

KEILA JERÓNIMO JIMÉNEZ

ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB TRÁFEGO DE MÁQUINAS NA
COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

RECIFE - PE
FEVEREIRO DE 2019

KEILA JERÓNIMO JIMÉNEZ

ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB TRÁFEGO DE MÁQUINAS NA
COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola da Universidade Federal
Rural de Pernambuco para obtenção do Título de
Doutora em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
Co-Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes

RECIFE - PE
FEVEREIRO DE 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

J56a Jerónimo Jiménez, Keila.
Análise da compactação do solo sob tráfego de máquinas na colheita da cana-de-açúcar através do método dos elementos finitos / Keila Jerónimo Jiménez.- Recife, 2019.
82 f.: il.

Orientador(a): Mário Monteiro Rolim.
Coorientador(a): Igor Fernandes Gomes.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2019.
Inclui referências.

1. *Saccharum officinarum* 2. Compactação 3. Mecanização
4. Simulação numérica 5. Tensão de pré-consolidação I. Rolim, Mário Monteiro, orient. II. Gomes, Igor Fernandes, coorient. III. Título

CDD 630

KEILA JERÓNIMO JIMÉNEZ

Tese apresentada em 26 de fevereiro de 2019 ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor.

Análise da compactação do solo sob tráfego de máquinas na colheita da cana-de-açúcar através do método dos elementos finitos

Tese defendida em 26 de fevereiro de 2019 pela Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
DEAGRI/UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes
CTG/UFPE

Dr. Renato Paiva Lima
PGEA/UFRPE

Prof. Dr. Djalma Eusébio Simões Neto
EECAC/UFRPE

Profa. Dra. Cecília Maria Mota Silva Lins
UACSA/UFRPE

Naquele dia, com o único motivo saí de casa, decidi estudar no Chapingo, perto da Cidade do México. Então eu pedi para ela me abençoar e para ele cuidar dos meus irmãos e acreditar em mim. Ela me pediu para não perder meu sorriso, pois a vida não é fácil. Ela não sabia meu motivo, mas minha razão foi, é, e sempre será ela. Então, quando cheguei lá, pensei que talvez podia recorrer outras cidades, e, quando conheci quase todos os estados do meu país graças à mamãe Chapingo, pensei que talvez tivesse acabado meu percurso, só que não, na realidade apenas estava começando, aquela maravilhosa Universidade abriu minhas asas para voar longe, me deparei nos EEUU, Cuba, Argentina, Chile, Paraguai e Brasil. Então eu percebi que, desde que cheguei tão longe, talvez eu acabasse de cruzar a enorme América Latina. E é isso que eu fiz, voltei para o Brasil. O país que me encantei e concedeu a honra aos meus pais, de ver frutificar por segunda ocasião um dos seus seis galhos, pois a primeira foi no 2015, quando me tornei engenheira. Gratidão ao povo Brasileiro pelo aprendizado academicamente, cultural e social; nunca imaginei tornar-me o motivo da felicidade do meu agrônomo favorito e da minha educadora pessoal, meus pais. Partirei para casa totalmente plena e ficarei com saudades de vocês, mas meu dever de filha é cuidar dos meus grandes amores, já fui independente por mais de uma década, agora tenho que continuar em frente, sempre em frente.

-Keila Jerónimo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais: Cenobia Jiménez e Juan Jerónimo. Aos meus irmãos Natanael, Juan, Rosalba, Naxhieli e Araceli. Aos meus fofinhos Kenai (in memoriam), Nathan, Lizi, Osmar Samir e Ian. Aos meus avós Cristóbal (in memoriam), Juana, Mauro e Francisca, que mesmo na distância e não estando presentes são de grande exemplo e inspiração. À minha tia Aquilina e Magdalena, à minha cunhada Maria e a todos os meus familiares Jiménez e Jerónimo, que direta ou indiretamente, participaram da minha jornada em busca do conhecimento.

Tudo o que sou hoje é graças a meus grandes amores.

AGRADECIMENTOS

Amor e Gratidão! Definem meu sentimento ao chegar à conclusão deste Doutorado num país maravilhoso como o Brasil. Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e perseverança na jornada acadêmica e pessoal, sem Ele nada sou.

Saudades e perseverança! Um sentimento constante no meu andar e uma palavra crucial na minha formação, desde 2006 comecei esta jornada, longe da minha família, mas sempre constante na minha mente e no meu coração. Graças aos meus pais Cenobia Jiménez e Juan Jerónimo por ensinarem a mim e aos meus irmãos a importância da educação, por terem sido nossos próprios educadores no Ensino Básico e Fundamental.

Aos meus irmãos e sobrinhos, Natanael, Rosalba, Juan, Naxhieli, Araceli, Nathan, Lizi, Samir, Ian e Kenai. Estou muito orgulhosa de vocês, muito grata pelos melhores momentos quando nos encontrávamos no Natal ou nas férias, amo vocês. A Zenaida Jerónimo, Aquilina Jiménez, Magdalena Jerónimo e a todos os meus familiares Jerónimo-Jiménez pelo carinho e confiança.

Grata à Universidade Autónoma Chapingo (UACH) pela Educação Média Superior e Superior desde 2006, assim pelo incentivo de Intercambio Internacional durante a Graduação e qualidade acadêmica no meu país, México.

À Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (GCUB) pela oportunidade de estudar uma Pós-Graduação no Brasil. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e à Educação Laica e gratuita do Brasil. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco pela oportunidade.

Agradeço aos professores Dr. Mário Rolim e Dr. Igor Gomes pela orientação e dedicação em todo momento durante o curso de Doutorado, principalmente, no decurso da pesquisa científica, orientando-me em todo momento, muito grata pela contribuição na minha formação acadêmica. É um prazer aprender e trabalhar com grandes pesquisadores, esta pesquisa é o resultado de cada colaboração proporcionada.

Ao Dr. Renato Lima e à Dra. Uilka Tavares, pela dedicação e direção durante a elaboração da Tese. Este trabalho é resultado de cada contribuição oferecida, muito grata pelo apoio incondicional.

Aos funcionários da EECAC/UFRPE: Dr. Djalma Eusébio Simões Neto, Msc. Evanilson Silva, Sr. Cosmo e Sr. José pelo apoio durante a coleta de solo.

Aos colegas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola - PGEA pela ajuda oferecida durante o experimento: Roberta Cavalcanti, Evanilson Silva, Ronaldo Oliveira

Filho e Francisco Sanguino. E aos graduandos da iniciação científica (PIBIC): Bianca Nascimento, Camila Melo, Eduardo Mendonça, Davi Thorpe, Andreza Silva e Eric Silva pelo auxílio no laboratório e no campo durante o experimento.

A Doutoranda do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil –UFPE: Laura Álvarez, pelo apoio oferecido na simulação numérica e pela amizade incondicional.

Aos docentes e funcionários do PGEA/UFRPE, principalmente à Profa. Dra. Ceres Duarte, Manuel Cenegundes e Nádia Cassemiro pelas gentilezas e monitoramento acadêmico no Doutorado.

À Doutoranda, Profa. Laércia Lima pelo apoio incondicional, sendo uma peça elementar na minha estadia no Brasil. Mesmo longe de casa me fez sentir em família, alguém que em certos momentos foi colega, professora, amiga e mãe. À Msc. Maria da Penha e à família Rocha Fernandes Lima pelo carinho incondicional.

Ao meu prezado Edson Florentino, quem amo infinitamente, quem é meu irmão brasileiro e me ensinou a ser pesquisadora, humana e ética. Minha eterna gratidão e amor.

Aos meus queridos brasileiros: Danilo Gonçalves, Diego Souza e Caick Martins pelo carinho, força e apoio oferecido durante minha estadia em Recife, os quais se tornaram minha família, não de sangue, mas sim da vida.

A minhas amigas do Brasil pelo aprendizado, carinho e empatia: Jessyka Fontenele, Raquele Lira, Sirleide Menezes, Mara Dantas, Thaís Vicente, Alícia Torres, Stella Matoso, Juliana Melo, Carolina França, Girlaine Lourenço, Tatiana Nascimento, Maria Sousa e Fernanda Andrade.

A meus amigos do México pelo amor, carinho e amizade apesar da distância e circunstâncias, sempre me motivaram a continuar esta jornada: Laura Paz, Yaneli Escobar, Merary Escobar, Xanat Barranco, Esther Ignacio, Perla Robles, Diana Benitez, Diana Gisel García, Dora Aguirre, Saulo Flores, Nora Gallegos, Israel Gaytán, Eduardo Pacheco, Dulce López e Héctor Náfate. Aos mexicanos Thalía Rodríguez, Ana García, Antonia Morales, José Luis López, Magdiel López, Anastacio Santos, Pedro Santiago e CDI pelo apoio para passagem aérea MEX-BR no começo do doutorado.

Aos colegas da UFRPE pelo carinho: Ailton Carvalho; Daniel Feitosa; Péricles Mendes; Gebson Pinheiro; Janilo Dantas; Jhon Lennon da Silva; Wanderson Oliveira; Nadielan Lima; Edson Moura, Marcílio Melo; Robertson Fontes Júnior; Andrey Silva; Breno Lima; Celia Santos; Diego Araújo; Frederico Lins; José Diórgenes Oliveira; Monalisa Costa; Daniela Santos; Raphaela Revoredo; Donato Souza, Diogo Rodrigues, Alan Silva e Raguiera Silva.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	XII
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL	14
Introdução.....	15
Objetivos.....	17
Objetivo geral.....	17
Objetivos específicos	17
Hipóteses	17
Revisão Bibliográfica	18
Cana-de-açúcar	18
Propriedades físicas	19
Compactação.....	20
Avaliação visual da estrutura do solo (VESS).....	22
Compressibilidade	23
Cisalhamento	24
Tensão-deformação do solo	25
Estudo de compactação através da modelagem matemática	28
Modelo constitutivo para solo não saturado	30
Método dos elementos finitos (MEF)	34
Referências Bibliográficas	34
CAPÍTULO II: ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS A COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	41
Introdução.....	43
Materiais e Métodos.....	45
Área de estudo	45
Coleta de solo.....	45
Ensaio de laboratório	46
Tensões aplicadas pelos veículos agrícolas	47
Dados de entrada do modelo Cam-Clay Modificado.....	48
Pré-processamento: malhas de elementos finitos e condições de contorno.....	49
Simulação numérica e Pós-Processamento.....	51
Resultados e Discussão.....	51
Tensão vertical.....	51

Tensão de pré-consolidação.....	56
Porosidade do solo.....	58
Conclusões.....	60
Referências Bibliográficas.....	60
CAPÍTULO III: INDICADORES FÍSICO-MECÂNICO DE UM ARGISSOLO AMARELO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR.....	64
Introdução.....	66
Materiais e Métodos.....	67
Área de estudo.....	67
Amostragem.....	68
Análises físicas e mecânicas do solo.....	69
Resistencia à penetração e análise visual.....	70
Análise de dados.....	71
Resultados e Discussão.....	71
Conclusões.....	78
Referências Bibliográficas.....	79

