenda Albuquerque, Mariane Alexandre, Raíssa Rates, Ana Paula e todos os demais.

A todos os amigos e colegas que estiveram sempre ao meu lado, em especial André Luiz, Ivis Andrei, Elves Obede, Caio Sérgio, Jefferson Rodrigues, José Tiago, Wellington Batista, Josias Genu, Adriano Pereira, Jonas Silva, dando apoio e encorajamento para alcançar meus objetivos.

Ao meu Bom Deus, que sempre me abençoa, permitindo que os meus sonhos sejam realizados e à Virgem Maria, que está sempre a interceder por mim.

À espiritualidade presente em minha vida.

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que tudo isto fosse possível.

A todos vocês, meu muito obrigado!

SUMÁRIO

Lista de Tabelas.....	07
Lista de Figuras.....	08
Comportamento compressivo de solos da Zona da Mata de Pernambuco cultivados com cana-de-açúcar.....	09
Resumo Geral.....	09
Abstract.....	10
Introdução.....	11
Capítulo I.....	13
Revisão bibliográfica.....	14
Solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco.....	14
Tráfego Agrícola e Compactação.....	15
Compressibilidade e Ensaio Edométrico	17
Referências.....	22
CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA DEFORMAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS.....	28
Resumo.....	29
Abstract.....	30
Introdução.....	31
Materiais e Métodos.....	32
Resultados e Discussão.....	34
Conclusões.....	43
Referências.....	44
CAPÍTULO III -INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA TENSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO E NO ÍNDICE DE COMPRESSÃO.....	48
Resumo.....	49
Abstract.....	50
Introdução.....	51
Materiais e Métodos.....	52
Resultados e Discussão.....	54
Conclusões.....	61
Referências.....	61

LISTA DE TABELAS

- CAPÍTULO I - REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1. Tempos de ensaio de adensamento utilizado por diversos autores.....21.

- CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA DEFORMAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS

Tabela 1. Identificação das classes de solos, simbologia, coordenadas e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.....33

Tabela 2. Caracterização física e carbono orgânico dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar, avaliados na profundidade de 0,00-0,20 m.....34

Tabela 3. Tempo necessário para que cada solo atinja 90% da deformação em cada tensão.....35

- CAPÍTULO III - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA TENSÃO DE PRÉ- CONSOLIDAÇÃO E NO ÍNDICE DE COMPRESSÃO

Tabela 1. Identificação das classes de solos, simbologia, manejo e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.....53

Tabela 2. Caracterização física e carbono orgânico dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar, avaliados na profundidade de 0,00-0,20 m.....53

Tabela 3. Tensão de pré-consolidação e do índice de vazios em diferentes tempos de carregamento.....57

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA DEFORMAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS

Figura 1. Tempo necessário para que cada solo atinja 90% da deformação em cada estágio de tensão.....	37
Figura 2. Deformação relativa a teores de Argila + Silte para a tensão de 200 kPa, aplicadas em 2, 4 e 8 minutos.....	39
Figura 3. Deformação por teores de Argila + Silte para as tensões de 400 e 800 kPa, aplicadas em 2 (A) e (B), 4 (C) e (D) e 8 minutos (E) e (F).....	40
Figura 4. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 200 kPa.....	41
Figura 5. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 400 kPa.....	42
Figura 6. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 800 kPa.....	42

CAPÍTULO III - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA TENSÃO DE PRÉ- CONSOLIDAÇÃO E NO ÍNDICE DE COMPRESSÃO

Figura 1. Tensão de pré-consolidação para os tempos de carregamento de 2 e 4 minutos.....	55
Figura 2. Índice de compressão para os tempos de carregamento de 2 e 4 minutos.....	56
Figura 3. Comportamento da tensão de pré-consolidação em função do tempo de carregamento para os solos S ₂₀ (A), S ₂₆ (B), S ₃₅ (C), S ₅₀ (D), S ₆₀ (E) e S ₇₂ (F).....	59

COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS DA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo Geral

A busca crescente por maiores áreas de produção agrícola fez com que o uso da mecanização ganhasse grande destaque no campo, com máquinas e implementos agrícolas cada vez maiores e mais pesadas, o que tem favorecido ao processo de compactação dos solos. A compactação é uma das principais causas da degradação física dos solos agrícolas, sendo definida como as deformações que o solo sofre a partir de uma tensão aplicada em sua superfície, trazendo vários problemas como redução da porosidade e da infiltração de água no solo, dificultando o desenvolvimento radicular da cultura, o que causa limitação na produtividade, além de aumentar o escoamento superficial e o risco de erosão do solo. Uma das formas de conhecer e evitar o processo de compactação dos solos agrícolas a partir da obtenção das propriedades mecânicas é através do ensaio de compressão edométrico. No entanto, não há definição de qual o tempo de carregamento necessário para solos agrícolas, que se atinja 90% da deformação máxima proposta por Taylor (1948). Deste modo, existem na literatura os mais variados intervalos de tempo de carregamento, sendo 2 e 5 minutos os mais usuais. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar como o tempo de aplicação das tensões influencia no comportamento compressivo dos solos e como diferentes texturas do solo comportam-se ao serem submetidos às mesmas condições de tensão do ensaio. Para isso, amostras deformadas e indeformadas de solos com diferentes texturas, cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, foram coletadas e posteriormente analisadas em laboratório. O ensaio edométrico foi realizado com a aplicação das tensões 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, com tempos de aplicação de ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos. Os resultados mostraram que a textura do solo interfere no tempo de carregamento, de forma que quanto maior o teor de Argila + Silte, maior o tempo necessário para atingir 90% da deformação máxima. Além disso, com o aumento do tempo de carregamento, houve redução na tensão de pré-consolidação.

Palavras-chaves: Compactação, tensão de pré-consolidação, índice de vazios, tráfego agrícola.

COMPRESSIVE BEHAVIOR OF SOILS IN THE ZONA DA MATA OF PERNAMBUCO CULTIVATED WITH SUGAR CANE

Abstract

The growing search for larger areas of agricultural production made the use of mechanization gain great prominence in the field, with increasingly larger and heavier agricultural machines and implements, which has favored the process of soil compaction. Compaction is one of the main causes of soil physical degradation, being defined as the deformations that the soil suffers from a tension applied to its surface, bringing several problems such as reduced porosity and water infiltration into the soil, making development difficult of the crop, which limits productivity, in addition to increasing runoff and the risk of soil erosion. The best way to know and avoid the compaction process of agricultural soils is through the uniaxial compression test. However, there is no definition of the loading time required to reach 90% of the maximum deformation proposed by Taylor (1948). Thus, there are the most varied time intervals in the literature, with 2 and 5 minutes being the most common. Thus, the objective of this work was to study how the load application time influences the compressive behavior of soils and how different types of soil behave when subjected to the same load conditions and test time. For this, deformed and undisturbed samples of soils with different textures, cultivated with sugar cane in the Zona da Mata of the State of Pernambuco, were collected and later analyzed in the laboratory. The edometric test was carried out with the application of loads 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa, with application times of $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 and 1440 minutes. The results showed that soil texture interferes with loading time, so that the higher the clay and silt content, the longer the time required to reach 90% of the maximum deformation. Furthermore, the loading time influences the pre-consolidation stress and in some cases the compression ratio.

Keywords: Compaction, pre-consolidation stress, void ratio, agricultural traffic.

INTRODUÇÃO

Com a grande demanda pela produção de cana-de-açúcar, o uso de máquinas agrícolas tornou-se cada vez mais necessário para otimizar a produção e suprir a falta de mão de obra. No entanto, o uso inadequado de máquinas agrícolas trouxe como consequência a compactação do solo, problema que prejudica de forma drástica a agricultura moderna, já que com a compactação surgem vários outros problemas, como: redução da porosidade e da infiltração de água no solo, dificultando o desenvolvimento da cultura, o que causa limitação na produtividade, além de aumentar o escoamento superficial e o risco de erosão do solo.

A compressibilidade do solo pode ser descrita pela redução do volume de poros em função das tensões aplicadas em sua superfície. Essas tensões associadas à capacidade compressiva do solo, a umidade ou potencial hídrico, a estrutura do solo e o manejo do cultivo, provocam deformações que podem ser reversíveis ou não.

As tensões aplicadas pelo maquinário agrícola podem ocasionar dois tipos de deformação do solo: a elástica, também conhecida como reversível, e a plástica, que é irreversível. A tensão que representa o maior valor a que o solo foi submetido no passado é chamada de tensão de pré-consolidação ou pré-compressão. Esses tipos de deformações têm sido estudados por vários pesquisadores, que utilizam a técnica de compressão uniaxial estática, onde é possível medir o comportamento compressivo do solo a partir de tensões efetivas verticais.

A fim de reduzir os impactos causados pelo processo de compressão dos solos agrícolas, o estudo das curvas de compressão tem ganhado destaque por auxiliar na tomada de decisões do manejo do solo que menos favoreça à compactação. Por meio da tensão de pré-consolidação e do índice de compressão, tem-se estudado a compressibilidade dos solos, evitando que deformações não recuperáveis aconteçam.

No entanto, a determinação da tensão de pré-consolidação e do índice de compressão através de ensaio de compressão uniaxial tem utilizado diversos tempos de aplicação das tensões, que vão desde alguns segundos até 24 horas, deixando uma grande interrogação quanto o ensaio de compressão para solos agrícolas. A falta de normatização, tem feito com que muitos estudiosos repliquem os tempos de ensaios já realizados, o que pode ser algo prejudicial, tendo em vista que mudanças físicas, mecânicas e orgânicas dos solos, alteram a compressibilidade do mesmo (ARVIDSSON, 1998).

Além disso, o tempo de aplicação deve ser adequado ao que acontece ao campo, caso contrário os valores da tensão de pré-consolidação e do índice de vazios não estarão condizentes com a realidade.

Neste sentido, testou-se as hipóteses de que as características físico-mecânicas das distintas classes de solos exercem influência no comportamento compressivo e que os diferentes tipos de solos atingem a deformação máxima em diferentes tempos de carregamento.

Diante deste contexto, objetivou-se com este trabalho estudar como o tempo de aplicação das tensões influencia no comportamento compressivo dos solos e como diferentes texturas de solo comportam-se ao serem submetidos às mesmas condições de tensão e tempo de ensaio. Para isso, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solos cultivados com cana-de-açúcar presentes nas Zonas da Mata Norte e Sul do estado de Pernambuco.

- CAPÍTULO I -
REVISÃO DE LITERATURA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Solos Cultivados com Cana-de-açúcar em Pernambuco

Presente tanto ao Norte quanto ao Sul da região da Zona da Mata de Pernambuco, a cana-de-açúcar ocupa diversos ambientes, muitas vezes sem considerar as potencialidades e limitações dos solos, bem como das características ambientais (ACCIOLY et al., 2012). No entanto, os solos cultivados com a cana-de-açúcar estão concentrados em duas unidades geomorfológicas, Tabuleiros Costeiros na Mata Norte e Superfície retrabalhada “mar de morro” na Mata Sul (SOUZA, 2015).

Sendo compostos por solos de textura argilosa, argilo-arenosa ou arenosa, os Tabuleiros Costeiros apresentam frágil arranjo estrutural e passividade de formação de blocos (MARCELO et al., 2016; CORRÊA et al., 2015). Os solos dos Tabuleiros Costeiros destacam-se por apresentarem características que os limitam, como a baixa reserva de nutrientes e a possibilidade de apresentarem sub-superfícies endurecidas, o que reduz a profundidade efetiva do solo e dificulta o desenvolvimento radicular, sendo chamados de solos “coesos” (CARVALHO et al., 2013; TAVARES et al., 2012; CORRÊA et al., 2008).

O domínio dos “Mares de Morros”, encontra-se localizado ao sul da região da Zona da Mata e é bastante utilizado para o cultivo da cana-de-açúcar. Os solos dessa área possuem uma variedade de componentes litológicos e devido a forma de morros, a drenagem não costuma apresentar problemas, o que possibilita uma vantagem para a agricultura (JATOBÁ, 2014). No entanto, as declividades encontradas dificultam a mecanização, contribuindo para um alto custo de produção.

Na Zona da Mata, predominam: Espodosolos, Argissolos, Latossolos, Gleissolos, entre outros. Sendo assim, conhecer as características físico-mecânicas desses solos é imprescindível para a implantação de qualquer cultura agrícola, inclusive a da cana-de-açúcar, amplamente difundida nesta região.

Predominando entre os Tabuleiros, os Espodosolos não possuem bons potenciais agrícolas. Apresentam acúmulo de matéria orgânica e alumínio em horizonte sub-superficial, podendo ou não conter acúmulo de ferro. De maneira geral, possuem textura arenosa ou franco-arenosa, o que confere baixa capacidade de retenção de água e nutrientes para as plantas (SANTOS et al., 2018; ARAÚJO FILHO et al., 2000; CARVALHO et al., 2013).

Nas encostas, que são as vertentes íngremes, os Argissolos Amarelos apresentam-se com média profundidade e drenagem regular. Este tipo de solo é identificado pela maior quantidade de argila nos horizontes sub-superficiais quando comparados com os superficiais, conferindo ao longo do perfil um gradiente textural. Em regra, os minerais predominantes são argilas de atividade baixa (caulinita) e/ou óxidos (SANTOS et al., 2018; ARAÚJO FILHO et al., 2000).

Outro solo comumente encontrado é o Latossolo Amarelo. Presente nos topos dos relevos (chãs), são solos altamente intemperizados, bem drenados e sem incremento de argila em profundidade. Sua textura varia de média a muito argilosa, predominando os minerais caulinita e óxidos de ferro e alumínio (SANTOS et al. 2018; ARAÚJO FILHO et al., 2000).

Os Gleissolos são facilmente encontrados nas várzeas. Caracterizados como orgânicos, possuem predominância de material argiloso ou muito argiloso que passou por processos de oxidação e redução em ambientes saturados por água, mal ou muito mal drenados. Esses solos possuem uma variedade em relação a sua composição físico-química devido a origem do material depositado nas várzeas (SANTOS et al., 2018; ARAÚJO FILHO et al., 2000).

Tráfego Agrícola e Compactação

Os diferentes tipos de uso da terra e a intensidade com que eles acontecem têm provocado alterações do solo. Uma das práticas que provoca a deformação do solo é o tráfego de máquinas de forma intensa, o que pode resultar na compactação do solo (KRÜMMELBEIN et al., 2008).

Com a agricultura moderna, as máquinas agrícolas estão cada dia maiores e também mais pesadas, fazendo com que a compactação possa alcançar grandes patamares (STETTLER et al., 2014). Sendo assim, entender como acontece a compactação através do tráfego agrícola é essencial para minimizar esse efeito, em razão de que não se pode abrir mão da mecanização agrícola nos ciclos produtivos das grandes culturas.

No ciclo de produção da cana-de-açúcar, por exemplo, tem-se um período de 12 a 14 meses, o qual se divide em: preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita. Apesar de cada fase do ciclo ter suas características, há algo bastante comum entre elas: o intenso uso de máquinas agrícolas.

Na fase de plantio, a qual não ocorre anualmente, o solo é anteriormente preparado com tratores e implementos como: subsolador, escarificador, grade niveladora e/ou aradora, sulcador, etc. Durante a fase de tratamentos culturais, pulverizadores e tratores com reboques transportando fertilizantes ou qualquer outro material necessário ganham os talhões plantados para que recebam os cuidados necessários. Por fim, na última fase, que é a colheita tem-se a presença de colhedoras, tratores, reboques, caminhões e carregadoras para que haja o corte, carregamento e transporte da matéria-prima até a indústria (OLIVEIRA et al., 2011).

No entanto, o uso contínuo de máquinas agrícolas durante todas as fases do ciclo produtivo da cana-de-açúcar contribui com o processo de compactação do solo, principalmente quando o uso do maquinário acontece em condições de umidades do solo desfavoráveis (SILVA et al., 2018).

Alguns pesquisadores afirmam que a compactação do solo é capaz de dá-se desde a primeira passagem do maquinário. No entanto, o problema pode ser agravado com as sucessivas passagens das máquinas ao longo dos ciclos produtivos, caso as tensões de pré-consolidação sejam ultrapassadas (KELLER et al., 2014; MORAES et al., 2013).

Keller et al. (2007) afirmam que a compactação provocada pelo maquinário agrícola é proveniente da tensão aplicada ao solo pelas máquinas, onde a interface pneu-solo é a responsável por transmitir as tensões. Consequentemente, quando há uma tensão aplicada pelos pneus e esta é maior do que a resistência do solo, ocorre a compactação (LIMA et al., 2018).

Em um estudo para avaliar a compactação do solo provocada pelo tráfego de veículos agrícolas com o uso de modelagem computacional, Lozano et al. (2013) encontraram diversas tensões aplicadas sobre o solo pelos diferentes tipos de veículo e de rodado, sendo elas: 870 kPa para o rodado duplo do reboque canavieiros; 717 kPa para o rodado simples do eixo dianteiro do caminhão; 571 kPa para o rodado duplo do eixo traseiro do caminhão; 205 kPa para o pneu simples dianteiro do trator e 152 kPa para o pneu simples traseiro do trator.

No processo de compactação do solo através do maquinário agrícolas, diversos fatores dos veículos devem ser observados, como: distribuição do peso dos veículos sobre os eixos e rodados; tipo de pneus e sua pressão interna; intensidade e operações do tráfego agrícola, a velocidade de deslocamento e tipos de rodados (FEITOSA et al., 2015).

Taghavifar; Mardani (2013) e Smith; Dickson (1990) avaliaram o efeito de diferentes velocidades do tráfego agrícola na compactação do solo para uma mesma tensão, concluindo que as baixas velocidades de deslocamento aumentam o tempo de contato entre o pneu e solo, o que proporciona um maior tempo de aplicação das tensões verticais sobre o solo, aumentando a probabilidade de ocorrer a compactação.

Dessa forma, fica claro que o uso inadequado dos veículos agrícolas tem causado a compactação de solos com as mais variadas culturas, entre elas a cana-de-açúcar. Dentre as principais características de um solo compactado, observa-se: o aumento da densidade e da resistência à penetração, o que colabora para a redução da porosidade total, do armazenamento de água e do crescimento das raízes (MORAES et al., 2016; McPHEE et al., 2015).

Diversos problemas na esfera agrícola e também ambiental são provenientes da compactação dos solos, resultando prejuízos econômicos em todo o mundo (KELLER et al., 2011). De fato, a partir da compactação verifica-se uma redução da condutividade hidráulica e da aeração, provocando reduções no crescimento e na produtividade das culturas. Além desses, também se destaca a erosão e as inundações, que são potencializadas com a diminuição da infiltração de água pelo solo compactado.

Sendo assim, é preciso conhecer em quais condições a compactação dos solos agrícolas acontece e o que fazer para evitar, ou ao menos, minimizar esse problema. Por isso, pesquisadores estudam várias formas de evitar a constante trafegabilidade nas áreas plantadas (GASSO et al., 2013). Esta prática consiste em o maquinário trafegar sempre pelos mesmos lugares, criando assim ruas ou corredores exclusivamente para a passagem do tráfego, evitando assim a compactação de todo o lote agrícola (McHUGH et al., 2009).

Compressibilidade e Ensaio Edométrico

A compressibilidade é um atributo não apenas do solo, mas de qualquer material que ao ser submetido a tensões sofre deformações. No entanto, devido a sua estrutura peculiar multifásica, composta das fases sólida (grãos), líquida (água) e gasosa (ar), o solo descreve um comportamento próprio de tensão-deformação, o qual é dependente do carregamento em sua superfície e também do seu tipo.

Em solos arenosos, ou seja, não-coesivos, a sua alta permeabilidade facilita o processo de drenagem, resultando em uma compressibilidade de forma rápida. Por outro lado, em solos argilosos, coesivos, a baixa permeabilidade dificulta a saída da água,

necessitando de um maior tempo para que ocorra as variações volumétricas. Ao longo do tempo, essas variações de volume compõem o processo chamado de adensamento, em solos finos saturados.

A compressibilidade do solo pode ser descrita pela redução do volume de poros em função das tensões aplicadas em sua superfície, como por exemplo, o uso de máquinas agrícolas. Essas tensões quando correlacionadas com a capacidade compressiva do solo, a umidade ou potencial hídrico, a estrutura do solo e o manejo do cultivo provocam deformações, podendo estas serem reversíveis ou permanentes (SILVA & CABEDA, 2006; MACEDO et al., 2010; KELLER et al., 2011).

Ao ser solicitado por uma tensão, o solo tende a reduzir o seu volume em consequência da saída de ar e líquido dos espaços porosos. Este comportamento do solo foi motivo de investigação por Terzaghi (1925) e Terzaghi & Frolich (1936), vindo a apresentarem a teoria do adensamento, uma das mais utilizadas em todo o mundo.

Terzaghi & Frolich (1936) descrevem o adensamento como um processo gradativo, onde o solo apresenta uma redução do seu volume à medida que ocorre uma lenta expulsão da água dos espaços vazios em direção ao exterior. Essa sistemática resulta no aumento progressivo da tensão efetiva no esqueleto sólido, ocasionando uma compressão do solo. Terzaghi & Frolich (1936) ainda trouxeram algumas hipóteses simplificadoras para que se deduzisse a teoria, são elas:

- a) Solo homogêneo;
- b) Solo saturado;
- c) Compressibilidade dos grãos sólidos e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do solo;
- d) As deformações do solo são consideradas infinitesimais em relação a espessura da camada compressível, de forma que esta é considerada constante.
- e) A compressão é unidimensional;
- f) O fluxo de água é unidirecional;
- g) Fluxo governado pela lei de Darcy;
- h) Alguns parâmetros físicos, que na realidade variam durante o processo são admitidos constantes, como o coeficiente de permeabilidade (k_v) e o coeficiente de compressibilidade (α_v);
- i) Há uma única relação linear, independente do tempo, entre o índice de vazios e a tensão vertical efetiva, durante o processo de adensamento;
- j) Domínio dos pequenos deslocamentos e pequenas deformações.

Para reproduzir a teoria do adensamento unidimensional, Terzaghi & Frolich (1936) propuseram o ensaio de adensamento edométrico ou de adensamento unidimensional com carregamento incremental, também conhecido por SIC (Standard Incremental Consolidation). Este ensaio é capaz de prever a velocidade de dissipação da poropressão, que é a pressão da água que ocupa os espaços vazios do solo, a partir de informações adquiridas ao longo do experimento, mas também é capaz de identificar o quanto um solo deforma-se e com que velocidade isto ocorre (BERISSO et al., 2013). Esses ensaios são amplamente utilizados por pesquisadores, pois, são elementares e de maior acessibilidade quando comparado com ensaios mais complexos (LIMA et al., 2019).

Através dos ensaios de adensamento uniaxiais, ou edométricos, é possível medir o comportamento compressivo do solo sob condições de carregamentos, os quais revelam o quanto o solo é susceptível à compactação (KONDO & DIAS JÚNIOR, 1999; GREGORY et al., 2006). Desta maneira, estes ensaios são fundamentais para conhecer o estresse causado no solo pelo tráfego agrícola, por exemplo, haja vista que as deformações resultantes das passagens dos veículos agrícolas podem causar deformações irreversíveis no solo (KELLER et al., 2014).

Com o ensaio edométrico, vários parâmetros podem ser obtidos, sendo o coeficiente de adensamento um dos mais utilizados quando deseja-se estudar o comportamento compressivo dos solos. Este coeficiente faz uma relação entre o tempo necessário para que se atinja uma determinada porcentagem de adensamento do solo e a tensão a qual este solo foi submetido.

Além disso, esses ensaios revelam ainda o índice de compressão do solo que trata da suscetibilidade do solo ao processo de compactação (KELLER et al., 2011; SOUSA et al., 2019). Esses parâmetros são importantes para o uso do tráfego agrícola, tendo em vista que as operações com máquinas e caminhões pesados podem extrapolar a capacidade de suporte do solo e ocasionarem a compactação.

É possível perceber que o ensaio de adensamento uniaxial ou edométrico é extremamente utilizado em estudos de solos, porém, como apresentado nas hipóteses simplificadoras da teoria do adensamento, uma das condições é que o solo esteja saturado, o que representa uma condição crítica muitas vezes encontrada na engenharia geotécnica. No entanto, para solos agrícolas esta condição de saturação e carregamento do solo dificilmente acontece, tendo em vista que as operações com o maquinário

agrícola, principal fonte de carregamento, não são realizadas com o solo em excesso de umidade (MACEDO et al., 2010; KOCH et al., 2008)

Sendo assim, o termo ensaio de adensamento torna-se inadequado quando pretende-se realizar pesquisas com solos agrícolas, pois já não há adensamento em solos não saturados. Por isso, o termo mais adequado passa a ser ensaio de compressão uniaxial, o que pode ser constatado nos estudos de diversos pesquisadores, como: Gubiani et al. (2018), Zhai & Horn (2018), Krümmelbein et al. (2008), Gupta et al. (2002), entre outros.

Estudos mostram que o tempo de carregamento influencia diretamente nas propriedades mecânicas do solo (Keller & Arvidsson, 2007). Fazekas & Horn (2005) e Lebert et al. (1989) comprovaram que o aumento do tempo que a tensão permanece sobre o solo, diminui a tensão de pré-consolidação, enquanto o índice de compressão aumenta.

No Brasil, a Norma Brasileira (NBR) 16853 (ABNT, 2020) estabelece parâmetros para o ensaio de adensamento uniaxial. Entre eles, está o tempo em que as tensões devem ser mantidas sobre o solo. De acordo com a norma, as tensões devem ficar sobre a amostra de solo o tempo suficiente para que este atinja pelo menos 90% do adensamento máximo. Desta forma, após a colocação da tensão sobre o solo, as leituras devem ser feitas nos intervalos de 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 15, 30 min; 1, 2, 4, 8 e 24h, podendo até mesmo ir além das 24h se o solo não atingir a porcentagem recomendada de adensamento no período. Nos Estados Unidos, a Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) regula o ensaio através da norma D2435 de 2004, onde ditam dois métodos. O primeiro estabelece que a duração de cada incremento de tensão seja de 24 horas, ou de seus múltiplos. O segundo método define que cada incremento de tensão permaneça sobre o solo até que este atinja 100% da consolidação primária. Porém, essas normas foram definidas para ensaios da construção civil, ficando os solos agrícolas sem uma norma padronizadora referente ao ensaio de compressão uniaxial.

Em estudos geotécnicos é comum os carregamentos durarem um dia ou mais. No entanto, para solos agrícolas esses tempos não representam a realidade, já que os carregamentos nesta condição são provenientes do tráfego das máquinas agrícolas, as quais exercem uma pressão uniaxial em determinada área por um tempo muito curto, ainda que somado os tempos de várias passagens desses equipamentos (MACEDO et al., 2010).

Para os estudos em solos agrícolas, uma grande variedade de duração de tempo é constatada entre os pesquisadores, podendo ir de 2 a 45 minutos (por exemplo, CAVALCANTI et al., 2019; IMHOFF et al., 2004). Outros autores, como Keller et al. (2004), utilizaram tempos de carregamento menores que 1 minutos na tentativa de aproximar o tempo de compressão que as rodas das máquinas agrícolas exercem sobre o solo. A Tabela 1, traz os principais tempos encontrados em trabalhos de ensaio de compressão em solos agrícolas.

Tabela 1. Tempos de ensaio de adensamento utilizado por diversos autores.

Autor	Tempo de Carregamento
Carpenedo (1994)	2 min
Cavalcanti et al. (2019)	2 min
Macedo et al. (2010)	2 min
Silva et al. (2018)	2 min
Larson et al. (1989)	5 min
Machado (2001)	5 min
Mazurana et al. (2017)	5 min
Gubiani et al. (2018)	10 min
Krummelbein et al. (2008)	10 min
Peth & Horn (2006)	10 min
Keller et al. (2011)	30 min
Zhai & Horn (2018)	4 h
Gupta et al. (2002)	24 h

Analisando a Tabela 1, nota-se que há mais de 30 anos, Larson et al. (1989) estabeleceu em seu experimento o tempo de 5 minutos, o qual foi seguido por diversos outros estudiosos até mesmo para ensaios mais recentes. O fato é que existe uma lacuna na ciência agrária a respeito do ensaio de compressão. Essa falta de padronização quanto ao tempo de carregamento para solos agrícolas, tem feito com que muitos pesquisadores repliquem o que outros já utilizaram, mesmo que em tipos de solos diferentes. No entanto, adotar o mesmo tempo de carregamento para diferentes tipos de solo pode não representa a realidade, uma vez que fatores como: mineralogia, teor de matéria orgânica, conteúdo volumétrico de água, estabilidade de agregados, granulometria, entre outros, afetam a capacidade de suporte dos solos, conferindo tempos distintos para que o adensamento aconteça em cada tipo de solo (ARVIDSSON, 1998).