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I: INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1. Curva de compressão do solo, índice de compressão e recompressão	24
Figura 2. Determinação do ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) pelo ensaio de cisalhamento.....	25
Figura 3. Tensões atuantes em um volume de controle diferencial	26
Figura 4. A-comportamento elástico e B-comportamento plástico do solo elastoplástico	28
Figura 5. Superfície de plastificação bidimensional e tridimensional em diversas trajetórias de tensões normais	28
Figura 6. Deformação elastoplástica do solo e linha de tensão de pré-consolidação	32
Figura 7. Superfície de escoamento tridimensional do Cam-Clay Modificado.....	32
Figura 8. Função de fluência e linha de estados críticos.....	33

CAPÍTULO II: ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS A COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Figura 1. a) Abertura das trincheiras para extração dos blocos indeformados acoplados em caixas, b) Blocos indeformados, c) Amostra indeformada.	45
Figura 2. Condições do contorno, distribuição de tensões no contato solo-pneu do trator dianteiro e discretização em elementos não estruturados.....	49
Figura 3. Variação da tensão vertical no solo das rodas do eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do trator para a umidade a CC até 4,00 m de profundidade.	51
Figura 4. Variação da tensão vertical no solo das rodas do eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do caminhão (c) do reboque para a umidade a CC até 4,00 m de profundidade.....	53
Figura 5. Tensões verticais transmitidas ao solo para a roda dianteira (a), e traseira do trator (b); roda dianteira (c), e traseira do caminhão (d); e rodas do reboque (e) na umidade CC, em duas situações: abaixo do contato central dos pneus e no meio do eixo..	55
Figura 6. Tensão de pré-consolidação nos eixos dianteiro (a) (c) e traseiro (b) (d) do trator MF 4292 do caminhão MB 2638, respetivamente, e de ambos do reboque (e).....	57

Figura 7. Variação da porosidade do eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do trator, do eixo dianteiro (c) e traseiro (d) do caminhão, e dos eixos do reboque (e).59

CAPÍTULO III: INDICADORES FÍSICO-MECÂNICO DE UM ARGISSOLO AMARELO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Figura 1. Localização da área de estudo de cana-resoca da EECAC/UFRPE 69

Figura 2. a) Estratificação equitativa do perfil de solo. b) Coleta de amostra indeformada do solo na superfície (VESS). c) Amostragem do solo indeformado no subsolo (SubVESS).....72

Figura 3. Densidade seca, umidade gravimétrica, porosidade, carbono orgânico, resistência à penetração (RP) e tensão de pré-consolidação (Po) de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana de açúcar. 74

Figura 4. a) Resistência à penetração até 1 m b) Avaliação visual da estrutura do solo pelas metodologias VESS e SubVESS c) Agregado do perfil do solo..... 76

Figura 5. Distribuição de percentagem de diversos diâmetros de agregados estáveis em água em diversas camadas de um perfil de solo de 1 de profundidade. 77

Figura 6. Análise multivariada dos parâmetros físicos e mecânicos do solo: Densidade seca (Ds), tensão de pré-consolidação (Po), percentagem de agregados com diâmetro >2 mm (D2), 0,5-1 mm (D105) e <0,25 mm (D025), análise visual da estrutura (VESS), resistência à penetração (RP), umidade gravimétrica (w) e carbono orgânico (CO) na camada A (0-0,2 m), B (0,2-0,4 m), C (0,4-0,6 m), D (0,6-0,8) e E (0,8-1,0 m)..... 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

c	Coesão
CC	Umidade a capacidade de campo
Cc	Índice de compressão
Cs	Índice de recompressão/descompressão
D	Pneus do eixo dianteiro
DR	Distância entre rodas internas do eixo
Ds	Densidade seca
Dp	Densidade de partículas
DP	Diâmetro do pneu
e	Índice de vazios
λ	Inclinação da linha de compressão normal no estado crítico
φ	Ângulo de atrito
LEC	Linha de Estado Crítico
LC	Largura do contato pneu-solo
k	Inclinação da linha de descompressão/recompressão no estado crítico
μ	Coefficiente de Poisson
M	Declividade da linha de estados críticos
MATLAB	MATrix LABoratory
MEF	Método de Elementos Finitos
NP	Número de pneu por eixo
n	Porosidade
p	Tensão normal
q	Tensão desviatória
SPD	Separação entre pneus duplos
SubVESS	Análise visual da estrutura do solo
T	Pneus do eixo traseiro
VESS	Análise visual da estrutura do solo

RESUMO GERAL

O estudo da interação máquina-solo é de vital importância devido à compactação provocada, principalmente, em sistema semi-mecanizado. Assim, objetivou-se analisar o comportamento da tensão-deformação do solo em diferentes camadas de um Argissolo durante a colheita de cana-de-açúcar, através de simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos. Em três locais selecionados aleatoriamente na entrelinha de cultivo, em camadas de 0,2 m, da superfície até 1 m de profundidade, onde realizou-se a Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e a resistência à penetração e, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para diversos ensaios mecânicos, a capacidade de campo (CC) e análise de caracterização física. Foram determinados todos os parâmetros requeridos pelo modelo elastoplástico Cam-Clay Modificado através das análises de laboratório e gerada a geometria do perfil de solo com dimensões 9×4 m, com a estratificação de cinco tipos de materiais num gerador de malha de Elementos Finitos. Foram calculadas e aplicadas as tensões distribuídas pelos diversos veículos agrícolas (trator, caminhão e reboque), os quais foram simulados através do Método dos Elementos Finitos (MEF) no software numérico CODE_BRIGHT. Os parâmetros referentes antes da colheita, como a tensão de pré-consolidação, resistência à penetração (RP), densidade seca (Ds), agregados, carbono orgânico e análise visual foram submetidos a análise de variância multivariada ao 5% de probabilidade, com correlação canônica (multivariada). Foi encontrado que o reboque apresentou maior propagação das tensões verticais, propagando-se até 4 m de profundidade. No contato pneu-solo foram alcançados valores de 880 kPa e a 1,0 m de profundidade, embaixo dos rodados atingiu 200 kPa, e, houve aumento da tensão de pré-consolidação e redução da porosidade ao longo do perfil, principalmente na primeira camada. Assim como foi observado correlação canônica entre a Ds, RP, menor diâmetro de agregados ($<0,25$ mm), tensão de pré-consolidação e VESS. A camada de 0-0,2 m apresentou maior concentração de carbono orgânico e maior percentagem de diâmetro de agregados (>2 mm). Para a camada de 0,2-0,4 m, antes da colheita apresentou maior Ds, RP, VESS e percentagem de agregados de $<0,25$ mm.

Palavras-chave: Análise visual de estrutura do solo, MEF, tensão de pré-consolidação, *Saccharum* spp.

ABSTRACT

The machine-soil interaction study is crucial due to the compaction promoted by them mainly in semi-mechanized system. Thus, this study aims to analyze the behavior of the soil stress-strain in different layers in an Ultisol during the sugarcane harvest through numerical simulation by the Finite Element Method. Three sites, randomly selected in the crop line with layers from 0.2 m up to 1 m depth were used to perform the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS), the soil penetration resistance, disturbed and undisturbed samples were collected for physical characterization analysis and several mechanical tests equilibrated in a water content corresponding to field capacity. All the parameters required by the Modified Cam-Clay elastoplastic model were determined through laboratory analysis. A mesh with a geometry of 9 x 4 m, which characterized the soil profile, was generated with the stratification of five types of materials in a Finite Element grid software. The distributed stresses of the different agricultural vehicles (tractor, truck and trailer) were calculated and applied, which were simulated through the Finite Element Method (FEM) in the numerical software CODE_BRIGHT. Pre-harvest parameters, such as pre-consolidation stress, soil penetration resistance (PR), dry bulk density (BD), aggregates, organic carbon and visual analysis were subjected to a multivariate analysis of variance at 5% probability, with canonical discriminant analyze. It was found that the trailer presented a greater propagation of the vertical stress, reaching up to 4 m of depth and 200 kPa at 1 m of depth. Under the wheels, as well as the tire-soil contact values of 880 kPa and 1 m depth were reached. There was an increase of the pre-consolidation stress and reduction of porosity along the profile, especially in the first layer. There was a canonical correlation between BD, PR, lower aggregate diameter, pre-consolidation stress and visual soil analysis scores. The layer 0-0.2 m presented higher concentration of organic carbon and higher percentage of aggregate diameter (> 2 mm). The 0.2-0.4 m layer presented higher BD, PR, VESS and percentage of aggregates of <0.25 mm.

Key word: Visual Evaluation of soil structure, MEF, pre-consolidation, *Saccharum* spp.

CAPÍTULO I:
INTRODUÇÃO GERAL

Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância para o desenvolvimento sócio-econômico do Brasil pela produção sucroalcooleira e de biocombustível. Em 1975, houve grande impulso no setor de biocombustível com a criação do Proálcool, gerando grande demanda de etanol, em consequência ao alto custo da importação do petróleo, havendo intensificação da produção de 2,08 para 8,72 milhões de hectares em 2018 (BRASIL, 2007; CONAB, 2018).

O Brasil é o maior fornecedor mundial de etanol e açúcar refinado (OCDE-FAO, 2015), sendo o líder mundial de produção de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão, México e Colômbia. Com a expansão das áreas de cultivo, necessitou da introdução da mecanização nos canaviais resultando em vantagens operacionais, principalmente nas operações da colheita de cana-de-açúcar.

O uso cada vez maior de veículos de carga, teve como consequência principal a compactação do solo, sendo um dos principais problemas enfrentados pela agricultura moderna, resultando como consequência, numa diminuição da porosidade, aumento do escoamento superficial e da densidade, portanto, torna-se desfavorável o desenvolvimento radicular e, limitando assim, a máxima produtividade.

Altas tensões aplicadas no solo pelo uso de máquinas agrícolas, modificam as características físicas e mecânicas do solo. Em qualquer ponto no interior do perfil quando submetido a tensões externas pelo tráfego, haverá solicitação do solo que opõe esforços resistentes, os quais são chamados de tensões normais (σ) e tensões cisalhantes (τ).

As tensões aplicadas são caracterizadas pela deformação reversível (elástica) e irreversível (plástica) do solo. Esta relação tem sido estudada através de modelos matemáticos: modelos analíticos e modelos numéricos ou modelos constitutivos. Os modelos analíticos estão fundamentados na teoria de Boussinesq (1855), considerando o solo homogêneo com deformação elástica linear. Entretanto, os modelos numéricos consideram deformações elásticas e plásticas.

A Mecânica dos materiais tem desenvolvido diversos modelos matemáticos que representam a situação física real de componentes sujeitos a tensões mecânicas. Os modelos constitutivos, os quais são resolvidos através de simulações numéricas empregando-se métodos aproximados, tais como o Método dos Elementos Finitos, das Diferenças Finitas ou Volumes Finitos, entre outras soluções numéricas.

Os modelos constitutivos são formulados por um conjunto de equações diferenciais parciais, que envolvem leis constitutivas (relação de tensão e deformação reversível e irreversível) e estão associados aos parâmetros do solo. Devido à consideração das propriedades físico-mecânicas e o comportamento elastoplástico, tornam-se admissíveis os modelos constitutivos numéricos para análise de compactação do solo.