A alteração de um único parâmetro físico ou mecânico pode mudar a capacidade de suporte de tensões de um solo, por exemplo, o teor de água, o qual em baixas quantidades, aumenta a capacidade de suporte, tornando os solos mais resistentes ao

processo de compactação. Entretanto, quando a umidade aumenta, o solo ficará mais susceptível à compactação (MACEDO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011; VASCONCELOS et al., 2012). Portanto, o uso de tempos iguais para solos em condições diferentes pode trazer resultados não condizentes com a realidade.

Outra medida adotada pelos pesquisadores é realizar ensaios prévios para determinar o tempo necessário, para que se alcance 90% ou mais de consolidação. Todavia, esse percentual dificilmente irá acontecer em condições agrícolas, já que o tempo de carregamento corresponde à duração em que as rodas das máquinas ficam sobre uma determinada área, ou seja, é um tempo bastante curto, insuficiente para atingir todo esse percentual (MACEDO et al. 2010).

Keller & Arvidsson (2007) afirmam que os diferentes padrões de tempos utilizados por laboratórios de estudos uniaxiais de solos têm prejudicado as comparações das propriedades mecânicas, causando um obstáculo para os estudos.

Como visto, mesmo com diversas pesquisas sobre a compressibilidade de solos agrícolas, existe uma grande lacuna referente ao tempo de aplicação das tensões em ensaios edométricos que representem a realidade no campo, sendo preciso que haja uma padronização desses tempos, onde seja possível relacionar os atributos físicos e mecânicos com o tempo de carregamento.

REFERÊNCIAS

- Accioly, L. D. O.; Silva, A. B.; Lopes, H.; Silva, E. A.; Silva, J. A.; Alves, E. D. S.; Irmão, R. A.; Cavalcanti Júnior, E. A. Análise do relevo e suas relações com o uso, a cobertura e a aptidão agrícola para cana-de-açúcar na Zona da Mata Sul de Pernambuco. Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2012.
- Araújo Filho, J. C.; Burgos, N.; Lopes, O. F.; Silva, F. H. B. B.; Medeiros, L. A. R.; Melo Filho, H. F. R.; Parahyba, R. B. V.; Cavalcanti, A. C.; Oliveira Neto, M. B.; Rodrigues, E. Silva, F. B.; Leite, A. P.; Santos, J. C. P.; Sousa Neto, N. C.; Silva, A. B.; Luz, L. R. Q. P.; Lima, P. C.; Reis, R. M. G.; Barros, A. H. C. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco, Embrapa Solos, 2000.

- 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 & Tillage Research*, v.49, p.159-170, 1998.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16853: Solo: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 13p, 2020.
- Berisso, F. E.; Schjønning, P.; Lamandé, M.; Weisskopf, P.; Stettler, M.; Keller, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. *Soil & Tillage Research*, v.131, p.36–46, 2013.
- Carpenedo, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre: UFRGS, 1994. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- Carvalho, V. S. D.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S. D.; Brilhante, S. A. Caracterização de Espodosolos dos Estados da Paraíba e Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1454-1463, 2013.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; de Lima, R. P.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R.; Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.189, p.140–147, 2019.
- Corrêa, M. M.; Ker, J. C.; Araújo Filho, J. C.; Camêlo, D. D. L. Formas de ferro, silício e, ou, alumínio na gênese de fragipãs e horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.940-949, 2015.
- Corrêa, M. M.; Ker, J. C.; Barrón, V.; Torrent, J.; Curi, N.; Torres, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.297-313, 2008.
- Fazekas, O.; Horn, R. Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.168, p.60-67, 2005.
- Feitosa, J. R.; Fernandes, H. C.; Teixeira, M. M.; Cecon, P. R. Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. *Engenharia Agrícola*, v.35, p.117-127, 2015.

- Gasso, V.; Sorensen, C.A.G.; Oudshoorn, F.W.; Green, O. Agricultura de tráfego controlado: uma revisão dos impactos ambientais. *European Journal of Agronomy*, v.48, p.66-73, 2013.
- Gregory, A. S.; Whalley, W. R.; Watts, C. W.; Bird, N, R, A.; Hallett, P. D.; Whitmore, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil & Tillage Research*, v. 89, p. 45-57, 2006.
- Gubiani, P. I.; Pértile, P.; Reichert, J. M. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. *Soil & Tillage Research*, v.180, p.29–37, 2018.
- Gupta, S. C.; Bradford, J. M.; Drescher, A. Soil compressibility. In: Dane, J. H. & Topp, G. C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p.399-415, 2002.
- Imhoff, S.; Silva, A.P. Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p.17-24, 2004.
- Jatobá, L.; Silva, A. F.; Gomes, A. L. L. A abordagem interdisciplinar do tema o domínio morfoclimático dos “Mares de Morros” em Pernambuco. *Revista Equador*, v.3, p.02-18, 2014.
- Keller, T.; Arvidsson, J. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. v.58, p.1373–1381, 2007.
- Keller, T.; Lamandé, M.; Schjonning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v.163, p.13-23, 2011.
- Keller, T.; Berli, M.; Ruiz, S.; Lamandé, M.; Arvidsson, J.; Schjønning, P.; Selvadurai, A. P. S. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil & Tillage Research*, v.140, p.106–117, 2014.
- Keller, T.; Defosse, P.; Weisskopf, P.; Arvidsson, J.; Richard, G. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, v.93, p.391-411, 2007.
- Koch, H. J.; Heuer, H.; Tomanova, O.; Marlander, B. Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v.101, p.69-77, 2008.

- Kondo, M. K.; Dias Júnior, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 497-506, 1999.
- Krümmlbein, J.; Peth, S.; Horn, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil & Tillage Research*, v.99, p.139–148, 2008.
- Lima, R. P.; da Silva, A. P.; Giarola, N. F. B.; da Silva, A. R.; Rolim, M. M.; Keller, T. Impact of initial bulk density and matric suction on compressive properties of two Oxisols under no-till. *Soil & Tillage Research*, v.175, p.168–177, 2018.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p.61–68, 2013.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de pré-compactação e no índice de compressão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.856-862, 2010.
- Machado, A. L. T. Previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul. Tese, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.
- Marcelo, V. F.; Almeida, B. G.; Araújo Filho, J. C.; Souza, W. L. S. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliacrilamida: qualidade física ambiental. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n.42, p.12-25, 2016.
- Mazurana, M.; Levien, R.; Zulpo, L.; Passos, G. M.; Kerpen, H. S. Dynamic of pressure-deformation curve in uniaxial compression test in different load times. *Engenharia Agrícola*, n.37, p.973–986, 2017.
- McHugh, A. D.; Tullberg, J. N.; Freebairn, D. M. Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil & Tillage Research*, v.104, p.164–172, 2009.
- McPhee, J. E.; Aird, P. L.; Hardie, M. A.; Corkrey, S. R. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil & Tillage Research*, v.149, p.33–45, 2015.

- Moraes, M. T.; Debiasi, H.; Carlesso, R.; Franchini, J.C.; Silva, V.R.; Luz, F.B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.155, p.351–362, 2016.
- Moraes, M. T.; Debiasi, H.; Franchini, J.C.; Silva, V.R. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. *Engenharia Agrícola*, v.33, p.748-757, 2013.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.435-442, 2011.
- Peth, S.; Horn, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.169, p.401–410, 2006.
- Pinto, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed., rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.921- 930, 2006.
- Smith, D. L. O.; Dickson, J. W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.46, p.13–29, 1990.
- Sousa, A. C. M.; Farhate, C. V. V.; Souza, Z. M.; Torres, J. L. R.; Silva, R. B. Soil LoadBearing Capacity and Development of Root System in Area Under Sugarcane with Traffic Control in Brazil. *Sugar Tech*, v.21, p.153-161, 2019.
- Souza, W. L. S. Comportamento físico-mecânico de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. Tese (Doutorado Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.
- Taghavifar, H.; Mardani, A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics*, v.50, p.99–106, 2013.

- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M.; Montenegro, A. A.; Magalhães, A. G.; Barreto, M. T. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1206-1214, 2012.
- Taylor, D.W., *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 1948.
- Terzaghi K.; Fröhlich O.K. *Theorie der Setzung von Tonschichte*, Leipzig/Wien Deuticke (1936).
- Terzaghi, K. *Erdbaumechanick*, Viena, Franz Deutcke, Áustria. 1925.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525-536, 2012.
- Zhai, X.; Horn, R. Effect of static and cyclic loading including spatial variation caused by vertical holes on changes in soil aeration. *Soil & Tillage Research*, v.177, p.61–67, 2018.

- CAPÍTULO II -

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA
DEFORMAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS**

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA DEFORMAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS

RESUMO

O ensaio edométrico tem sido largamente utilizado em estudos de compactação dos solos agrícolas, tendo em vista que o conhecimento das propriedades mecânicas é fundamental para conhecer como ocorre o processo de compactação, e a partir daí traçar estratégias para a redução da degradação dos solos agrícolas. No entanto, são encontrados tempos predefinidos de aplicação de tensões nos ensaios edométricos, sendo 2 e 5 minutos os mais usuais para que se alcance 90% da deformação, como proposto por Taylor (1948). Esta predefinição, não tem levado em consideração as diferenças existentes entre os solos, sendo muitas vezes replicações de estudos anteriores, podendo resultar em dados não realistas. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar como o tempo de aplicação das tensões influencia no comportamento compressivo dos solos e como diferentes faixas granulométricas comportam-se ao serem submetidos às mesmas condições de tensão e tempo de ensaio. Para este estudo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em diversas áreas de cultivo de cana-de-açúcar na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, abrangendo solos com diferentes faixas granulométricas. A partir do ensaio de compressão edométrico, foram aplicadas tensões em continuidade de 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa durante $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos. Para os solos estudados, os tempos de 2 e 5 minutos não foram suficientes para houvesse 90% da deformação, além disso, o tempo de carregamento foi influenciado pela textura dos solos, de forma que quanto maior o teor de Argila + Silte, maior o tempo para se chegar à deformação.

Palavras-chaves: Compactação do solo, ensaio de compressão uniaxial, curva de compressão.

INFLUENCE OF LOADING TIME ON THE DEFORMATION OF SOILS WITH DIFFERENT TEXTURES

ABSTRACT

The edometric test has been widely used in studies of compaction of agricultural soils, bearing in mind that knowledge of the mechanical properties is essential to understand how the compaction process occurs, and from there to devise strategies to reduce the degradation of agricultural soils. However, predefined stress application times are found in edometric tests, with 2 and 5 minutes being the most usual to reach 90% of the deformation, as proposed by Taylor (1948). This preset has not taken into account the existing differences between the soils, often being replications of previous studies, which may result in unrealistic data. Thus, the objective of this work was to study how the time of stress application influences the compressive behavior of soils and how different granulometric ranges behave when subjected to the same load conditions and test time. For this study, deformed and undeformed samples were collected in different areas of sugarcane cultivation in the Zona da Mata of the State of Pernambuco, covering soils with different granulometric ranges. From the edometric compression test, continuous loads of 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa were applied for $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 and 1440 minutes. For the studied soils, the times of 2 and 5 minutes were not enough for there to be 90% of the deformation, in addition, the loading time was influenced by the texture of the soils, so that the higher the clay + silt content, the greater the time to reach deformation.

Keywords: Soil compaction, uniaxial compression test, compression curve.

INTRODUÇÃO

Qualquer material ao ser submetido a tensões sofre deformações, desta forma a compressibilidade não é uma característica atribuída apenas aos solos. Porém, devido a sua estrutura composta pelas fases sólida, líquida e gasosa, o comportamento compressivo do solo possui características peculiares, as quais dependem do carregamento.

A partir de tensões aplicadas, como o uso de máquinas e caminhões agrícolas, pode acontecer a redução do volume poroso dos solos, denominando-se de compressibilidade do solo. Quando combinadas com a umidade ou potencial hídrico, com a estrutura e manejo do solo e com a capacidade compressiva do solo, as tensões provocam deformações que podem ser reversíveis ou não (SILVA & CABEDA, 2006; MACEDO et al., 2010; KELLER et al., 2011).

Ao ser solicitado por uma tensão, o solo tende a reduzir o seu volume em consequência das possíveis causas: a compressão dos grãos; a compressão do ar e da água presentes nos espaços porosos e a expulsão do ar e da água dos vazios. Este comportamento do solo foi motivo de investigação por Terzaghi (1925) e Terzaghi & Frolich (1936), vindo a apresentarem a teoria do adensamento, uma das mais utilizadas em todo o mundo.

De acordo com Keller & Arvidsson (2007), as propriedades mecânicas do solo são alteradas com tempo de carregamento a que o solo é submetido. Corroborando com esses autores, Faecas & Horn (2005) e Lebbert et al. (1989), constataram que ao aumentarem o tempo de carregamento sobre o solo, houve uma diminuição da tensão de pré-consolidação e um aumento do índice de compressão.

Diversos pesquisadores têm se dedicado aos estudos dos solos agrícolas, empregando uma ampla gama de durações de tempo, que variam de 2 a 45 minutos, conforme citado por diferentes fontes, como Cavalcanti et al. (2019) e Imhoff et al. (2004). Alguns estudos, como o de Keller et al. (2004), optaram por um curto tempo de carregamento, inferior a 1 minuto, com o objetivo de simular a compressão causada pelas rodas de máquinas agrícolas sobre o solo.

Há mais de três décadas, Larson et al. (1989) estabeleceram um padrão de 5 minutos para os ensaios, seguido por outros pesquisadores em estudos mais recentes, como Machado (2001) e Mazurana et al. (2017). Em contrapartida, alguns reduziram o tempo para 2 minutos, como relatado em estudos de Carpenedo (1994), Cavalcanti et al. (2019), Machado et al. (2010) e Silva et al. (2018). Por outro lado, outros optaram por

aumentar o tempo para 10 minutos (PETH & HORN, 2006; KRUMMELBEIN et al., 2008; GUBIANI et al., 2018), 30 minutos (KELLER et al., 2011), 4 horas (ZHAI & HORN, 2018) e até 24 horas (GUPTA et al., 2002).

A ausência de padronização do tempo de carregamento tem sido um desafio na ciência agrária em relação aos ensaios de compressão. Utilizar o mesmo tempo de carregamento para diferentes tipos de solo pode ser inapropriado, uma vez que fatores como mineralogia, teor de matéria orgânica, conteúdo volumétrico de água, estabilidade de agregados e granulometria interferem na capacidade de suporte dos solos, tornando necessário adotar tempos distintos para o adensamento em cada tipo de solo (ARVIDSSON, 1998).