O modelo elastoplástico Cam-Clay Modificado é o resultado de investigações laboratoriais de Mecânica de solos da Universidade de Cambridge (Roscoe & Burland, 1968), para analisar a relação tensão-deformação do material drenado, baseado na Teoria de Elastoplasticidade (pela Lei de Hooke e pelos parâmetros de Lamé: módulo de compressibilidade λ e módulo de cisalhamento μ). Através da mecânica dos estados críticos, estuda-se o comportamento da deformação irreversível pelo endurecimento ou amolecimento em termos da tensão efetiva.

Esse modelo necessita de propriedades do solo como a porosidade, índice de vazios, densidade de partículas, ângulo de atrito, coeficiente de Poisson, índice de compressibilidade e tensão de pré-consolidação. Assim, o conjunto de equações diferenciais do modelo Cam-Clay Modificado tem solução através de Método dos Elementos Finitos (MEF). A solução deste modelo pela discretização da estrutura de estudo em elementos infinitesimais, é realizada mediante processos computacionais com aplicação de condições de contorno.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. O MEF discretiza o domínio de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos. Os elementos infinitesimais são conectados entre si por pontos, denominados como “nós” ou pontos nodais e o conjunto destes elementos é conhecido como malha. Com o objetivo de resolver problemas complexos de análise estrutural e obter previsões do comportamento do solo sob cargas externas, cuja geometria do estudo, propriedades físicas e mecânicas do solo e cargas aplicadas são conhecidas.

A solução das equações matemáticas que regem o comportamento físico é de forma aproximada, entretanto, a precisão do MEF depende do número de elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Sendo que, maior número de pontos nodais, seja em elementos finitos não estruturados (triangulares) ou estruturados (quadrados) representam a situação física real do problema.

Objetivos

Objetivo geral

Analisar o comportamento da tensão-deformação do solo em diferentes camadas de um Argissolo durante a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar, através da simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos.

Objetivos específicos

- Analisar o efeito da propagação das tensões verticais no perfil do solo durante à colheita de cana-de-açúcar pelo tráfego do trator, caminhão e reboque;
- Comparar as tensões verticais, tensão de pré-consolidação e porosidade na entrelinha e linha de cultivo;
- Verificar a variação da porosidade do solo na entre linha e linha de cultivo;
- Avaliar a compactação através da tensão de pré-consolidação e deformação do solo durante à colheita de cana-de-açúcar;
- Analisar as condições físicas e mecânicas iniciais do solo na entrelinha: resistência à penetração, tensão de pré-consolidação, porosidade, agregados e matéria orgânica.
- Correlacionar através da metodologia Avaliação Visual da Estrutura do solo com as variáveis mecânicas, resistência à penetração, estabilidade de agregado e matéria orgânica.

Hipóteses

- Máquinas agrícolas com diferentes cargas e configurações de pneus resultam em diferentes estados de tensões.
- A caracterização físico-mecânica das camadas do solo proporciona situações realistas da propagação das tensões no solo.
- Solos com número maior de ciclos de cultivo apresentam maior tensão de pré-consolidação e são menos suscetíveis à deformação plástica, em relação a solos recentemente preparados.
- Há relação entre os parâmetros físicos com os scores de avaliação visual.

Revisão Bibliográfica

Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada em diversas zonas tropicais do mundo, introduzida no Brasil durante a colonização como fonte alimentar, entretanto, em 1975 decretou-se alternativa para uso carburante durante crise do petróleo (Szmrecsányi & Moreira, 1991). A agroindústria canavieira foi impulsionada com o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) para produzir biocombustível com intuito de solucionar à crise energética do Brasil (Silva & Silva, 2012).

Na safra de 1975/76 foi colhida uma área 2,08 milhões de hectares, com produtividade média de 49,43 Mg ha⁻¹ e produção de 102,77 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (BRASIL, 2007), enquanto que na safra 2017/18, foram colhidas 8,72 milhões de hectares, com produtividade média de 72,54 Mg ha⁻¹ e produção 633,26 milhões de toneladas (CONAB, 2018).

Com o impacto tecnológico e científico do século XXI, a cultura tornou-se importante para o desenvolvimento sócio-econômico do país devido à atividade sucroalcooleira. Com essa intensificação, o Brasil passou a liderar a produção mundial, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão, México e Colômbia. Além disso, também é líder na produção de açúcar refinado e etanol (OCDE-FAO, 2015).

A cultura é uma gramínea semi-perene que permite vários cortes sem a necessidade de replantio, com desenvolvimento em vários ciclos. A primeira brotação é conhecida como cana-planta, que consta de 12 ou 18 meses, dependendo da variedade. Após a primeira colheita, ocorre a rebrota que é conhecida como cana-soca e ocorre anualmente para todas as variedades (Olaya et al., 2017; Albert et al., 2018). A média das rebrotas são de 4 a 5 cortes, entretanto, existem casos onde o produtor renova depois de 9 cortes (Silva et al., 2014; Almeida et al., 2016).

Com a intensificação de 102,77 para 633,26 milhões de toneladas de cana-de-açúcar de 1975 para 2018 (BRASIL, 2007; CONAB, 2018) houve também um acréscimo no uso de máquinas agrícolas, envolvendo operações mecanizadas que demandam níveis elevados de energia mecânica, principalmente durante a colheita (Bangita & Rao, 2012; Albert et al., 2018).

A colheita no Nordeste do Brasil geralmente é realizada com corte manual e com transporte mecanizado, com o uso de diferentes veículos de cargas para o traslado da cana-de-açúcar do campo para as usinas, principalmente com uso de caminhões e reboques (Lozano et al., 2013). O tipo de colheita pode influenciar na produção, longevidade da cultura e nos atributos físico-mecânico do solo. Com o uso de máquinas

agrícolas, diversos pesquisadores demonstraram o decréscimo na produtividade (Albert et al., 2018; Barbosa et al., 2018). Com isso, um dos grandes desafios tem sido manter a produtividade.

Propriedades físicas

A formação dos agregados do solo é realizada pelos fatores biológicos, os quais são considerados indicadores da qualidade do solo, pela contribuição na infiltração de água, estabilidade do solo, diminuição da erosão e aumento de matéria orgânica disponível, além das raízes beneficiar o desenvolvimento radicular (ROSSI et al. 2016; Almeida et al., 2016; Ortiz et al., 2017; Soriani et al., 2018).

No sistema de colheita sem queima, as folhas são utilizadas como cobertura de resíduo vegetal (palha), com o objetivo de reduzir a erosão e aumentar o teor de matéria orgânica no solo. No estudo de Marinho et al. (2017) a maior parte do carbono foi concentrado nos primeiros 0,30 m. A deposição da palha de cana-de-açúcar sobre a superfície, melhorou a qualidade do solo (Almeida et al., 2016), onde, a manutenção da palhada sobre o solo ao longo do tempo, aumenta o teor de matéria orgânica, especialmente para maior número de ciclo de cana-de-açúcar. Além disso, a deposição de palhada na superfície mantém cúmulos de carbono e nitrogênio do solo se assemelhando às áreas de vegetação nativa.

A matéria orgânica (MO) pode influenciar na estabilidade de agregados, sendo este último, indicador da qualidade do solo (Ortiz et al., 2017; Soriani et al., 2018), já que, a menor compactação e maior concentração de MO contribuem para uma melhor infiltração de água, maior estabilidade, menor erosão e permitem o melhor desenvolvimento do sistema radicular (Almeida et al., 2016).

Para obtenção de produtividade elevada de cana-de-açúcar é necessário acondicionar o solo para o desenvolvimento radicular, aplicação de lâminas de irrigação, assim como aplicação de nutrientes (Silva et al., 2014; Vischi Filho et al., 2015; Albert et al., 2018). No caso das condições mecânicas do solo, é necessário projetar o uso de equipamentos e veículos agrícolas em condições de umidades que evitam altas alterações nas propriedades físicas do solo, assim, proporcionar um ambiente favorável para produção das culturas, mantendo sua qualidade estrutural (Sampietro et al., 2015).

Alterações na estrutura dos agregados deve-se ao uso de máquinas agrícolas, uma vez que submetidas a tensões externas, há um rearranjo das partículas do solo. Em subsequência a formação de torrões, com estrutura extremamente compactada que

limita o desenvolvimento das raízes, dificulta a infiltração de água e contribui para processos erosivos (Keller & Hakanssona, 2010; Sampietro et al., 2015). A presença dos torrões é característica de formação de camadas compactadas, geralmente encontradas na profundidade de preparo do solo (Ortigara et al., 2014).

O uso intensivo de veículos de carga, principalmente durante a colheita impacta negativamente na estrutura do solo, afetando o diâmetro dos agregados (Rossi et al. 2016). Silva et al. (2014) e Barbosa et al. (2018) demonstraram o decréscimo da produtividade devido à estruturação dos agregados e aumento da compactação. Ainda de acordo com os autores, a mecanização em condições de umidade ótima a compactação, deve ser evitado, pois influi negativamente à qualidade do solo.

A mecanização contribui para alterações nos atributos físicos e na qualidade estrutural do solo, alterando sua estrutura, resistência à penetração, porosidade, densidade, profundidade de enraizamento, capacidade de retenção de água, percolação, pH, carbono orgânico, e nutrientes disponíveis para as plantas, uma vez que diminui a porosidade do solo (Silva et al., 2014; Rossi et al. 2016; Amaral et al., 2017; Lima et al., 2018).

A formação de camadas compactadas no solo consta de incremento da densidade, redução dos macroporos e diminuição de retenção de umidade, isto limita a permeabilidade, portanto, o rendimento da cana-de-açúcar diminui (Souza et al., 2012; Bangita & Rao, 2012; Amaral et al., 2017; Albert et al., 2018). O impacto dos sistemas de preparo e manejo dos solos tem sido avaliado por meio de medidas de propriedades físicas, como a densidade, a porosidade, a distribuição dos agregados e a resistência do solo à penetração (Cherubin et al., 2017).

Compactação

As operações como a colheita de cana-de-açúcar, demandam níveis elevados de energia mecânica, onde, as tensões são transmitidas através do contato pneu-solo (Lozano et al., 2013). A compactação do solo agrícola é caracterizada pela redução de volume devido à expulsão do ar (Vischi Filho et al., 2015; Albert et al., 2018), em consequência, há limitação no crescimento radicular e alterações no funcionamento bioquímico da planta, restringindo, entre outros fatores, o crescimento da parte aérea e a produção da cultura (Souza et al., 2012).

A planejamento de atividades mecanizada através da energia total aplicada no solo e o tráfego dos veículos na entrelinha do plantio, reduz o risco de compactação na linha de plantio (Keller et al., 2007; Lozano et al. 2013). Entretanto, a mecanização não

controlada, resulta na compactação e ocasiona falhas no rebrote da soca, sendo um dos principais problemas enfrentados pela agricultura moderna (Albert et al., 2018).

Tensões elevadas transmitidas pelos rodados das máquinas, assim como alta pressão de insuflagem dos pneus, menor área do contato dos rodados e o número de passagem influenciam na compactação (Keller & Arvidsson, 2004). Botta et al. (2018) estudaram o efeito de tensões aplicadas no solo durante à colheita mecanizada utilizando uma colhedora de 20 toneladas com insuflagem dos pneus de 240 kPa, cuja compactação atingiu até 0,6 m de profundidade.