Pequenas alterações em parâmetros físicos ou mecânicos, como o teor de água, podem influenciar nas características de um solo. Por exemplo, baixos níveis de umidade aumentam a capacidade de suporte, tornando o solo mais resistente à compactação. No entanto, à medida que a umidade aumenta, o solo se torna mais suscetível à compactação (MACEDO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011; VASCONSELOS et al., 2012). Portanto, o uso de tempos uniformes para solos em diferentes condições pode levar a resultados imprecisos.

Outra abordagem adotada pelos pesquisadores é a realização de ensaios preliminares para determinar o tempo necessário para atingir 90% ou mais de consolidação. No entanto, alcançar esse percentual é difícil em condições agrícolas, devido ao curto período de tempo em que as rodas das máquinas ficam sobre o solo (MACEDO et al., 2010).

Keller & Arvidsson (2007) destacam que a falta de padronização dos tempos de carregamento tem prejudicado a comparação das propriedades mecânicas dos solos e tem sido um obstáculo para os estudos.

Apesar dos avanços nos estudos sobre a compressibilidade dos solos agrícolas, ainda não foi estabelecido um tempo padrão de aplicação das tensões nos ensaios de compressão edométrica, levando em consideração as diferenças entre os tipos de solo. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a relação entre o tempo necessário de aplicação das tensões e a composição granulométrica dos solos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização das Áreas de Estudo

O estudo foi realizado com amostras de solos da Zona da Mata do Estado de Pernambuco cultivados com cana-de-açúcar. Para isto, as amostras foram coletadas em diferentes localidades, tendo como fator de escolha as variações texturais dos solos encontradas na região (Tabela 1).

Na Zona da Mata Norte, foram coletadas amostras de solo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Carpina-PE; e São José Agroindustrial S/A, localizada na área rural do município de Igarassu-PE. Na Zona da Mata Sul, as amostras foram coletadas na área rural dos municípios de Sirinhaém-PE e de Ipojuca-PE, ambas pertencentes a Usina Trapiche S/A. As amostras de solos coletadas foram levadas ao Laboratório de Mecânica do Solo e Aproveitamentos de Resíduos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde foram realizados os ensaios edométricos e também as demais análises físico-mecânicas.

Tabela 1. Identificação das classes de solos, simbologia, coordenadas e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Classes de Solos	Coordenadas	Local
Argissolo Amarelo	7° 51' 8.45"S 35° 14' 11"O	Carpina-PE
Argissolo Amarelo	7° 48' 51.11"S 34° 59' 23.97"O	Igarassu-PE
Latossolo Amarelo	7°47'26.3"S 34°57'26.7"O	Igarassu-PE
Latossolo Amarelo	8° 26' 56.15"S 35° 4 '15.12"O	Ipojuca-PE
Latossolo Amarelo	8° 32' 22.53" S 35° 4' 54.34" O	Ipojuca-PE
Latossolo Amarelo	8° 29' 10.867" S 35° 3' 3.823" O	Sirinhaém-PE

Protocolo amostral

As coletas, das amostras deformadas e indeformadas, foram obtidas aleatoriamente, na profundidade de 0,00-0,20 m, com quatro repetições em cada classe de solo. A caracterização física está descrita na Tabela 2.

Amostras deformadas

A textura foi determinada pelo método do densímetro de Bouyoucos (EMBRAPA, 2017). A fração areia foi separada por tamisação (0,053 mm), após secagem em estufa a 105°C por 24 h, sendo pesada e calculada como areia total. O silte

foi obtido pela diferença entre as frações areia e argila. Para a determinação da densidade de partículas, foi utilizado um picnômetro de gás hélio de modelo ACCUPYC 1330 da Micromeritics Instrument Corporation.

Tabela 2. Caracterização física dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar, avaliados na profundidade de 0,00-0,20 m.

Solos	Argila + Silte	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	Classe Textural
S ₂₀	200	800	80	120	1,53	2,67	Argissolo Amarelo
S ₂₆	264	736	94	170	1,62	2,65	Argissolo Amarelo
S ₃₅	348	652	118	230	1,52	2,67	Latossolo Amarelo
S ₅₀	498	502	208	290	1,51	2,65	Latossolo Amarelo
S ₆₀	602	398	272	330	1,59	2,64	Latossolo Amarelo
S ₇₂	720	280	330	390	1,57	2,65	Latossolo Amarelo

Ds= Densidade do solo; Dp= Densidade de Partículas; S₂₀ = Solo com 20% de Argila + Silte; S₂₆ = Solo com 26% de Argila + Silte; S₃₅ = Solo com 35% de Argila + Silte; S₅₀ = Solo com 50% de Argila + Silte; S₆₀ = Solo com 60% de Argila + Silte e S₇₂ = Solo com 72% de Argila + Silte.

Amostras indeformadas e ensaio edométrico

As coletas, para determinação da densidade, foram realizadas por meio do amostrador de Uhland, com anel volumétrico de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, na profundidade de 0,0-0,20 m. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos e envoltas com papel filme, evitando-se perturbações do translado até o laboratório, seguindo a metodologia Embrapa (2017).

A compressibilidade foi avaliada em amostras com estrutura preservada, coletadas em anéis metálicos rígidos de 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro, nas profundidades de 0,00-0,20 m, conforme NBR 16853 (ABNT, 2020). Em laboratórios, foram preparadas, retirando-se o excesso de solo envolto no anel volumétrico, e

colocadas para saturar por 48 horas. Após decorrido o tempo, foram submetidas à tensão matricial de -30 kPa (mesa de tensão).

Após a retirada da mesa de tensão, as amostras foram pesadas e inseridas numa prensa de adensamento (Tipo Bishop com relação de 1:10, Solotest), para posteriores ensaios. Durante os ensaios, foram aplicadas as tensões de 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa, estabelecidas pela norma NBR 16853 (ABNT, 2020), com duração de aplicação de tensão de 24 horas e leituras nos intervalos de 1/8, ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que se alcançasse 90% da deformação do solo, como sugere Taylor (1948) para os ensaios edométricos, o tempo de carregamento sofreu variações, não apenas de acordo com os diferentes tipos de solo, mas também para um mesmo solo submetido a diferentes carregamentos.

Na Tabela 3, observa-se que para o solo S₂₀, ou seja, com 20% de Argila + Silte, foram necessários 240 minutos para atingir 90% da deformação nos carregamentos de 25 e 50 kPa. Para atingir esta mesma deformação, nos carregamentos de 100 e 200 kPa, houve uma redução do tempo para 15 minutos; enquanto para as tensões de 400 e 800 kPa, a mesma deformação foi verificada em apenas 8 minutos.

Tabela 3. Tempo necessário para que cada solo atinja 90% da deformação em cada tensão.

Solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	Tensão (kPa)					
		25	50	100	200	400	800
		Minutos					
S ₂₀	200	240	240	15	15	8	8
S ₂₆	260	240	240	30	30	15	15
S ₃₅	350	480	480	60	60	30	30
S ₅₀	500	480	480	60	60	30	30
S ₆₀	600	480	480	240	240	120	120
S ₇₂	720	1440	1440	240	240	120	120

Ainda analisando a Tabela 3, o solo S₂₆ necessitou dos mesmos tempos que o solo S₂₀ para atingir 90% da deformação máxima, nos carregamentos de 25 e 50 kPa, ou seja, 240 minutos. No entanto, para as tensões de 100 e 200 kPa, este solo precisou de mais tempo que o solo S₂₀, passando de 15 para 30 minutos. Também os carregamentos

finais, 400 e 800 kPa, precisaram de mais tempo que o solo S_{20} para atingirem a deformação desejada, saindo de 8 minutos no S_{20} , para 15 minutos no solo S_{26} . Esses diferentes tempos de carregamentos deve-se ao aumento do teor de Argila + Silte, pois, a variações nos teores de areia, silte e argila influenciam na compressibilidade do solo (IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008),

Os solos S_{35} e S_{50} apresentaram os mesmos valores de tempo para atingir 90% da deformação nos diversos carregamento. Desta forma, para as tensões de 25 e 50 kPa, ambos os solos precisaram de 480 minutos. Para as tensões de 100 e 200 kPa, o tempo foi de 60 minutos e para os carregamentos de 400 e 800 kPa, 30 minutos foram suficientes para alcançar a deformação desejada.

O solo S_{60} iniciou assemelhando-se aos solos S_{35} e S_{50} nos primeiros carregamentos, 25 e 50 kPa, os quais precisaram de 480 minutos para que a deformação de referência fosse atingida. Porém, para as demais tensões, o solo passou a ter um novo comportamento, necessitando de 240 minutos para as tensões de 100 e 200 kPa e de 120 minutos para que as tensões de 400 e 800 kPa atingissem a deformação de 90%.

Por fim, o solo S_{72} foi o que exigiu mais tempo para alcançar a deformação desejada, em todos os estágios do carregamento. Este solo ficou 1440 minutos, o que equivale a um dia, sobre as tensões de 25 e 50 kPa, reduzindo este tempo para 240 minutos nos carregamentos de 100 e 200 kPa e finalizando o ensaio com 60 minutos para as tensões de 400 e 800 kPa.

Como é possível perceber, o tempo de carregamento necessário para atingir 90% da deformação do solo não se manteve constante, nem entre os solos e nem para o mesmo solo nos diferentes estágios de carregamento, como vem sendo utilizado há alguns anos em inúmeros experimentos (CARPENEDO, 1994; PETH & HORN, 2006; KRUMMELBEIN et al., 2008; MACHADO et al., 2010; MAZURANA et al., 2017; GUBIANI et al., 2018; SILVA, et al., 2018; CAVALCANTI et al., 2019).

A Figura 1 reforça a ideia de que os tempos de carregamento dentro de um mesmo solo não podem ser tratados como iguais. Em todos os solos analisados, percebeu-se que há uma redução do tempo de aplicação da tensão ao longo do ensaio edométrico, já que quanto maior a tensão, mais rápido será a deformação. Essa redução aconteceu a cada duas tensões sequenciais, de modo que houve uma reaplicação dos tempos para algumas tensões no mesmo tipo de solo, formando pares de tensões que necessitaram do mesmo tempo de carregamento para atingirem 90% da deformação, como observado nas tensões de 25 e 50 kPa, 100 e 200 kPa e 400 e 800 kPa.

A Figura 1 mostra também que a redução do tempo do primeiro par de tensões para o segundo é bastante significativa, sendo no S₂₀ uma redução de 16 vezes. Para os solos S₂₆, S₃₅ e S₅₀ a redução foi de 8 vezes. Para o S₆₀, houve uma redução pela metade e para o S₇₂, a redução foi de 6 vezes. No entanto, entre o segundo e os terceiros pares de tensões, houve uma redução pela metade para todos os solos analisados.

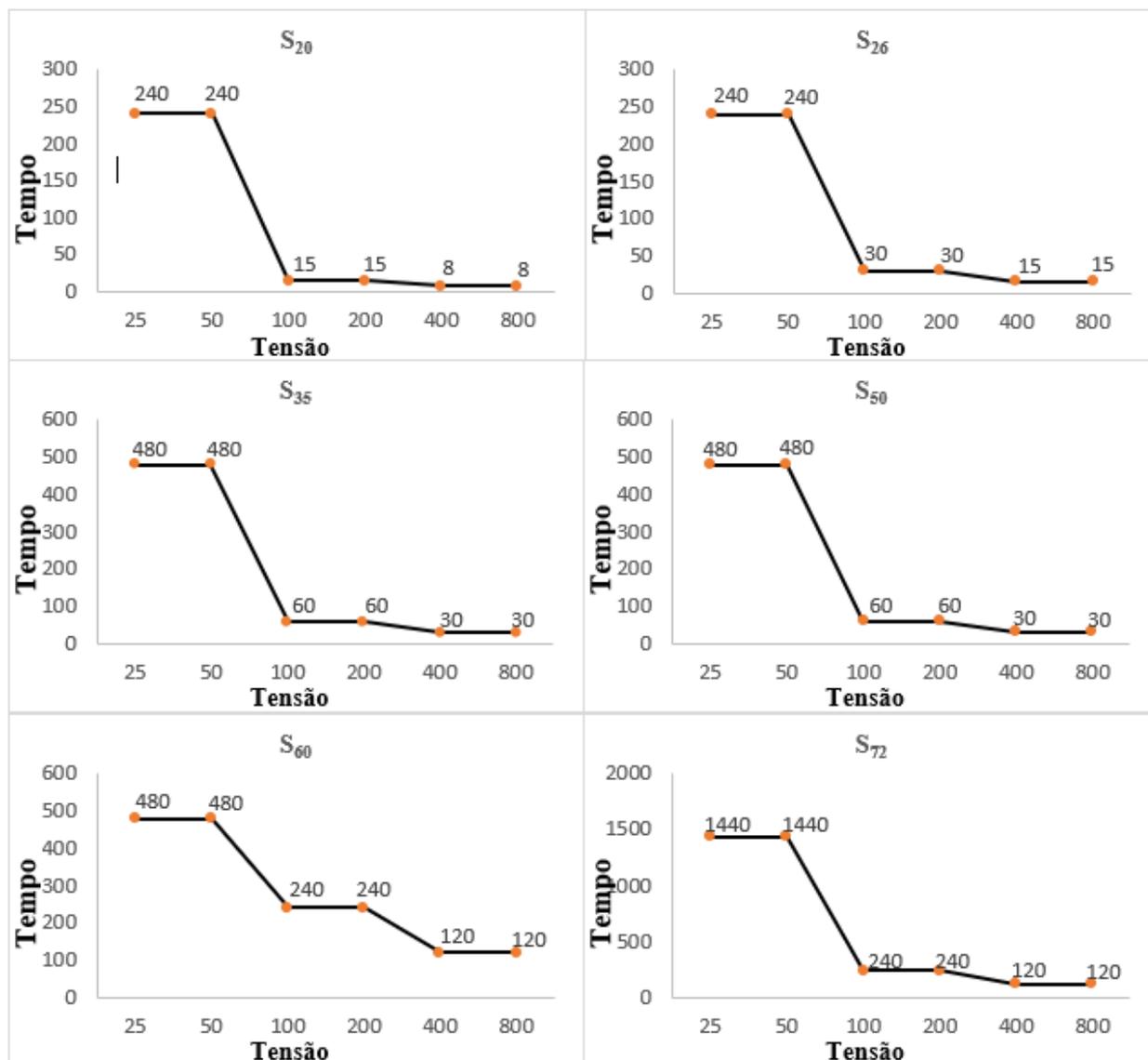


Figura 1. Tempo necessário para que cada solo atinja 90% da deformação em cada estágio de tensão.

Essa diminuição no tempo de carregamento para um mesmo solo pode ser explicada pela deformação estrutural do solo, que se intensifica a cada acréscimo de tensão. De acordo com Tsegaye e Hiil (1998), o acréscimo de tensões aplicadas ao solo proporcionalmente diminui a porosidade total, principalmente a macroporosidade, fruto dos agregados, que por sua vez compõem a estrutura do solo.