A formação das camadas compactadas também é influenciada pelo conteúdo de carbono orgânico, umidade e textura do solo (Keller & Arvidsson, 2004; Hamza et al., 2011; Keller & Hakanssona, 2010). A susceptibilidade do solo com alta umidade e menor conteúdo de matéria orgânica no solo, aumenta o risco da compactação (Amaral et al., 2017; Keller & Hakanssona, 2010).

O solo é mais susceptível sob condições úmidas do que sob condições seca, onde, a umidade ótima é determinada através do ensaio de Proctor, pela relação existente entre a densidade, umidade e a energia de compactação (Klein et al., 2014), portanto, não se recomenda tráfegar a umidades próximo da umidade para evitar a intensificação desse processo.

O deslocamento de veículos agrícolas sobre o solo aplica tensões mecânicas diretamente abaixo do pneu (Silva et al., 2018), cuja propagação no solo e no subsolo dependem de características dos pneus, tais como carga da roda, pressão de inflação e área de contato (Keller, 2005), assim como, das condições de solo. Uma vez que, o tamanho, largura e pressão de insuflagem dos pneus, resultam em significativas alterações nas propriedades físicas do solo, principalmente na porosidade (Keller et al., 2004).

A largura do pneu não realiza contato total com o solo à pressão alta de insuflagem, e as tensões se concentram no centro do contato (Keller, 2005). As tensões transmitidas pelo rodado com maior largura são constantes, o que, favorece a redução de compactação do subsolo. Entretanto, as tensões para os rodados com menor largura são distribuídas devido à alta pressão de insuflagem e área de contato reduzida, portanto, favorecendo a compactação no subsolo (Naderi-boldaji et al., 2018).

O aumento progressivo das cargas pelo peso das máquinas e equipamentos, assim como o peso da colheita, combinado com a velocidade de avance, pressão de insuflagem e a área do contato dos pneus são os principais fatores que influenciam diretamente à compactação do solo, uma vez que quanto menor contato do rodado com

o solo maior propagação no perfil de solo (Keller et al., 2007). À colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar envolve operações que demandam veículos de cargas, ou seja, caminhões e reboques. Os quais propiciam níveis elevados de energia mecânica, oferecendo 10-20 toneladas por eixo e afetam no subsolo (Lozano et al., 2013; Vischi Filho et al., 2015).

A compactação superficial tem sido estudada através de diversas propriedades físicas e mecânicas, modelos matemáticos (analíticos e constitutivos) com a finalidade de análise de propagação de tensões oferecidos pelos veículos para evitar o acréscimo da compactação através de simulações numéricas (Gonçalves et al., 2017; Silva et al., 2018), através desta ferramenta pode ser possível prever respostas do solo sob tráfego, assim planejar a colheita semi-mecanizada ou mecanizada.

Avaliação visual da estrutura do solo (VESS)

Diversos parâmetros físicos e mecânicos têm sido utilizados para analisar a compactação do solo, entre estes, encontram-se a tensão de pré-consolidação, porosidade, densidade e resistência à penetração do solo (Sampietro et al., 2015; Gonçalves et al., 2017; Silva et al., 2018; Naderi-Boldaji et al., 2018), assim como, a avaliação visual da estrutura do solo, os quais tem sido correlacionado (Guimarães et al., 2013; Johannes et al., 2017). Dentre os métodos de avaliação encontram-se a Avaliação Visual de Estrutura do Solo - VESS (Ball et al., 2007; Guimarães et al., 2011) e análise do subsolo - SubVESS (Ball et al., 2015).

O método é caracterizado pela fragmentação manual dos agregados e torrões, complementados por ilustrações, com vantagens para atribuição confiável de uma pontuação de classificação da qualidade com base em critérios de diagnósticos visuais e tácteis. Estudos de Cherubin et al. (2017), Johannes et al. (2017) e Guimarães et al. (2017) evidenciaram que os métodos de avaliação visual do solo são ferramentas eficientes para monitorar os impactos estruturais do solo decorrentes das mudanças na estrutura e recomendam que esta avaliação seja incorporada em protocolos de monitoramento para avaliar não apenas as áreas canavieiras, mas também a qualidade do solo no Brasil.

Os métodos VESS e SubVESS consistem da amostragem pelo uso de uma pá reta e, na sequência as amostras são colocadas cautelosamente nos recipientes previamente numerados e manipulando suavemente com a mão para separar os agregados. Estes métodos baseiam-se numa tabela de classificação ilustrada de estrutura do solo superficial e subsolo, para atribuir o número de pontuação a partir de comparação com

fotografias de referência que variam de boa estrutura (1) para pobre estrutura (5). A pontuação é feita com a ajuda de um gráfico contendo ilustrações e descrições de forma e tamanho de agregados, dificuldade de quebra, porosidade visível e presença de raízes (Ball et al., 2007; Ball et al., 2015).

A Organização Internacional de Pesquisa do Solo (ISTRO) sugere estudos combinados de avaliação visual com outros parâmetros: umidade, textura, carbono orgânico e resistência à penetração do solo. Estes parâmetros são pertinentes para identificar a heterogeneidade da estrutura num perfil de solo (Johannes et al., 2017), por tanto, pode ser utilizado para apoiar na decisão de estratificação das camadas nas pesquisas científicas e para decisão de práticas de lavoura.

A estratificação refere-se à identificação de camadas com baixa variabilidade, principal característica das pesquisas científicas, pois, é necessário um método de amostragem com caráter de representatividade. Estudos de análises físicas do solo geralmente têm utilizado profundidades a cada 0,1 ou 0,2 m (Tavares, 2016; Amaral et al., 2017; Marinho et al., 2017). Porém, as técnicas de avaliação visual VESS e SubVESS em conjunto com a resistência à penetração (RP), podem ser utilizados para constatação da estratificação, pois, se pretende minimizar a variabilidade.

Compressibilidade

A compressibilidade é caracterizada pela deformação do solo quando submetida a tensões externas, esta suscetibilidade é obtida pela relação entre o logaritmo da tensão efetiva através do ensaio edométrico e a variação de índice de vazios. Desta relação determina-se o parâmetro mecânico, a tensão de pré-consolidação, utilizado para análise de compactação do solo (Keller & Arvidsson, 2007; Silva et al., 2018).

A estimativa da compressibilidade sob diferentes condições de umidade e sob diversos sistemas de manejo, é de grande importância para minimizar os riscos, assim como para o controle do acréscimo da compactação provocada pelas tensões oferecidas dos tratores, colhedoras e veículos de carga (Keller & Arvidsson, 2007; Souza et al., 2012; Silva et al., 2018).

Mediante as deformações volumétricas e tensões aplicadas é obtida a curva de compressão, podendo ser simulado a carga, descarga e recarga, como se mostra na Figura 1. Os métodos de Casagrande (1936), Pacheco (1970) e Dias Junior (1994) são aplicados para obtenção da tensão de pré-consolidação, índice de compressão (C_c) e os parâmetros (κ) e (λ).

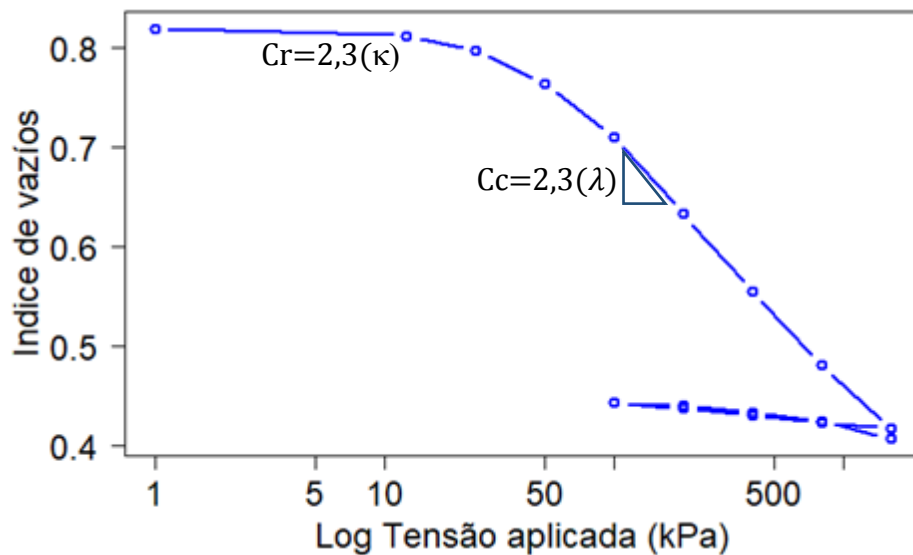


Figura 1. Curva de compressão do solo, índice de compressão e recompressão.

À altas umidades e maior porosidade há menor tensão de pré-consolidação (Oliveira et al., 2011), portanto, não se recomenda trafegar sob condições de umidade e porosidade elevadas, porém, o uso de maquinário de carga pesada não deve ser trafegado em uma área recém preparada, já que, influenciam diretamente na propagação das tensões, compactando até profundidades maiores que 0,40 m (Silva et al., 2018).

Vischi Filho et al. (2015) estudaram o sistema de manejo na profundidade de 0,30 m com um e três ciclos de cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, no qual, o terceiro ciclo apresentou maior tensão de pré-consolidação na linha e entrelinha de plantio, na camada superficial, o que indica o efeito dos ciclos de cultivo na compactação do solo. A produtividade das áreas agrícolas intensivas tem sido afetada pela compactação, portanto, há necessidade de se empregar alternativas para evitar a intensificação desta problemática mediante o controle do tráfego e intensidade de carga, o uso de baixa pressão de insuflagem dos pneus (Keller & Hakanssona, 2010).

Cisalhamento

O cisalhamento é caracterizado pelo deslocamento das partículas devido às forças externas, no entanto, chama-se de resistência ao cisalhamento à propriedade que os solos possuem para resistir à deformação cisalhante, onde, parâmetros como ângulo de atrito interno e coesão influenciam e alteram diretamente a resistência (José et al., 2015).

A resistência ao cisalhamento depende do índice de vazios, grau de compactação e textura. O ângulo de atrito (ϕ) é um fator primordial para explicar a interação da máquina com o solo, principalmente na patinagem, pois, a ruptura dos solos comumente

ocorre quando o nível de carregamento ultrapassa a sua resistência ao cisalhamento (Ruvel et al., 2016).

Através do ensaio de cisalhamento obtém-se as deformações cisalhantes do solo quando submetidas a tensões externas, sendo utilizadas geralmente várias amostras com diferentes cargas para determinar os parâmetros de cisalhamento (Figura 2). As deformações horizontais obtidas pelo ensaio de cisalhamento utilizam-se para calcular a tensão tangencial e para obtenção da envoltória de resistência ao cisalhamento pela equação de Coulomb $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$, permitindo encontrar os valores dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno do solo (Coulomb, 1776).

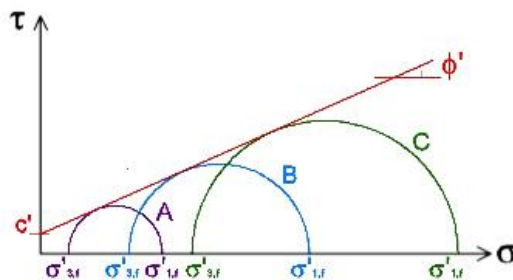


Figura 2. Determinação do ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) pelo ensaio de cisalhamento.

De acordo com Tavares (2016), a resistência ao cisalhamento de um Argissolo Amarelo saturado submetidas a tensões normais de 3, 4, 5 e 6 kPa teve relação positiva entre a coesão (c) e argila. Silva et al. (2018) obtiveram que em porosidade elevada, o solo é mais susceptível tanto à deformação cisalhante, assim como, a deformação volumétrica.

Tensão-deformação do solo

As tensões transmitidas pelo maquinário se propagam no solo e no subsolo em função das suas propriedades, características dos pneus e das cargas aplicadas (Silva et al., 2018). O conhecimento das tensões atuantes é de vital importância no entendimento do comportamento mecânico (Alonso & Gens, 1990; Souza et al., 2012), pois há uma necessidade de conhecer o comportamento de tensões num perfil para evitar a intensificação da compactação durante a colheita de cana-de-açúcar.

Em qualquer ponto no interior do perfil de solo está sujeito a tensões devido ao seu peso próprio e a cargas externas, principalmente tensões aplicadas pelos rodados durante o tráfego de veículos agrícolas. As interações mecânicas entre o solo e as cargas

externa são regidas pelas leis da física e podem ser representadas matematicamente por um sistema algébrico de equações diferenciais (Alonso & Gens, 1990; Potts & Zdravković, 1999; Gomes, 2009; Souza et al., 2012).

Para análise da propagação de tensões no solo deve-se aplicar um conjunto de condições estáticas, cinemáticas e físicas. As condições estáticas estão relacionadas ao equilíbrio de tensões. Enquanto as condições cinemáticas estão relacionadas ao estado de deformação, e, as condições físicas à relação tensão-deformação (Potts & Gens, 1985; Alonso & Gens, 1990). A análise de tensões no solo é estudada como um volume de controle diferencial infinitesimal (Figura 3), considerando condições de contorno do problema e tensões iniciais.

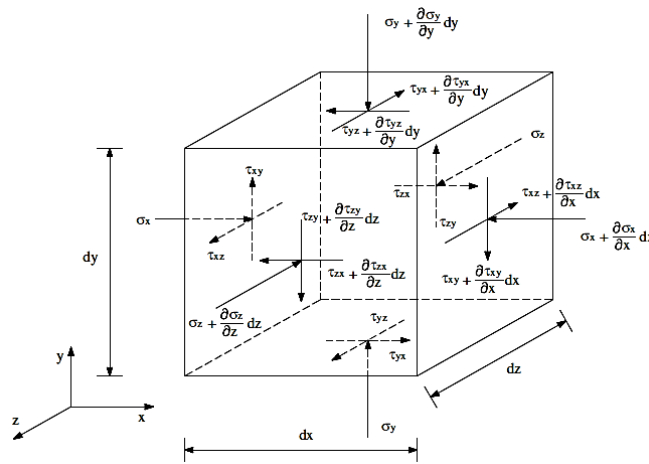


Figura 3. Tensões atuantes em um volume de controle diferencial.

No elemento infinitesimal envolve tensões principais (σ_x , σ_y , σ_z) e tensões de cisalhamento (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy}). Nota-se que em cada fase do quadrilátero há uma tensão normal e duas cisalhantes, sendo um total de nove componentes, os quais descrevem o completo estado de tensão, conhecido como matriz de estado do tensor de tensões. Para as condições estáticas, o estado de tensões em um ponto é definido pelo tensor de tensões (σ), que é dado pelas invariantes de acordo com Potts & Gens (1985) e Gomes (2009).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sob condições cinemáticas, o estado de deformação em um ponto, será dado pelo tensor de deformação (ϵ).

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde ε_x , ε_y , ε_z são as deformações normais e γ_x , γ_y , γ_z são as deformações cisalhantes, respectivamente. As deformações (ε) estão ligadas aos deslocamentos (γ).

As tensões principais (σ_x , σ_y , σ_z) podem ser combinadas para formar três invariantes, os quais são necessários para determinar a magnitude das tensões pelo critério de ruptura: a tensão média efetiva (p), utilizada para descrever o estado de tensão normal na ausência de tensão cisalhante; a tensão desviadora (q) é a responsável pelo cisalhamento do solo e o ângulo de Lode (θ), é a invariante desviatória que ajuda a quantificar as regiões de rupturas pelas tensões principais (Potts & Gens, 1985; Potts & Zdravković, 1999).

$$p = \frac{1}{3}I_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right)} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \right] \quad (5)$$

O solo é um material complexo, apresenta características heterogêneas e drenabilidade, com deformações reversíveis (elásticas) e não reversíveis (plásticas) quando submetidas a tensões externas, cujas deformações geralmente não apresentam linearidade. O comportamento elástico assume que o material volta a seu estado original quando removida a carga aplicada e é fundamentada pela Lei de Hooke (Boussinesq, 1885).

A resposta plástica do solo resulta quando a estrutura da matriz sólida tem um rearranjo dos grãos ou até mesmo a falha do meio e esmagamento das partículas (Gomes, 2009), em função do módulo de compressibilidade λ e módulo de cisalhamento μ (Tresca, 1868). O solo sofre deformações recuperáveis seguidas das deformações permanentes, delimitadas pela função de fluência (Figura 4).

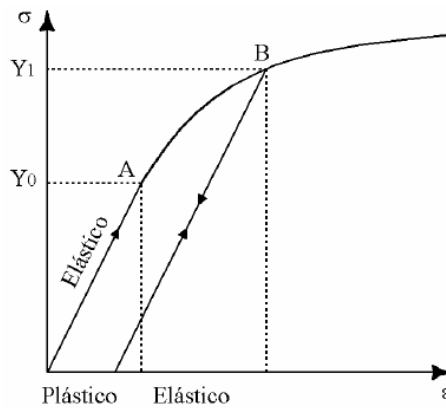


Figura 4. Comportamento elástico (A) e comportamento plástico do solo elastoplástico (B).

No ponto A (Figura 4), a deformação do solo é reversível, uma vez ultrapassada o limite de escoamento (Y_0) até o ponto B, o solo terá deformações irreversíveis (Potts & Gens, 1985), onde, Y_1 será o novo limite de fluência para futuros carregamentos.

A delimitação das deformações elásticas e plásticas do solo é conhecido como superfície de plastificação ou superfície de escoamento (Figura 5), representada na função de fluência (Tresca, 1868; Drucker & Prager, 1952; Roscoe et al., 1958; Potts & Zdravković, 1999).

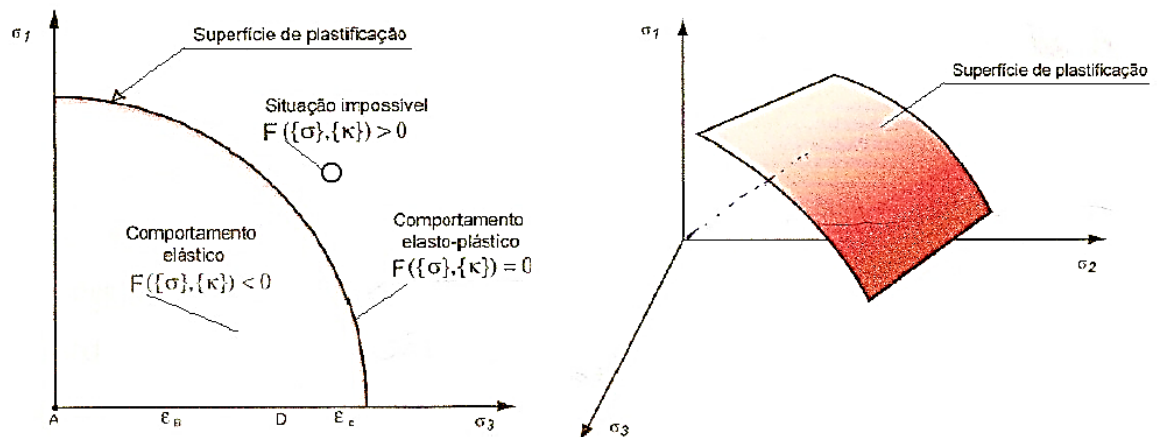


Figura 5. Superfície de plastificação bidimensional e tridimensional em diversas trajetórias de tensões normais.

Estudo de compactação através da modelagem matemática

A deformação resultante do tráfego agrícola tem sido calculada através de modelos analíticos (Söhne, 1958; Keller et al., 2004) e modelos constitutivos com solução numérica (Trescas, 1868; Roscoe & Burland, 1968). A modelagem analítica é

baseada em equações de equilíbrio, propostas para descrever os acréscimos de tensões verticais no solo devido a uma carga pontual na superfície. Esta foi desenvolvida por Boussinesq (1885) e modificada por vários pesquisadores para estudos de compactação das áreas agrícolas, por meio da consideração de parâmetros dos pneus (Söhne, 1953; Van Den Akker & Van Wijk, 1987; Keller & Arvidsson, 2004).

Os modelos pseudo-analíticos, resultantes das modificações do modelo de Boussinesq descrevem a distribuição de tensão a partir dos parâmetros da pressão de insuflagem recomendada, carga por roda, pressão de insuflagem atual dos pneus, largura e diâmetro dos rodados. Os quais são oferecidos pelos catálogos dos fabricantes de máquinas e pneus, enquanto a pressão de insuflagem do pneu pode ser medida durante o experimento (Keller & Arvidsson, 2004; Keller, 2005).

Os modelos constitutivos estudam a relação tensão-deformação com critérios de deformação elastoplástica e consideram as propriedades físicas e mecânicas do solo (Roscoe & Burland, 1968; Drucker & Prager, 1952), com solução mediante o Método dos Elementos Finitos. A simulação numérica empregando modelos matemáticos aplicados ao estudo da relação tensão-deformação, mostra-se como uma ferramenta importante para previsão do comportamento do solo a determinada tensão oferecida pelos veículos agrícolas.

Os modelos constitutivos mais comumente usados para análise da relação tensão-deformação de solos com comportamento elastoplástico são Mohr-Coulomb (1776); Drucker Prager (1952); Cam-Clay Modificado (Roscoe & Burland, 1968); e o modelo de Lade (1977). O modelo Mohr-Coulomb é baseado no critério de falha linear de Mohr-Coulomb e tem sido empregado para análise de solos e rochas, no entanto, na interação solo-implemento tem sido pouco usado. Este critério de falha é definido em função da tensão tangencial e tensão normal (Coulomb, 1776), cuja plastificação pode ser com endurecimento ou amolecimento.

Herrera et al. (2008) simularam a resposta mecânica de um Latossolo através de Método dos Elementos na interação solo-implemento durante o preparo do solo, obtendo como resultado a dificuldade do modelo para prever com precisão a relação tensão-deformação quando o solo está seco, já que nenhum dos invariantes do modelo (p-q) poderiam se reproduzir com deformação pelo amolecimento depois da falha ou tensão de ruptura.

O modelo Drucker-Prager foi introduzido para representar a deformação plástica (Drucker & Prager 1952). O critério de plastificação dependente da tensão aplicada e é uma versão ajustada do modelo de Mohr-Coulomb, por isso, pode ser expresso em

função da coesão e ângulo de atrito. Formulado para estudos de rochas, concreto, polímero e outros materiais.