A estabilidade dos agregados do solo interfere na taxa de deformação, isto ocorre porque agregados com mais estabilidade e de tamanhos maiores são considerados melhores do ponto de vista estrutural, possuindo uma maior resistência à erosão e menos susceptibilidade as deformações provocadas por carregamentos sobre a superfície (CALONEGO & ROSOLEM, 2008; SALTON et al. 2008). No entanto, o acréscimo de tensões sobre o solo, provoca alterações no arranjo dos agregados e, conseqüentemente, na estrutura do solo, que ao ficar mais frágil, perde a sua capacidade de resistir às tensões adicionadas. Por isso, quanto maior a tensão, mais rapidamente a deformação acontecerá, fazendo com que tensões maiores necessitem de menos tempo para atingir a deformação de 90%.

Um outro resultado importante obtido é que os tempos de carregamento variaram de acordo com os teores de Argila + Silte dos solos estudados. Observou-se que quanto maior os teores de Argila + Silte, maiores foram os tempos necessários para que se atingisse 90% de deformação em todas as tensões (Figura 2).

A Figura 2 mostra as deformações alcançadas para a tensão de 200 kPa, nos tempos de carregamento de 2, 4 e 8 minutos, que são valores amplamente utilizados por pesquisadores para este tipo de ensaio, como: Cavalcanti et al. (2019), Silva et al. (2018), Mazurana et al. (2017), Macedo et al. (2010), Carpenedo (1994), Larson et al. (1989).

Percebe-se que, o tempo de 2 minutos de aplicação da tensão de 200 kPa não foi suficiente para levar a deformação ao percentual de 90% para o solo S₂₀, com teor de 20% de Argila + Silte. À medida que os teores de Argila + Silte aumentaram, a percentagem de deformação foi menor, de modo que, para 2 minutos de aplicação da tensão de 200 kPa, o solo S₂₀ atingiu 76%, enquanto o solo S₂₆, contendo Argila + Silte em 26%, atingiu uma deformação de 73%. O solo S₃₅, com 35% de Argila + Silte atingiu 68% da deformação. Para o solo S₅₀, possuindo um teor de 50% de Argila + Silte, houve uma deformação de 63%. O solo S₆₀, com textura de Argila + Silte de 60%, alcançou 61% de deformação. Já o solo S₇₂, com 72% de argila e silte, obteve apenas 54% de deformação.

Ao duplicar o tempo de aplicação da tensão de 200 kPa, passando de 2 para 4 minutos, constatou-se que o solo com menor teor de Argila + Silte, S₂₀, deformou cerca de 81%, enquanto que o solo com maior teor, S₇₂, apenas uma deformação de 61%. Para um novo adicional no tempo de carregamento, passando para 8 minutos, mais uma vez,

nenhum dos solos atingiram a deformação de referência, ficando o solo S₂₀ com 87% de deformação e o solo S₇₂ com 65%.

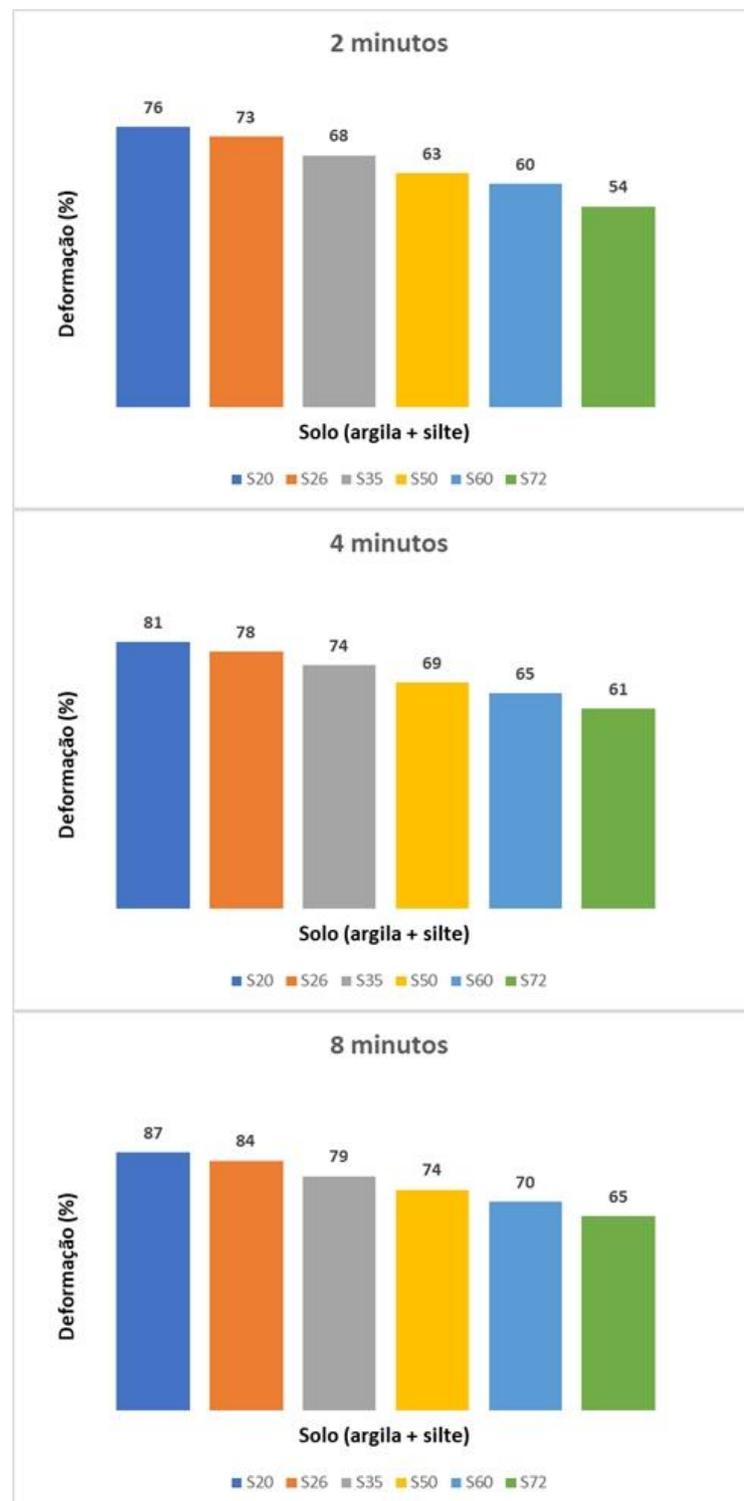


Figura 2. Deformação relativa a teores de Argila + Silte para a tensão de 200 kPa, aplicadas em 2, 4 e 8 minutos.

Analisando os solos, ao serem submetidos a um carregamento de 400 kPa, para os mesmos tempos, observa-se que apenas o solo S₂₀, contendo menor quantidade de Argila + Silte, atinge a deformação de 90%. Porém, isso só foi constatado no tempo de aplicação de 8 minutos. Para a tensão de 800 kPa, novamente apenas o solo S₂₀, alcançou a deformação desejada, ficando claro que, solos diferentes comportam-se de formas diversas, ao serem submetidos ao mesmo carregamento, e, por isto, os tempos para alcançar as mesmas deformações não serão iguais (Figura 3).

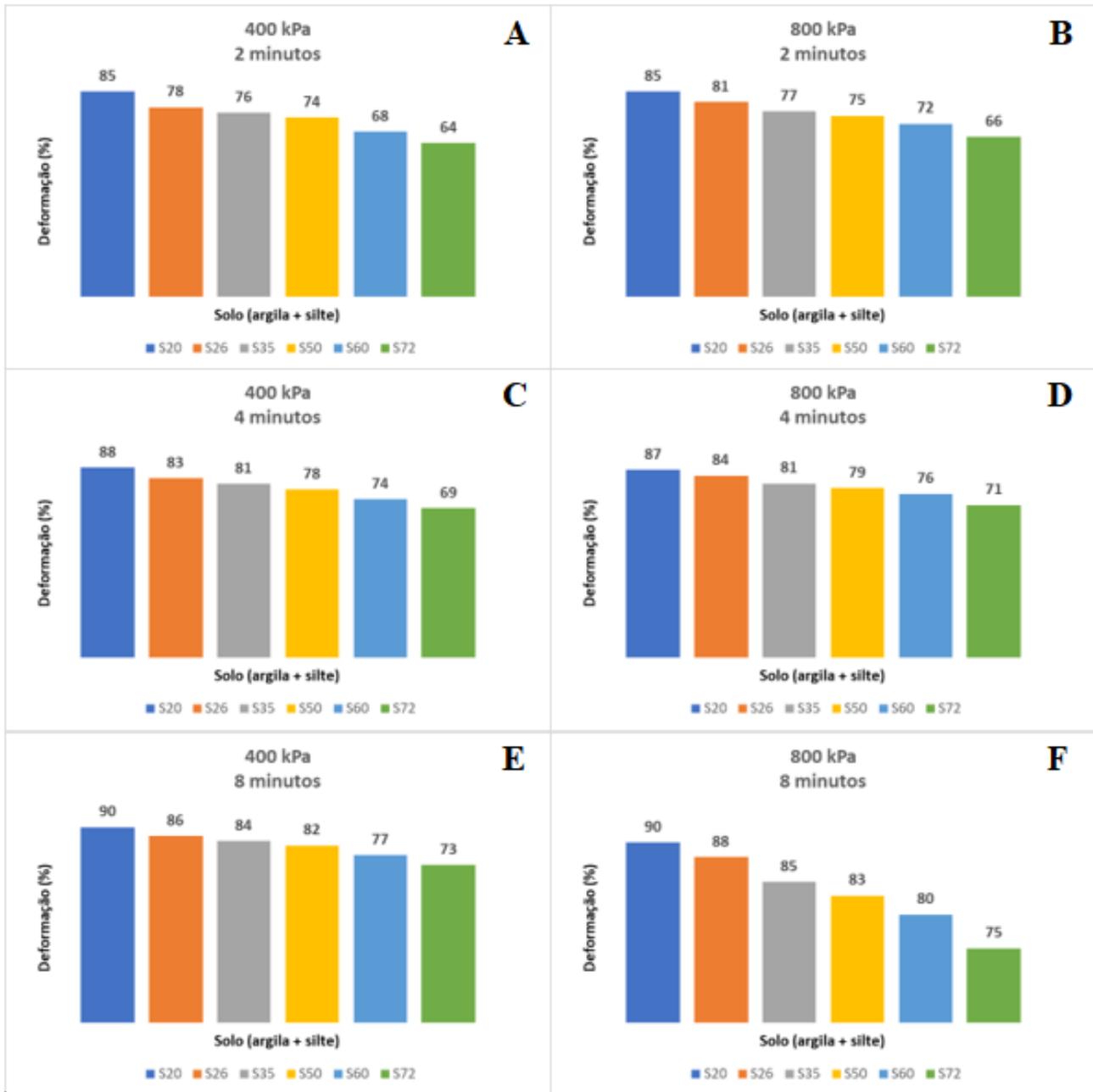


Figura 3. Deformação por teores de Argila + Silte para as tensões de 400 e 800 kPa, aplicadas em 2 (A) e (B), 4 (C) e (D) e 8 minutos (E) e (F).

As deformações dos solos, com diferentes teores de Argila + Silte, submetidos a uma tensão de 200 kPa, estão descritas na Figura 4. O solo com menor teor de Argila + Silte, solo S₂₀, em 15 minutos, atingiu 90% de deformação. No entanto, avaliando neste mesmo tempo os demais solos, como tem acontecido em diversas pesquisas que atribuem o mesmo tempo para diferentes tipos de solo, percebe-se que a deformação não foi atingida, reforçando a ideia de que o tempo de carregamento não pode ser padrão para os diversos tipos de solo. Enquanto o solo S₂₀ atingia a marca de 90% de deformação aos 15 minutos de ensaio, o solo S₂₆ chegou a uma deformação de 88%, o solo S₃₅ a 84%, o solo S₅₀ a 80%, o solo S₆₀ a 75% e o solo S₇₂ a 72%.

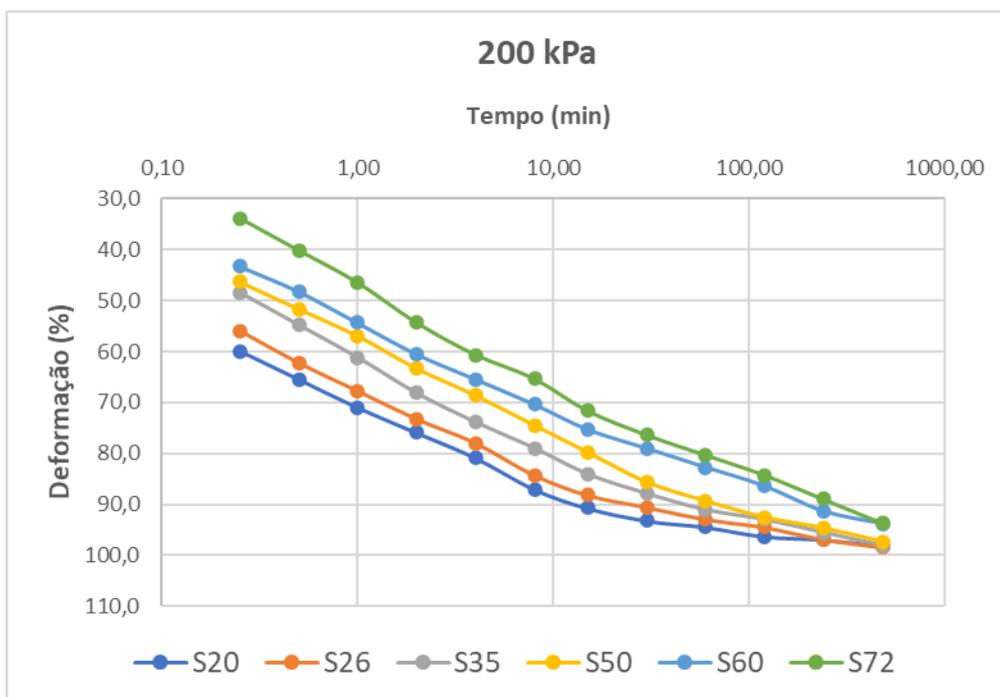


Figura 4. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 200 kPa.

Para a tensão de 200 kPa, o solo S₂₆ apenas atingiu a deformação de 90%, aos 30 minutos, enquanto os solos S₃₅, S₅₀, S₆₀ e S₇₂, atingiram a mesma deformação com 60, 60, 240 e 240 minutos, respectivamente.

Ao aplicar uma tensão de 400 kPa para os mesmos solos, observa-se que houve uma redução no tempo necessário para atingir a deformação de referência em todos os solos. O solo S₂₀ precisou de 8 minutos, enquanto que os solos S₂₆, S₃₅, S₅₀, S₆₀ e S₇₂ necessitaram de 15, 30, 30, 120 e 120 minutos respectivamente. Os mesmos tempos foram encontrados ao analisar a deformação destes solos a uma tensão de 800 kPa, como apresentam as Figuras 5 e 6.

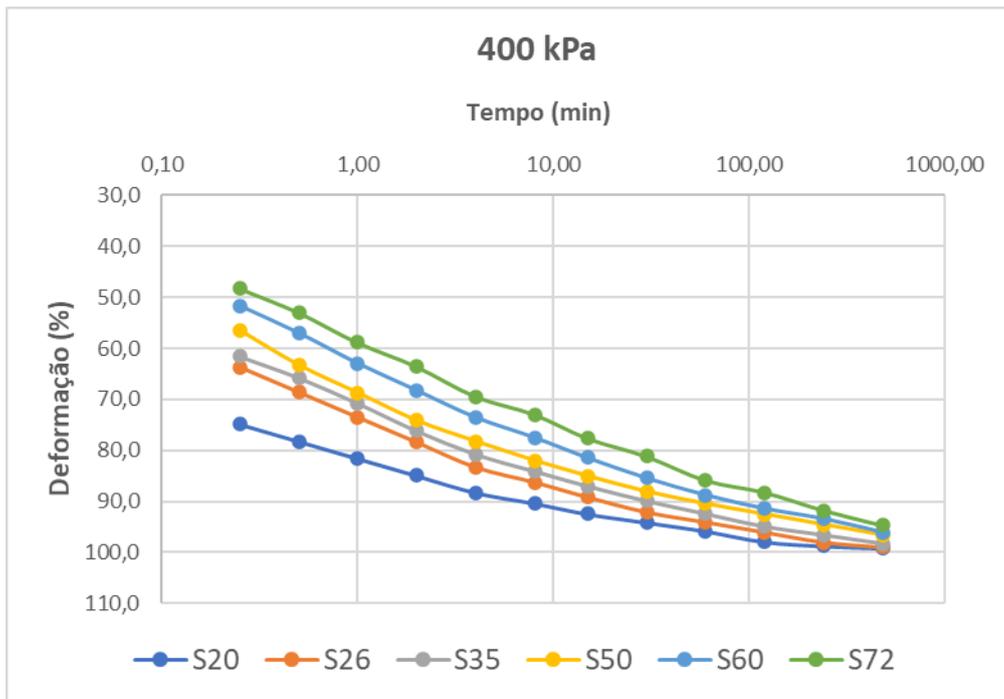


Figura 5. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 400 kPa.

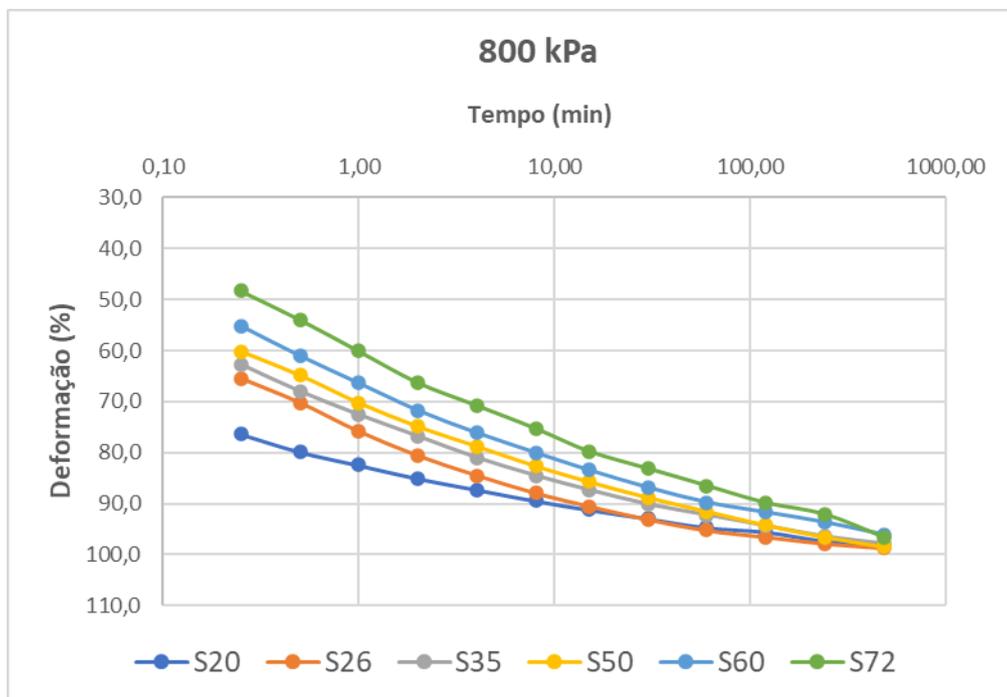


Figura 6. Comportamento da deformação dos solos para a tensão de 800 kPa.

Os resultados mostram que diferentes classes de solo tendem a apresentar diferentes taxas de deformação, ainda que o tempo de carregamento seja o mesmo. De acordo com alguns pesquisadores (MACEDO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011 e

VASCONCELOS et al., 2012), a alteração de um único atributo físico ou mecânico é suficiente para mudar a compressibilidade de um solo.

Ao serem submetidas a carregamentos, as classes de solos comportam-se de formas distintas, o que está associado as variações texturais, mineralógicas, de matéria orgânica e de umidade (TAYLOR & HENDERSON, 1959; SILVA et al., 1986; STONE & EKWUE, 1993). Além disso, o manejo do solo e o histórico de tensões, experimentadas durante os processos pedogenéticos de formação dos solos, interferem no comportamento de deformações (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

A textura do solo é um atributo que influencia no processo de deformação, pois variações nos teores de areia, silte e argila alteram a suscetibilidade à compressão do solo, isto deve-se ao fato de que solos argilosos são constituídos por partículas muito finas, o que lhes confere uma elevada capacidade de retenção de água e uma estrutura cristalina que permite que as partículas se agreguem numa matriz coesa. Esta coesão contribui para uma maior resistência à tensões sobre solo e torna-o mais resistente à deformação sob tensões externas (SILVA et al., 2002; IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008).

Para Severiano et al. (2013), a textura do solo interfere em vários atributos físico-mecânicos, já que o aumento de argila configura um acréscimo na porosidade total e na capacidade de retenção de água, além de reduzir a densidade aparente do solo. No entanto, essas modificações resultam em uma maior susceptibilidade do solo que sofrem deformações, levando à compactação.

Mantovani (1987) afirma que solos com partículas de mesmo tamanho são menos propícios ao processo de deformação, quando comparados com aqueles que são constituídos por uma mistura de areia, silte e argila. De acordo com ele, isso acontece porque as partículas de tamanhos diversos organizam-se de modo a ocuparem os poros quando são submetidas a uma pressão vertical no solo.

CONCLUSÕES

O tempo de carregamento necessário para que um solo atinja determinada deformação, depende da tensão aplicada.

À medida que se aumenta a tensão aplicada ao solo, diminui-se o tempo necessário para atingir uma determinada deformação.

A diferença textural dos diversos tipos de solo influencia no tempo de carregamento necessário para que os solos atinjam a mesma deformação.

Quanto maior os teores de Argila + Silte, maior será o tempo necessário para que o solo sofra a deformação.

Dois e cinco minutos não são suficientes para que se atinja a deformação de 90% em solos agrícolas.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16853: Solo: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020.
- 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 & Tillage Research*, v.49, p.159-170, 1998.
- Calonego, J.C.; Rosolem, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1399-1407, 2008
- Carpenedo, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre: UFRGS, 1994. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; Lima, R. P.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M.; Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.89, p.140-147, 2019.
- Corrêa, J. C.; Bull, L. T.; Crusciol, C. A. C.; Moraes, M. H. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.263- 272, 2009.
- 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*, v.20, p.175-182, 1996.
- Ekwue, E.; Stone, R. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, v.38, p.357-365, 1995.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de Solos. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2017.

- Fazekas, O.; Horn, R. Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. v.168, p.60-67, 2005.
- Gubiani, P. I.; Pértile, P.; Reichert, J. M. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. *Soil & Tillage Research*, v.180, p.29–37, 2018.
- Gupta, S. C.; Bradford, J. M.; Drescher, A. Soil compressibility. In: Dane, J. H.; Topp, G.C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p.399-415, 2002.
- Imhoff, S.; Silva, A.P. Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*. v.68, p.17-24, 2004.
- Keller, T. Lamandé, M.; Schjonning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v.163, p.13-23, 2011.
- Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J. B.; Koolen, A. J. Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research*, v.77, p.97-108, 2004.
- Keller, T.; Arvidsson, J. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *Soil Science*, v.58, p.1373–1381, 2007.
- Krümmlbein, J.; Peth, S.; Horn, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil & Tillage Research*, v.99, p.139–148, 2008.
- Larson, W. E.; Gupta, S. C.; Useche, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*. v.44, p.450-457, 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, p.73-80, 1989.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de pré-compactação e no índice de compressão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.856-862, 2010.

- Machado, A. L., T. Previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul. Tese, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.
- Mantovani, E. C. Compactação do solo. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 13, p. 52-55, 1987.
- Mazurana, M.; Levien, R.; Zulpo, L.; Passos, G. M.; Kerpen, H. S. Dynamic of pressure-deformation curve in uniaxial compression test in different load times. Engenharia Agrícola, v.37, p.973–986, 2017.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.435-442, 2011.
- Peth, S.; Horn, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v.169, p.401–410, 2006.
- Salton, J.C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Boeni, M.; Conceição, P. C.; Fabrício, A. C.; Macedo, M. C. M.; Broch, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.11-21, 2008.
- Severiano E. C, Oliveira G. C., Dias Júnior M. S., Curi N., Costa K. A. P., Carducci C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. Soil Research, v.51, p.193–202, 2013.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V.; Carvalho, F. G. de. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.579-585, 2006.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p. 921- 930, 2006.
- Silva, A. P.; Libardi, P. L.; Camargo, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.10, p.91-95, 1986.
- Silva, R. P., Rolim, M. M., Gomes, I. F., Pedrosa, E. M., Tavares, U. E., & Santos, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. Soil & Tillage Research, v.181, p.1-10, 2018.

- Silva, V.R.; Reinert, D.J. & Reichert, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II Grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.9-15, 2002.
- Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Lima, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de tensão do solo com base em propriedades físicas de solos do rio grande do sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.963-973, 2008.
- Taylor, H.M.; Henderson, D.W. Some effects of organic additives on compressibility of Yolo silt loam soil. *Soil Science*, v.88, p.101-106, 1959.
- Terzaghi K.; Fröhlich O. K. *Theorie der Setzung von Tonschichte*, Leipzig/Wien Deuticke (1936).
- Terzaghi, K., *Erdbaumechanik*, Viena, Franz Deutcke, Áustria. 1925.
- Tsegaye T.; Hill R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. *Soil Science*, v.163, p.155-165, 1998.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525-536, 2012.
- Zhai, X.; Horn, R. Effect of static and cyclic loading including spatial variation caused by vertical holes on changes in soil aeration. *Soil & Tillage Research*, v.177, p.61–67, 2018.

- CAPÍTULO III -

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA TENSÃO
DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO E NO ÍNDICE DE COMPRESSÃO**

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CARREGAMENTO NA TENSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO E NO ÍNDICE DE COMPRESSÃO

RESUMO

Estudar a compressibilidade é a maneira mais eficaz para avaliar e prevenir a compactação dos solos. Isto tem sido feito a partir do ensaio de compressão que fornece a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão, variáveis fundamentais no estudo do comportamento compressivo dos solos. Sendo assim, o ensaio edométrico, ao fornecer as curvas de compressão do solo, revela parâmetros caracterizadores da compactação dos solos agrícolas. Por isto, a aplicação das tensões neste ensaio deve representar o tempo de carregamento que acontece no campo, aproximando o ensaio da realidade encontrada in loco. Diante de um grande número de tempos de carregamento utilizados no ensaio de compressão, que vão desde 0,25 a 1440 minutos. Objetivou-se com este trabalho identificar como o tempo de carregamento influencia a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão. Para isso, amostras de diversos solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata do Estado de Pernambuco foram coletadas e analisadas em laboratório. O ensaio edométrico foi realizado com a aplicação das tensões 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, com tempos de aplicação de ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos. Os resultados mostraram que o aumento do tempo de carregamento reduziu a tensão de pré-consolidação e, em alguns casos, o índice de compressão.

Palavras-chaves: Ensaio de compressão, compactação, compressibilidade.

INFLUENCE OF LOADING TIME ON PRE=CONSOLIDATION STRESS AND COMPRESSION RATE

ABSTRACT

Studying compressibility is the most effective way to assess and prevent soil compaction. This has been done from the compression test that provides the pre-consolidation stress and the compression index, fundamental variables in the study of the compressive behavior of soils. Thus, the edometric test, by providing the soil compression curves, reveals parameters that characterize the compaction of agricultural soils. For this reason, the application of loads in this test must represent the loading time that takes place in the field, bringing the test closer to the reality found in loco. Faced with a large number of loading times used in the compression test, ranging from 0.25 to 1440 minutes, the objective of this work was to identify how the loading time influences the pre-consolidation stress and the compression index. For this, samples of different soils cultivated with sugarcane in the Zona da Mata of the State of Pernambuco were collected and analyzed in the laboratory. The edometric test was performed with the application of loads 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa, with application times of $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 and 1440 minutes. The results showed that increasing the loading time reduced the preconsolidation stress and, in some cases, the compression ratio.

Keywords: Compression test, compression, compressibility.

INTRODUÇÃO

Com a grande demanda pela produção da cana-de-açúcar, o uso de máquinas agrícolas tornou-se cada vez mais necessário para otimizar a produção e suprir a falta de mão de obra. No entanto, o uso excessivo de máquinas e caminhões agrícolas trouxe como consequência a compactação do solo, problema que prejudica de forma drástica a agricultura moderna. Com a compactação surgem vários outros problemas, como: redução da porosidade e da infiltração de água no solo, dificultando o desenvolvimento da cultura, causando limitação na produtividade, além de aumentar o escoamento superficial e o risco de erosão do solo.