Devido à modificação na função de fluência do modelo Mohr-Coulomb, Drucker Prager (1952) tem capacidade de prever deformação por amolecimento ou endurecimento, precisando apenas de seis parâmetros como dados de entrada para ser simulado, os quais podem ser determinados mediante ensaios convencionais. Utilizado em projetos agrícolas pela interação solo-implemento e solo-pneu por Herrera et al. (2008) e González (2011), embora, nestes estudos, os resultados com menor erro relativo foram quando o solo teve maior umidade.

O modelo Cam Clay foi desenvolvido por Roscoe et al. (1958) para solos normalmente consolidados e, posteriormente modificado por Roscoe & Burland (1968) para explicar a deformação elastoplástica. O modelo Cam-Clay Modificado tem como objetivo identificar quando a tensão passou a superfície de fluência para definir o estado de compactação do solo (Chi et al., 1993). Este modelo tem sido utilizado nos estudos agrícolas, principalmente pela análise da compactação do solo provocada pelo pneu (Berli et al. 2004; Silva et al., 2018), além disso, para análise da interação solo-implemento (Plouffe et al., 1999). Destaca-se pela precisão para prever as deformações do solo, adaptando-se para solos coesivos e com fricção.

O modelo Cam-Clay Modificado requer vários dados de entrada, os quais podem ser obtidos mediante ensaios de laboratório. Silva et al. (2018) estudaram a compactação do solo previamente preparado para cultivo e a validação com o ensaio edométrico, onde, seu erro relativo foi menor do que 5%.

O modelo elastoplástico Lade é baseado em solos pouco coesos (Lade, 1977). Com aplicação em materiais granulares pouco coesivo (Zhang et al., 1986), portanto, não apresenta com exatidão o comportamento mecânico de solos coesos (Chi et al., 1993) e precisa de maior número de parâmetros, os quais não são obtidos nos ensaios convencionais.

O impacto da maquinaria agrícola nas propriedades do solo pode ser simulado por meio de modelos numéricos, sendo uma ferramenta importante para a estratégia de manejo do solo, a fim de prevenir ou reduzir o impacto da compactação (Vischi Filho et al., 2015; Silva et al., 2018).

Modelo constitutivo para solo não saturado

Dentro dos modelos de plastificação, encontra-se o modelo Cam-Clay, o qual foi desenvolvido na Universidade de Cambridge (Roscoe et al., 1958). Fundamentado na

teoria da Elastoplasticidade e na teoria do Estado Crítico, formulado para representar o comportamento tensão-deformação dos solos não saturados, a partir de dados experimentais, por meio dos ensaios edométricos e de cisalhamento, submetidos a diferentes tensões (Gomes, 2019).

Para atender o comportamento real do solo tem sido modificado a equação de fluência do modelo Cam-Clay original por diversos pesquisadores (Roscoe & Burland, 1968; Yan & Li, 2011), embora, alguns dos modelos precisam de maior número de parâmetros físicos-mecânicos pois atendem a regra de fluxo e viscosidade do solo. O modelo Cam-Clay Modificado é um dos modelos alterados a partir do modelo original, de acordo com Potts & Gens (1985), para formulação deste modelo foi considerado quatro critérios essenciais: relação elástica, plástica, função de fluência e Lei de Estados Críticos (Endurecimento/Amolecimento).

A plastificação do solo está em função do Estado Crítico em termos da tensão efetiva. Refere-se estado crítico à deformação plástica com *Hardening* (características das areias fofas e argilas moles) e *Softening* (pelas rochas, areias densas e argilas), o que significa que no incremento da tensão, o solo tende a endurecer ou amolecer (Coulomb, 1776).

O modelo constitutivo Cam-Clay Modificado (Roscoe & Burland, 1968) é aplicado para solos onde a superfície de fluência depende da tensão média e da tensão desviadora. A deformação volumétrica plástica ε^p está regida pela Lei de endurecimento/amolecimento e é controlada mediante tensão de pré-consolidação (Potts & Zdravković, 1999).

Dentre dos elementos básicos dos modelos elastoplásticos, encontram-se a superfície de escoamento, propriedades elásticas, superfície potencial plástica e lei de endurecimento. Na Figura 6, apresenta-se o comportamento do modelo elastoplástico, onde, AB pertence às deformações elásticas, ou seja, não apresenta mudança do arranjo estrutural (reversível), entretanto, para BC, o comportamento é elastoplástico, uma vez, há movimento relativo das partículas ou mudança do arranjo da estrutura (irreversível).

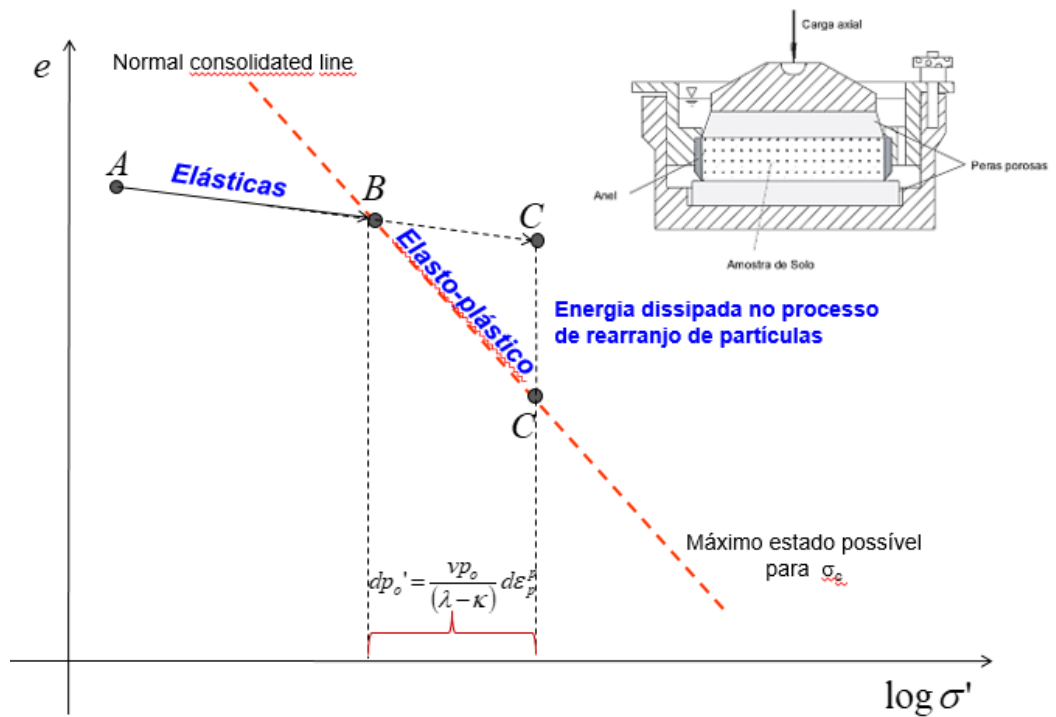


Figura 6. Deformação elastoplástica do solo e linha de tensão de pré-consolidação.

A tensão de pré-consolidação depende do índice de vazio inicial e a ocorrência de deformações plásticas, onde, o aumento do limite admissível está relacionada com o aumento da tensão de pré-consolidação (Alonso & Gens, 1990). Sendo que, a variação do volume está em função dos dois parâmetros de compressibilidade, λ e κ . Por meio do ângulo de atrito é conhecido a inclinação da linha de estados críticos (M) e juntamente com o parâmetro de história (κ) se determina o coeficiente de Poisson (ν).

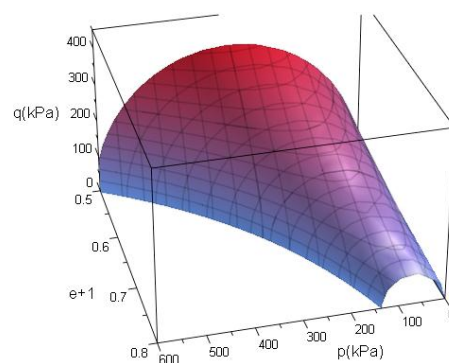


Figura 7. Superfície de escoamento tridimensional do Cam-Clay Modificado.

O modelo Cam-Clay Modificado (Figura 7) unificou o comportamento mecânico em termos de deformações volumétricas e cisalhamento a partir dos parâmetros físico-mecânico do solo (Potts & Zdravkovic, 1999; Liu & Carter, 2002). Os quais são: índice

de vazio (e), inclinação da LEC (M), parâmetros de compressibilidade (λ e κ), coeficiente de Poisson (ν), densidade de partícula e porosidade.

A superfície de escoamento deste modelo mostra-se, Figura 7, em função das tensões normais, cisalhantes e índice de vazios. A deformação está dada pelo material, carregamento. O tamanho da superfície de plastificação, cuja projeção em 2D, Figura 8, depende da tensão de plastificação isotrópica e da linha de estado crítico, e desta forma, da resistência.

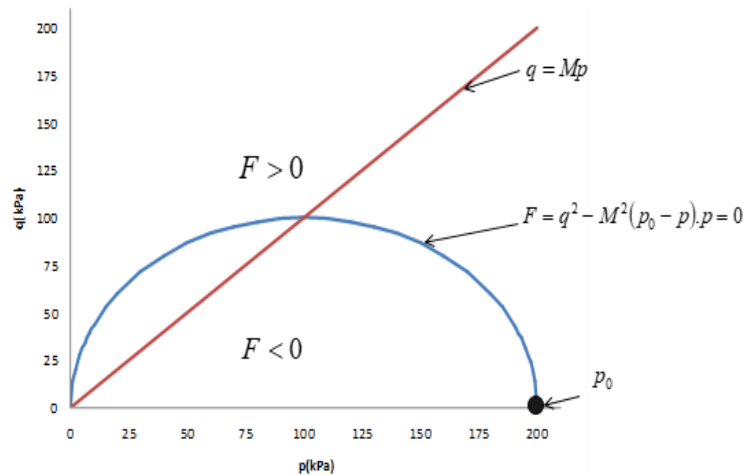


Figura 8. Função de fluência e linha de estados críticos.

A superfície de escoamento, Cam-Clay Modificado, está dada pela função de fluência ou pela relação tensão-deformação:

$$f = q^2 - M^2(p_0 - p)p$$

Onde, f : função de fluência; q : tensão cisalhante; p : tensão normal; M : inclinação da linha de estados críticos.

A validação do modelo é realizada com a curva do ensaio edométrico (Silva et al., 2018). Refere-se validação à comparação entre as curvas de compressão obtidos do ensaio edométrico e do modelo numérico (Gomes, 2009). Esta conferição permite avaliar a representatividade do modelo através do erro relativo, cuja característica é elementar na simulação numérica. Os erros relativos entre o modelo e o ensaio de compressibilidade são relativamente baixos e necessita de parâmetros obtidos através de ensaios convencionais de laboratório para sua solução (Potts & Zdravkovic, 1999; Gomes, 2009; Yan & Li, 2011; Silva et al., 2018).

Método dos elementos finitos (MEF)

Os modelos constitutivos elastoplásticos são implementados nos softwares de Métodos dos Elementos Finitos, utilizados para solução de problemas de engenharia pelas diferenças finitas (Raper & Erbach, 1990). Este método discretiza um corpo em múltiplos elementos infinitesimais triangulares, tetraédricos, quadriláteros ou hexaedros (Potyondy, 1995).