A compactação do solo pode ser caracterizada como as deformações que o solo sofre a partir de uma tensão aplicada em sua superfície, que por muitas vezes são provenientes das máquinas agrícolas (MACEDO et al., 2010). Através do estudo da compressibilidade do solo é possível conhecer como o processo de compactação acontece e a partir daí, traçar metas para evitar a compactação (HAMZA et al., 2011).

Presente na maioria dos sistemas de manejo do solo, a compactação tem o seu principal aporte no uso das máquinas agrícolas, gerando consequências que vão desde a redução da produção biológica do solo ao impedimento do crescimento das plantas (REICHERT et al., 2016).

Para Debiasi et al. (2008), o estudo da compressibilidade é a maneira mais eficaz para avaliar e prevenir a compactação dos solos, uma vez que a compressibilidade está relacionada à resistência do solo, sendo estimada através da tensão de pré-consolidação, que é um indicador que separa as deformações elásticas (reversíveis) das deformações plásticas (irreversíveis).

A partir do ensaio de compressão, também chamado de ensaio edométrico, é possível obter importantes variáveis mecânicas do solo, como, a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão (KELLER et al., 2011; SAFFIHDADI et al., 2009).

A tensão de pré-consolidação é considerada a mais importante informação extraída do ensaio edométrico, indicando a tensão que o solo já suportou. Deste modo, os carregamentos que promovem tensões inferiores à tensão de pré-consolidação não geram novas compactações. No entanto, ao experimentar um carregamento que resulte em uma tensão maior que a tensão de pré-consolidação, novas deformações plásticas acontecerão. (SOUZA et al., 2012; SEVERIANO et al., 2010).

Iori et al. (2012) defendem que a tensão de pré-consolidação representa um histórico das tensões às quais um solo já foi submetido, além de ser um indicativo da capacidade de suporte de tensão deste solo, constituindo-se de uma informação eficaz para a preservação física do solo.

O índice de compressão pode ser definido como um indicador da compressibilidade do solo (KELLER et al., 2011; SAFFIH-HDADI et al., 2009). O índice corresponde à inclinação da reta de compressão virgem do solo, gerada a partir do ensaio de compressão (SILVA et al., 2000).

A fim de reduzir os impactos causados pelo processo de compactação dos solos agrícolas, o estudo das curvas de compressão tem ganhado destaque por auxiliar na tomada de decisões do manejo do solo que menos favoreça à compactação (ASSIS & LANÇAS, 2005). Por meio da tensão de pré-consolidação, diversos pesquisadores têm estudado a capacidade de suporte dos solos, evitando que deformações não recuperáveis aconteçam (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995; LIMA, 2004; OLIVEIRA, 2002; PENG et al., 2004; SILVA et al., 2006, 2000).

A intensidade, frequência e tempo de aplicação das tensões, quando associadas às propriedades físico-mecânicas podem intensificar o processo de degradação dos solos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2010; REICHERT et al., 2018).

Sendo assim, o ensaio edométrico, ao fornecer as curvas de compressão do solo, revela parâmetros que ajudam no estudo da compactação dos solos agrícolas. Por isto, o tempo de aplicação das tensões neste ensaio deve representar o tempo de carregamento que acontece no campo, aproximando o ensaio da realidade encontrada *in loco*.

Diante de uma grande variedade de tempos de carregamento utilizados no ensaio de compressão, que vão desde alguns minutos (CAVALCANTI et al., 2019) até 24 horas (GUPTA et al., 2002), objetivou-se com este trabalho identificar como o tempo de carregamento influencia a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização das Áreas de Estudo

Foram coletadas amostras de diversos solos cultivados com cana-de-açúcar na Mesoregião da Mata do Estado de Pernambuco. Na Mata Norte, as áreas de coletas situam-se nos municípios de Carpina e de Igarassu, respectivamente na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), e na São José Agroindustrial S/A. Na Mata

Sul, as áreas de coletas foram na área rural dos municípios de Sirinhaém-PE e de Ipojuca-PE, ambas pertencentes à Usina Trapiche S/A (Tabela 1).

Tabela 1. Identificação das classes de solos, simbologia, manejo e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Classes de Solos	Símbolo	Coordenadas	Local
Argissolo Amarelo	S20	7° 51' 8.45"S 35° 14' 11"O	Carpina-PE
Argissolo Amarelo	S26	7° 48' 51.11"S 34° 59' 23.97"O	Igarassu-PE
Latossolo Amarelo	S35	7°47'26.3"S 34°57'26.7"O	Igarassu-PE
Latossolo Amarelo	S50	8° 26' 56.15"S 35° 4' 15.12"O	Ipojuca-PE
Latossolo Amarelo	S60	8° 32' 22.53" S 35° 4' 54.34" O	Ipojuca-PE
Latossolo Amarelo	S72	8° 29' 10.867" S 35° 3' 3.823" O	Sirinhaém-PE

Protocolo amostral

As coletas das amostras deformadas e indeformadas foram obtidas de forma aleatória, na profundidade de 0,00-0,20 m, com quatro repetições em cada classe de solo, bem como, para cada variável a ser avaliada. A caracterização física dos solos está descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar, avaliados na profundidade de 0,00-0,20 m.

Solos	Ds	Dp	Areia	Silte	Argila
	(g cm-3)			(g kg-1)	
S20	1,53	2,67	800	80	120
S26	1,62	2,65	736	94	170
S35	1,52	2,67	652	118	230
S50	1,51	2,65	502	208	290
S60	1,59	2,64	398	272	330
S72	1,57	2,65	280	330	390

Ds= Densidade do solo; Dp= Densidade de Partículas.

Amostras Deformadas

Foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-0,20 m para cada tipo de solo, as quais serão utilizadas para diversas análises. A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos, com estimativa da argila dispersa total usando-se hidróxido de sódio como dispersante (EMBRAPA, 2017), onde

a areia foi separada por peneiramento (0,053 mm) e, posteriormente, levada à estufa a 105 °C por 24 horas para secagem. Após esse período, foi realizada a pesagem e quantificação da areia total. O silte foi quantificado pela diferença entre as frações areia e argila. Com um picnômetro de gás hélio, modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation), foi obtida a densidade de partículas.

Amostras Indeformadas

Na determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas com o auxílio do amostrador tipo Uhland, com anéis volumétricos de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura nas profundidades de 0-0,20 m, com quatro repetições para cada tipo de solo, seguindo a metodologia sugerida pela EMBRAPA (2017).

Para o ensaio de adensamento, foram coletadas amostras indeformadas em locais aleatórios, na entrelinha de cultivo. As amostras foram coletadas com anéis metálicos rígidos, com 0,065 m de altura e 0,025 m de diâmetro. As coletas foram realizadas na camada de 0-0,20 m, sendo quatro amostras para cada tipo de solo.

As amostras foram saturadas por 24 horas e posteriormente colocadas em numa mesa de tensão à 30 centímetros de coluna de água. Após este procedimento, as amostras foram acomodadas em uma prensa de compressão (tipo Bishop com relação de 1:10, Solotest).

O ensaio edométrico consistiu em aplicar tensões em continuidade de 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa, estabelecidas pela norma NBR 16853 (ABNT, 2020), com duração de aplicação de tensão de 24 horas, realizando leituras nos intervalos de 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das curvas do ensaio edométrico foi analisado a tensão de pré-consolidação de cada solo, através do método de Pacheco e Silva, para os tempos de carregamento de 2 e 4 minutos, tempos amplamente utilizados nos ensaios edométricos para solos agrícolas (Figura 1) (MACEDO et al., 2010; MAZURANA et al., 2017; SILVA et al., 2018; CAVALCANTI et al., 2019). Observa-se que houve uma variação da tensão de pré-consolidação entre o uso desses tempos.

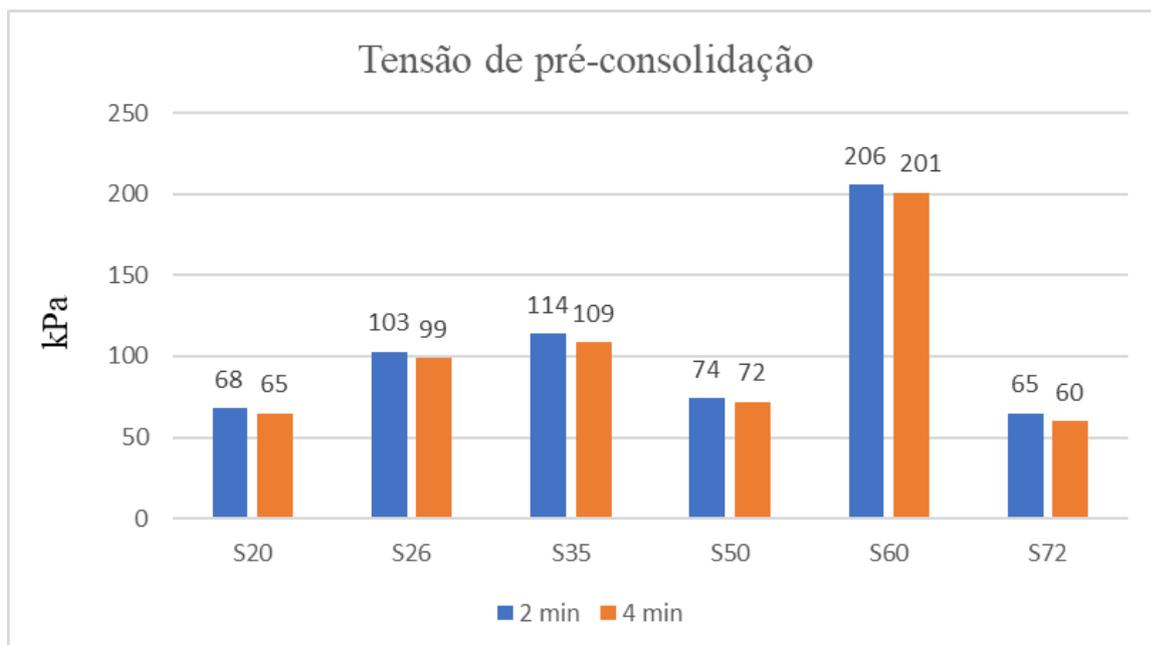


Figura 1. Tensão de pré-consolidação para os tempos de carregamento de 2 e 4 minutos.

Ao utilizar 2 minutos como tempo de carregamento para as tensões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, o solo S₂₀, obteve uma tensão de pré-consolidação de 68 kPa; no entanto para o mesmo solo, ao elevar o tempo de carregamento para 4 minutos, houve uma redução da tensão para 65 kPa.

Para o solo S₂₆, a tensão de pré-consolidação foi de 103 kPa para 2 minutos de carregamento, enquanto que para 4 minutos, a tensão de 99 kPa.

No solo S₃₅, a tensão de pré-consolidação para 2 minutos de carregamento foi de 114 kPa e para o tempo de carregamento de 4 minutos, a tensão de 109 kPa.

O solo S₅₀ registrou tensões de pré-consolidação de 74 e 72 kPa, para os tempos de carregamentos de 2 e 4 minutos, respectivamente.

No solo S₆₀, para um tempo de carregamento de 2 minutos, a tensão de pré-consolidação foi de 206 kPa. Ao elevar o tempo de aplicação das tensões para 4 minutos, a tensão passou a ser de 201 kPa.

Por último, o solo S₇₂ obteve uma tensão de pré-consolidação de 65 kPa para um tempo de carregamento de 2 minutos e de 60 kPa para 4 minutos de carregamento.

Analisando o índice de compressão, observa-se que não houve variação para a aplicação das mesmas tensões durante o tempo de 2 e 4 minutos (FIGURA 2).

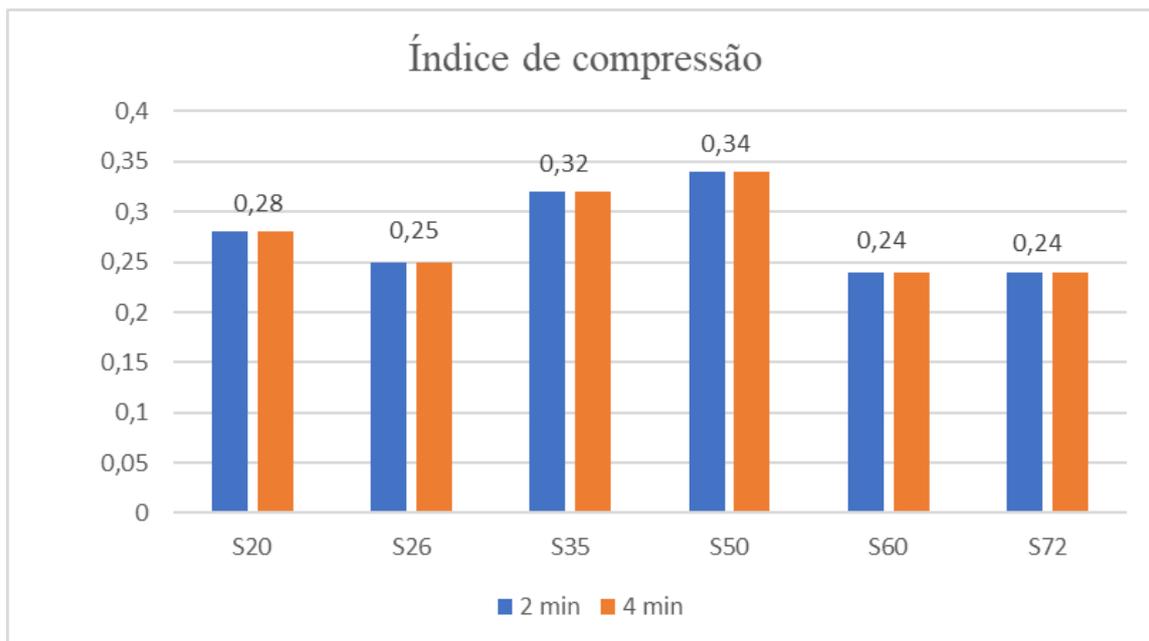


Figura 2. Índice de compressão para os tempos de carregamento de 2 e 4 minutos.

A Figura 2 mostra que para o solo S20, o índice de compressão se manteve em 0,28, tanto para o tempo de aplicação de 2 quanto para 4 minutos. Esta ausência de variação do índice de compressão foi observada para os demais solos, onde o solo S26 manteve-se com 0,25; o solo S35 com 0,32; o solo S50 com 0,34 e os solos S60 e S72 com 0,24.

A Tabela 3 mostra a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão dos solos analisados, em função do tempo de carregamento.

Comparando o tempo de carregamento de 15 minutos, que é o tempo médio de permanência dos caminhões estacionados sobre a área de cultivo de cana-de-açúcar para que possam ser carregados na colheita semimecanizada, com o tempo de 2 minutos, constata-se uma diferença nas tensões de pré-consolidação, que podem não estar representando a realidade dos solos agrícolas.

Para o solo S20, a tensão de pré-consolidação para o tempo de carregamento de 15 minutos foi de 62,94 kPa. Ao reduzir o tempo de aplicação das tensões para 2 minutos, a tensão aumentou para 67,79 kPa, enquanto que o índice de compressão manteve-se em 0,28.

Tabela 3. Tensão de pré-consolidação e do índice de vazios em diferentes tempos de carregamento.

Solos						
	Argissolo Amarelo	Argissolo Amarelo	Latossolo Amarelo	Latossolo Amarelo	Latossolo Amarelo	Latossolo Amarelo
	1	2	1	2	3	4
	(S ₂₀)	(S ₂₆)	(S ₃₅)	(S ₅₀)	(S ₆₀)	(S ₇₂)
Tempo (min)	Tensão de pré-consolidação (kPa)					
0,25	76	117	128	97	225	106
0,5	73	112	127	85	215	103
1	70	108	119	79	210	98
2	68	103	114	74	206	95
4	65	99	109	72	201	90
8	64	98	106	70	198	90
15	63	97	104	69	194	86
30	62	96	102	66	193	87
60	62	94	100	65	193	82
120	61	94	97	64	193	82
240	61	93	96	63	193	81
480	60	93	95	62	191	79
1440	60	93	95	61	192	79
Tempo (min)	Índice de compressão					
0,25	0,29	0,26	0,32	0,34	0,24	0,24
0,5	0,29	0,26	0,32	0,34	0,24	0,24
1	0,29	0,26	0,32	0,34	0,24	0,24
2	0,28	0,26	0,32	0,34	0,24	0,24
4	0,28	0,26	0,32	0,34	0,24	0,24
8	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
15	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
30	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
60	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
120	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
240	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
480	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24
1440	0,28	0,26	0,31	0,33	0,23	0,24

Para o solo S₂₆, a tensão de pré-consolidação foi de 96,67 kPa, para 15 minutos de carregamento. Já em um tempo de 2 minutos, a tensão foi de 103,29 kPa e o índice de compressão permaneceu em 0,26.

No solo S₃₅, a tensão para 15 minutos de carregamento foi de 103,75 kPa e passou para 113,60 kPa, ao reduzir o tempo de carregamento para 2 minutos. O índice

de compressão sofreu uma pequena variação de 0,31, no carregamento de 15 minutos, e foi para 0,32, no carregamento de 2 minutos.

O solo S₅₀, ao ser submetido a um tempo de carregamento de 15 minutos, teve uma tensão de pré-consolidação de 68,55 kPa, já para um carregamento de 2 minutos de duração, a tensão foi de 74,20 kPa. O índice de compressão, foi de 0,33 em 15 minutos e de 0,34 em 2 minutos.

O solo S₆₀, apresentou uma tensão de pré-consolidação de 194,32 kPa, para um tempo de 15 minutos, e de 206,03 kPa, para um tempo de carregamento de 2 minutos. O índice de compressão variou de 0,23 para 0,24 para os tempos de carregamento de 15 e 2 minutos, respectivamente.

Por fim, o solo S₇₂ teve uma tensão de pré-consolidação de 85,92 kPa, ao ser submetido ao carregamento por 15 minutos. Já para um carregamento de 2 minutos, a tensão foi de 95,03 kPa. O índice de compressão foi constante, em 0,24.

Alterações na tensão de pré-consolidação e no índice de vazios foram identificadas por outros pesquisadores (LEBERT et al., 1989; FAZEKAS & HORN, 2002) com a utilização de diferentes tempos de carregamento. Para Or e Ghezzehei (2002), Chamen et al. (2003) e Keller et al. (2013) o aumento do tempo de carregamento gera maiores deformações no solo, conseqüentemente, a tensão de pré-consolidação sofrerá alteração.

Diante desses resultados, é importante que se utilize o tempo de carregamento adequado ao que acontece no campo, sob pena de ter diagnósticos prejudiciais, tendo em vista que os tempos de carregamentos menores geram tensões de pré-consolidação maiores, dando uma falsa afirmação de que os solos suportam uma maior quantidade de tensões.

A Figura 3 mostra o comportamento da tensão de pré-consolidação em função dos tempos de carregamento de ¼, ½, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos.

Para todos os solos analisados, a tensão de pré-consolidação reduziu com o aumento do tempo de carregamento. No entanto, observa-se que há uma tendência à estabilização da tensão de pré-consolidação em determinado momento, ainda que haja aumento do tempo de carregamento.

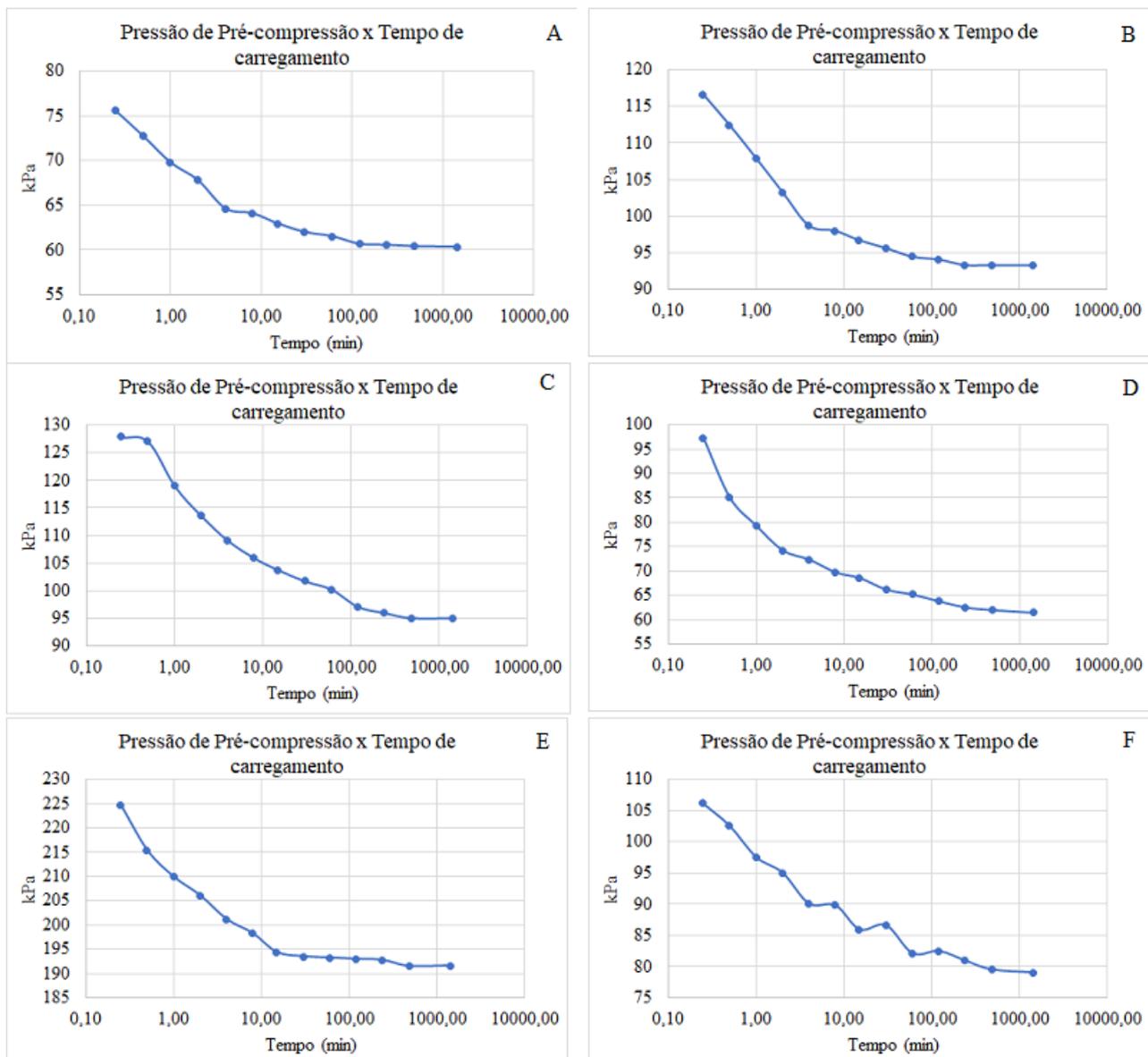


Figura 3. Comportamento da tensão de pré-consolidação em função do tempo de carregamento para os solos S₂₀ (A), S₂₆ (B), S₃₅ (C), S₅₀ (D), S₆₀ (E) e S₇₂ (F).

O solo S₂₀ no primeiro tempo de carregamento testado, que foi de 0,25 minutos, registrou uma tensão de pré-consolidação de 75,56 kPa. Este valor foi reduzindo à medida em que se dobrava o tempo de aplicação das tensões, até o tempo de 120 minutos. A partir deste, a tensão passou para 60,56 kPa e teve uma tendência à estabilização. Houve para este solo uma pequena variação do índice de compressão, começando em 0,29 para o tempo de carregamento de 0,25 minutos, e, a partir do tempo de 2 minutos, o índice manteve-se em 0,28 para todos os tempos testados.

No solo S₂₆, a tensão de pré-consolidação foi de 116,63 kPa para 0,25 minutos de carregamento. No tempo de 240 minutos, a tensão foi de 93,29 kPa, a qual tendeu a estabilizar. Já o índice compressão permaneceu em 0,26 para todos os tempos de carregamento.

Para o solo S₃₅, a tensão de pré-consolidação observada em 0,25 minutos de carregamento foi de 127,85 kPa e o índice de compressão de 0,32. No tempo de 240 minutos, a tensão começou a estabilizar em 95,96 kPa, enquanto o índice de compressão manteve-se em 0,31, a partir do tempo de carregamento de 8 minutos.

O solo S₅₀ teve uma tensão de pré-consolidação de 97,25 kPa, no menor tempo de carregamento testado, que foi de 0,25 minutos. A estabilização da tensão iniciou com o tempo de carregamento de 240 minutos com um valor de 62,52 kPa. O índice de compressão permaneceu em 0,34 para todos os tempos de carregamento.

No tempo de carregamento de 0,25 minutos, o solo S₆₀ teve uma tensão de pré-consolidação de 224,66 kPa e um índice de compressão de 0,24. No tempo de carregamento de 30 minutos, este solo apresentou uma tendência a estabilizar a tensão pré-consolidação em 193,21 kPa. O índice de compressão passou a ser de 0,23 do tempo de carregamento de 8 minutos.

Para o solo S₇₂, a tensão de pré-consolidação correspondeu a 106,15 kPa, para o tempo de carregamento de 0,25 minutos. Neste mesmo solo, a tendência de estabilização da tensão iniciou no tempo de aplicação de tensões de 480 minutos, a qual foi de 79,50 kPa. O índice de compressão neste solo foi de 0,24 para todos os tempos de carregamento.

Desta forma, o tempo de aplicação das tensões afetou a determinação da tensão de pré-consolidação. Em alguns solos, o índice de compressão sofreu pouca variação, em outros, não foram registradas alterações. Resultados similares foram encontrados por Lebert et al. (1989) e Fazekas e Horn (2005), os quais apresentaram diferenças nos valores da tensão de pré-consolidação e do índice de compressão, com o aumento do tempo de carregamento em ensaios de compressão uniaxial. Or e Ghezzehei (2002) também identificaram mudanças na tensão de pré-consolidação, após utilizarem diferentes tempos de carregamento, tendo uma redução da tensão com o aumento do tempo de carregamento.

Sendo assim, ainda que pouco questionado, o tempo de carregamento no ensaio de compressão é uma variável de grande importância, principalmente quando se deseja simular as deformações que acontecem *in situ*, através do ensaio edométrico.

CONCLUSÕES

À medida que o tempo de carregamento aumenta, a tensão de pré-consolidação reduz.

Tempos de carregamentos curtos podem superestimar a tensão de pré-consolidação dos solos agrícolas

REFERÊNCIAS

- 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*, v.29, p. 507-514, 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 12007: Solo: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 13p, 1990.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16853: Solo: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 13p, 2020.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; Lima, R. P.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R.; Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.189, p.140-147, 2019.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2629-2637, 2008.
- Dias Junior, M. S.; Pierce, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, v.8, p. 139-151, 1995.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de Solos. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2017.
- Fazekas, O.; Horn, R. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, v.168, p. 60-67, 2005.
- Gupta, S. C.; Bradford, J. M.; Drescher, A. Soil compressibility. In: Dane, J. H., Topp, G.C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p.399-415, 2002.

- Hamza, M. A.; Al-Adawi, S. S.; Al-Hinai, K. A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. *Soil & Tillage Research*, v.49, p.135-142, 2011.
- Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Junior, M. S.; Lima, J. M. Tensão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1448-1456, 2012.
- Keller, T.; Lamandé, M.; Schjonning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v. 163, p. 13-23, 2011.
- 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, p. 73–80, 1989.
- Lima, C. L. R.; Silva, A. P.; Imhoff, S.; Leão, T. P. 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.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010.
- Mazurana, M.; Levien, R.; Zulpo, L.; Passos, G. M.; Kerpen, H. S. Dynamic of pressure-deformation curve in uniaxial compression test in different load times. *Engenharia Agrícola*, v.37, p.973-986, 2017.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F.; Costa, Y. D.; Pedrosa, E. M. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.914-920, 2010.
- Or, D.; Ghezzehei, T.A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil & Tillage Research*, 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 recompacted Ultisols. *Soil & Tillage Research*, v. 76, p.125-137, 2004.
- Reichert, J. M.; Rosa, V. T.; Vogelmann, E. S.; Rosa, D. P.; Horn, R.; Reinert, D. J.; Denardin, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil & Tillage Research*, v.158, p.123-136, 2016
- Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Rodrigues, M. F.; Cavalli, J. P.; Awe, G. O.; Mentges, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in

- granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, v.165, p.345-357, 2018.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Severiano, E. D. C.; Oliveira, G. C. D.; Dias Júnior, M. D. S.; Castro, M. B. D.; Oliveira, L. F.; Costa, K. A. D. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I-modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1419-1427, 2010.
- Silva, A. R.; Dias Junior, M. S.; Guimarães, P. T. C.; Araújo Júnior, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de tensão 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.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; Pedrosa, E. M.; Tavares, U. E.; Santos, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Research*, n.181, p.1-10, 2018.
- 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*, v.4, p.239-249, 2000.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Suscetibilidade à compressão de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.239-249, 2000.
- Souza, G. S.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Araújo, F. S.; Barbosa, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.603-612, 2012.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476, 1988.