Cada um dos sub-elementos da discretização apresentam sua própria equação constitutiva, para solução dessas equações é necessário o uso de ferramentas computacionais devido ao número de algoritmos e o conjunto destes elementos são conhecido como malhas (Raper & Erbach, 1990; Potyondy, 1995; Naderi-Boldaji et al., 2018), formulados pelas equações de equilíbrio, condições de contorno e leis constitutivas.

A solução mediante o Método dos Elementos Finitos requer de Softwares numéricos devido à solução dos conjuntos de equações diferenciais pela análise incremental-iterativa (Método de Newton-Raphson ou Método de Gauss – Jacobi), assim como para o pré-processamento e pós-processamento da simulação e visualização em 2D ou 3D da propagação das tensões (Raper & Erbach, 1990; Gomes, 2009; Cueto et al., 2016; Silva et al., 2018).

A simulação numérica requer o desenho da área ou volume do perfil de solo; aplicação de condições de contorno; geração de malhas (elementos infinitesimais); programação do modelo constitutivo de plastificação com o detalhamento das condições mecânicas e física dos materiais e para pós-processamento da simulação numérica (Raper & Erbach, 1990; Gomes, 2009; Cueto et al., 2016).

Referências Bibliográficas

- Albert, R. P.; Pinto, M. A. B.; Lima, C. L. R.; Santos, F. J.; Scheunemann, T.; Miguel, P. Physico-mechanical attributes of a Typic Hapludox in areas with different sugarcane cultivation times. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, p.1-8, 2018.
- Almeida, L. S.; Ferreira, V. A. S.; Fernandes, L. A.; Frazão, L. A.; Oliveira, A. L. G.; Sampaio, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1539-1547, 2016.
- Alonso E. E.; Gens A.; Josa A. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, v.40, p.405-430, 1990.
- Amaral, K. F. S.; Rosa, H. A.; Giese, V.; Montiel, C. B.; Brondani, S. T.; Secco, D. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Argiloso após compactação induzida

- mecanicamente. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v.11, p.308-316, 2017.
- Ball, B. C.; Batey, T.; Munkholm, L. J. Field assessment of soil structural quality - A development of the Peerkamp test. *Soil use and Management*, v.23, p.329-337, 2007.
- Ball, B. C.; Batey, T.; Munkholm, L. J.; Guimarães, R. M. L.; Boizard, H.; McKenzie, D. C.; Hargreaves, P. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. *Soil and Tillage Research*, v.148, p.85-96, 2015.
- Bangita, B.; Rao, B. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, v.189, p.351-356, 2012.
- Barbosa, L. C.; Souza, Z. M.; Franco, H. C. J.; Otto, R.; Rossi Neto, J., Garside, A. L., Carvalho, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, v.13, p.15-25, 2018.
- Berli, M.; Kulli, B.; Attinger, W.; Keller, M.; Leuenberger, J.; Flüher, H.; Schulin, R. Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil and Tillage Research*, v.75, p.37-52, 2004.
- Botta, G. F.; Tolón-Becerra, A.; Bienvenido, F.; Rivero, E. R. D.; Laureda, A. D.; Contessotto, E. E; Fonterosa, R. A.; Agnes, D. W. Traffic of harvester combines: effect on maize yields (*Zea Mays L.*) and soil compaction under direct sowing system. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, v.50, p.85-100, 2018.
- Boussinesq, J. Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris: Gauthier-Villars, 1885.
- BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Balanço nacional de cana-de-açúcar. Secretaria de Produção e Agroenergia, p.3, 2007. <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-balanco-nacional-da-cana-de-acucar-e-agroenergia-2007/balanco-nacional-da-cana-de-acucar-e-agroenergia-2007.pdf>> Acessado em 13/01/2019.
- Casagrande, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, MA Harvard University, p.60-64. 1936.
- Cherubin, M. R.; Franco, A. L.; Guimarães, R. M.; Tormena, C. A.; Cerri, C. E.; Karlen, D. L.; Cerri, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil and Tillage Research*, v.173, p.64-74, 2017.

- Chi, L.; Kushawaha R.; Shen, J. An elasto-plastic constitutive model for agricultural cohesive soil. *Canadian Agricultural Engineering*, v.35, p.245-251, 1993.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Safra 2017/18. Cana de açúcar. Primeiro levantamento, Brasília. v.5, p.1-62, 2018.
- Coulomb, C. A. Remarque sur la rupture des corps. *Academic*, v.7, 1776.
- Cueto, O. G.; Coronel, C. E. I.; Bravo, E. L.; Morfa, C. A. R.; Suárez, M. H. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *Journal of Terramechanics*, v.63, p.61-67, 2016.
- Dias Junior, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. Tese de Doutorado - Michigan State University, 1994.
- Drucker, D. C.; Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, v.10, p.157-165, 1952.
- Gomes, I. F. Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, 2009.
- Gonçalves, S. B.; Lopes, E. S.; Fiedler, N. C.; Cavalieri-Polizeli, K. M. V.; Stahl, J. Soil resistance to penetration in depths of different subsoiling. *Nativa*, v.5, p.224-229, 2017.
- González-Cueto, O. Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio. Tese Doctoral en Ingeniería Agrícola - Universidad Central "Marta Abreu", Las Villas, 2011.
- Guimarães, R. M. L.; Ball, B. C.; Tormena, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, v.27, p.395-403, 2011.
- Guimarães, R. M.; Keller, T.; Munkholm, L. J.; Lamandé, M. Visual soil evaluation and soil compaction research. *Soil and Tillage Research*, v.173, p.1-3, 2017.
- Hamza, M.A.; Al-Adawi, S.S.; Al-Hinai, K.A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v.49, p.135-142, 2011.
- Herrera-Suárez, M.; Iglesias-Coronel, C. E.; Gonzalez-Cueto, O.; López-Bravo, E.; Sánchez-Iznaga, Á. Simulación mediante el método de elementos finitos de la respuesta mecánica de un Oxisol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v.17, p.55-61, 2008.

- Johannes, A.; Weisskopf, P.; Schulin, R.; Boivin, P. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil and Tillage Research*, v.173, p.24-32, 2017.
- José, F. O.; Avelar, A. S.; Lacerda, W. A. Incremento de resistência ao cisalhamento do solo conferido por raízes florestais em Nova Friburgo (RJ). *Geonorte*, v.5, p.160-163, 2015.
- Keller T, Arvidsson J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*, v.79, p.191-205, 2004.
- Keller, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, v.92, p.85-96, 2005.
- Keller, T.; Hakansson, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, v.154, p.398-406, 2010.
- Keller, T.; Défossez, 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 and Tillage Research*, v.93, p.391-411, 2007.
- Klein, V. A.; Madalosso, T.; Baseggio, M. Ensaio de Proctor normal – análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.12, p.199-203, 2014.
- Lade, P. V. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesion less soil with curved yield surfaces. *International Journal of Solids and Structures*, v.13, p.1019-1035, 1977.
- Lima, R. P.; Silva, A. P.; Giarola, N. F.; 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 and Tillage Research*, v.175, p.168-177, 2018.
- Liu, M.; Carter, J. A structured Cam Clay model. *Geotechnical*, v.39, p.1313-1332, 2002.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v.129, p.61-68, 2013.
- Marinho, M. A.; Pereira, M. W.; Vázquez, E. V.; Lado, M.; González, A. P. Depth distribution of soil organic carbon in an Oxisol under different land uses: stratification indices and multifractal analysis. *Geoderma*, v.287, p.126-134, 2017.

- Naderi-Boldaji, M.; Hajian, A.; Ghanbarian, D.; Bahrami, M. Finite element simulation of plate sinkage, confined and semi-confined compression tests: A comparison of the response to yield stress. *Soil and Tillage Research*, v.179, p.63-70, 2018.
- OCDE-FAO. *Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024*. 21ª Ed. Agricultura Brasileira, p.24, 2015.
- Olaya, A. M. S.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C. Comparison of sampling methods to evaluate sugarcane root system. *Revista de Ciências Agrícolas*, v.34, p.7-16, 2017.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibility of an Ultisol submitted to different managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.435-442, 2011.
- Ortigara, C.; Koppe, E.; Bonini da Luz, F.; Kaiser, D. R.; Silva, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, 2014.
- Ortiz, P. F.; Rolim, M. M.; Lima, J. L.; Pedrosa, E. M.; Dantas, M. S.; Tavares, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v.11, p.62-70, 2017.
- Pacheco, F. S. A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. *Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, v.2, p.225-232, 1970.
- Plouffe, C.; Laguë, C.; Tessier, S.; Richard, M. J.; McLaughlin, N. B. Moldboard plow performance in a clay soil: simulations and experiment. *ASAE*, v.42, p.1531-1539, 1999.
- Potts, D. M.; Gens, A. A critical assessment of methods of correcting for dirt from the yield surface in elastoplastic finite element analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods. Geomechanics*, v.9, p.149-159, 1985.
- Potts, D. M.; Zdravković, L. Finite element analysis. *Geotechnical Engineering*, v.34, 1999.
- Potyondy, D. O.; Wawrzynek, P. A.; Ingraffea, A. R. An algorithm to generate quadrilateral or triangular element surface meshes in arbitrary domains with applications to crack propagation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.38, p.2677-2701. 1995.
- Raper, R. L.; Erbach, D. C. Prediction of soil stresses using the finite element method. *ASAE*, v.33, p.725-0730, 1990.
- Roscoe, K. H.; Schofield, A. N.; Wrote, C. P. On the yielding of soils. *Geotechnique*, v.8, p.22-52, 1958.

- Roscoe, K. H; Burland, J. B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Geotechnique*, v.33, p.535-609, 1968.
- Rossi, C. Q.; Pereira, M. G.; Moura, O. V. T.; Almeida, A. P. C. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1677-1685, 2016.
- Ruver, C. A.; Nervis, L. O.; Bugs, C. A. L.; Werner, F. V. Influência da Fração Grosseira na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual. *COBRAMSEG*, 2016.
- Sampietro, J. A.; Lopes, E. S.; Reichert, J. M. Compactação causada pelo tráfego de Feller Buncher e Skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. *Ciência Florestal*, v.25, p.239-248, 2015.
- Silva, T. G. F.; Moura, M. S. B.; Zolnier, S.; Souza, L. S. B. Accumulated dry biomass, partitioning and industrial yield of irrigated sugarcane in the Brazilian Semi-Arid. *Revista Ceres*, v.61, p.686-696, 2014.
- 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. *Soil and Tillage Research*, v.181, p.1-10, 2018.
- Söhne, W. Distribution of pressure in the soil and soil deformation under tractor tires. *Landtech*, v.5, p.49-59, 1953.
- Soriani, R.; Santos, E. D.; Leite, C. A. M.; Barbosa, C. A. C.; Chagas, T. L. K.; Amaral, H. F. Avaliação dos agregados de um Latossolo Vermelho em sistema plantio direto após preparos mecânicos de subsolagem e gradagem. *Revista Terra e Cultura*, v.34, p.103-116, 2018.
- 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.63-612, 2012.
- Szmrecsányi, T.; Moreira, E. P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. *Estudos Avançados*, v.5, p.57-79, 1991.
- Tavares, U. E. Resistência mecânica e atributos físicos de um Argissolo, submetido a diferentes preparos do solo. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2016.
- Tresca, H. Memoire sur l'écoulement des corps solides, par MH Tresca. *Imperiale*, v.18, p.733-799, 1868.
- Van den Akker, J.J.H.; Van Wijk, A.L.M. A model to predict subsoil compaction due to field traffic. *Rotterdam*, p.69-84, 1987.

- Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M. D.; Silva, R. B.; Lima, C. C.; Pereira, D. M. G.; Lima, M. E.; Sousa, A. C. M.; Souza, G. S. Load support capacity of an Oxisol cultivated with sugarcane and mechanization effects on the soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.322-332, 2015.
- Yan, W. M.; Li, X. S. A model for natural soil with bonds. *Geotechnique*, v.61, p.95-106, 2011.
- Zhang, Q.; Puri, V. M.; Manbeck, H. B. Determination of elastoplastic constitutive parameters for wheat en masse. *ASAE*, v.29, p.1739-1746, 1986.

CAPÍTULO II:
ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS A COLHEITA DA CANA-DE-
AÇÚCAR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Análise da compactação do solo após a colheita da cana-de-açúcar pelo método dos elementos finitos

Resumo: Objetivou-se analisar a propagação das tensões em um Argissolo após a colheita de cana-de-açúcar, através do Método dos Elementos Finitos. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina, em uma área de sob cultivo de cana-soca. A simulação numérica das tensões após a colheita semi-mecanizada foi realizada no software CODE_BRIGTH, utilizado o Método dos Elementos Finitos, onde, foram geradas malhas não estruturadas de $9,00 \times 4,00$ m, com estratificação de cinco camadas de 0,20 m ao longo do perfil e aplicação de tensões provocadas após a aplicação dos pneus do trator, caminhão e reboque. Foi utilizado o modelo de plastificação Cam Clay Modificado para análise do comportamento elastoplástico do solo sob tensões do tráfego agrícola, cujos parâmetros foram obtidos dos ensaios realizados na umidade na capacidade de campo (CC). O trator foi o veículo que aplicou as menores tensões verticais na interação pneu-solo ao longo do perfil, seguido pelo caminhão e o reboque nos primeiros 0,20 m de profundidade. A maior tensão de pré-consolidação obtida após a simulação da colheita pelo uso dos veículos foi encontrada para o reboque, principalmente na camada 0,20 m, com efeito na redução da porosidade de 45% para 30%. O reboque teve maior propagação de tensões verticais e acréscimo da tensão de pré-consolidação, indicando a susceptibilidade de compactação ao longo do perfil.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Cam-Clay Modificado, Tensão de pré-consolidação

Analysis of soil compaction after sugarcane harvesting by the finite element method

Abstract: The objective of this study was to analyze the propagation of stresses in an Ultisol after the sugarcane harvest using the Finite Element Method. The study was carried out at the Experimental Sugarcane Station of Carpina, in an area of under sugarcane cultivation. The numerical simulation of the semi-mechanized harvest was performed in the software CODE_BRIGTH to solve the problem equations. The Finite Element Method was used, where 9.00×4.00 m unstructured meshes were generated, with five layers along the soil profile and application of stresses caused by tires contact of a tractor, truck and trailer. The Modified Cam-Clay model was used to analyze the

elastoplastic behavior of the soil under agricultural traffic stress, whose parameters were obtained from the compression tests performed on water content at the field capacity. The tractor was the vehicle that applied the lowest vertical stress due the tyre-soil interaction along the profile, after the truck and the trailer at the first 0.20 m. At the depth of 0.60 m the propagation of the stresses was reduced. The higher pre-consolidation stress obtained after vehicle simulation was found for the trailer traffic, especially at the first layer, with effect on porosity reduction from 45% to 30%. The trailer had a greater propagation of vertical stress and an increase of the pre-consolidation stress, indicating the susceptibility of compaction along the profile.

Keywords: *Saccharum* spp., Modified Cam-Clay, Pre-consolidation tension.

Introdução

As operações agrícolas na produção da cana-de-açúcar, pode ser dividido em três fases: preparo do solo, plantio, tratos culturais e na colheita. Para essas fases são necessárias passagens de tratores e implementos; transporte de fertilizantes, defensivos químicos e mudas e; transporte da colheita. De todas as operações a que demanda maior aporte de massa transportada é a colheita, onde máquinas e veículos de grande porte são utilizadas no corte, carregamento e transporte dos colmos até a unidade de produção (Lozano et al., 2013).

O tráfego de tratores, caminhões e reboques contribuem para alteração na estrutura causando a compactação do solo (Soane et al., 1980; Lozano et al., 2013). Albert et al. (2018) demonstraram que há uma redução da produtividade de cana-de-açúcar quanto maior o número de ciclos de produção, corroborando com a informação, Braunack et al. (2006) verificaram que o tráfego de veículos durante a colheita de cana-de-açúcar na Austrália tem afetado a produção agrícola ano após ano.

O risco de compactação em solo agrícola depende das tensões mecânicas impostas pelo tráfego de veículos (Arvidsson et al., 2011), portanto, conhecer a magnitude e a distribuição dessas tensões torna-se uma ferramenta útil nos estudos de compactação do solo (Schjønning et al., 2008).

Modelos que realizam uma análise tensão-deformação podem ser classificados em pseudo-analíticos (Defosse et al., 2003; Keller et al., 2007; Schjønning & Lamandé, 2010; Keller et al., 2014) e aqueles que empregam soluções via métodos aproximados (Pood t et al. 2003; Mion et al., 2016; Silva et al., 2018), como o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Esses modelos baseados na utilização de métodos aproximados promovem a análise tensão-deformação do solo com a adoção de análises numéricas. O MEF é comumente adotado nos estudos do comportamento mecânico dos solos saturados e não saturados.

Trabalhos como os de Gens & Potts (1988), Sheng & Sloan (2000), Sheng et al. (2003), Vaunat et al. (2000) e Silva et al. (2018) mostram a importância do MEF no estudo de solos, especialmente porque apresentam, em sua maioria, uma resposta mecânica não-linear e tem seu comportamento fortemente dependente de sua história de tensões. Nestes casos, modelos simplistas ou baseados apenas em uma análise elástica linear, podem não serem capazes de avaliar de forma mais realista a resposta tensão-deformação do solo.

Vários estudos agrícolas fundamentam-se no uso do MEF para estudar a compactação do solo (Abu-Hamdeh e Reeder, 2003; Berli et al., 2003; Poodt et al., 2003; Sorin-Stefan & Valentin, 2012; Keller et al., 2014; Cueto et al.; 2016; Mion et al., 2016). Poodt et al. (2003) aplicaram a simulação numérica para um perfil de solo sob a ação do tráfego de colhedoras de beterraba considerando quatro tipos de pneus, empregando o Modelo Cam-Clay para analisar a previsão do comportamento do solo a alta tensão oferecido pela colhedora.

Sorin-Stefan & Valentin (2012) empregaram o modelo de Drucker-Prager para a análise de compactação de solo agrícola com tráfego de diferentes tipos de tratores e colhedoras em seções bidimensionais na direção do tráfego e para seções transversais das camadas de solo e; Keller et al. (2014) estudaram a influência das propriedades do solo considerando diferentes camadas na distribuição das tensões ao longo da profundidade, empregando o critério de fluência de Von Mises. Por sua vez, Silva et al. (2018) analisaram as tensões no solo após o preparo da cultura da cana-de-açúcar fazendo uso do MEF empregando o Cam-Clay Modificado, analisando diversos cenários utilizando parâmetros próprios e teóricos do solo para previsão da compactação do solo.

Desse modo, objetivou-se neste trabalho, avaliar o comportamento do solo após o tráfego de veículos na colheita na cultura da cana-de-açúcar através da simulação numérica empregando parâmetros do perfil de solo Argissolo pelo modelo Cam-Clay Modificado com solução numérica.

Materiais e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE (Coordenadas geográficas: 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude), localizada na região da Zona da Mata de Pernambuco do Nordeste Brasileiro, caracterizada pela zona costeira com produção intensiva de cana-de-açúcar. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo "AS" tropical chuvoso (Alvares et al., 2014) com precipitação média anual de 1.300 mm concentrada, principalmente, entre março e julho e com temperatura média de 24 °C (INMET, 2019).

Coleta de solo

Foram selecionados três perfis aleatórios na entre linha de cultivo, onde, se extraíram amostras indeformadas nas camadas de 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m; e coletadas 4 amostras indeformadas em cada camada pelo uso do amostrador Ulhand, com anel volumétrico de 0,052 m de altura e 0,047 m de diâmetro, totalizando 60 amostras indeformadas para análise física.

Em seguida, foram coletadas amostras deformadas para análise da densidade de partículas e granulometria, com 4 repetições para cada camada nos três perfis, cujas características físicas, Tabela 1, de acordo com a metodologia da EMBRAPA (2017). O solo da área foi classificado como um Argissolo Amarelo (Ribeiro, 2019), de textura franco-arenosa cultivado com cana-de-açúcar no sexto corte.

Tabela 1. Caracterização física das camadas de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar

Camadas (m)	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Ds Mg m ⁻³	Dp	CC kg kg ⁻¹
0,00-0,20	757	33	210	1,68	2,65	0,13
0,20-0,40	730	33	237	1,71	2,63	0,14
0,40-0,60	679	27	294	1,48	2,63	0,15
0,60-0,80	672	23	305	1,56	2,69	0,14
0,80-1,00	652	25	323	1,71	2,69	0,14

CC: umidade a capacidade de campo; Ds: densidade do solo; Dp: Densidade de partículas.

Nos três perfis (Figura 1A) foram coletados blocos indeformados de 0,20 m (Figura 1B) e amostras indeformadas para o ensaio edométrico (Figura 1C) em cada camada.

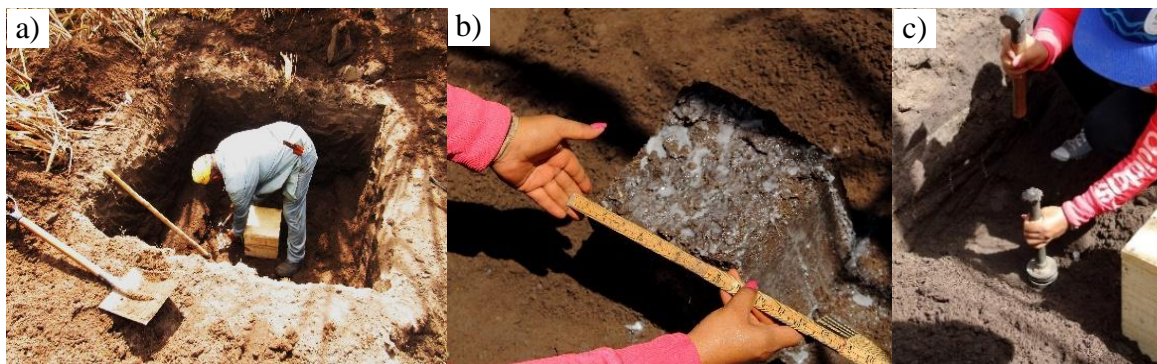


Figura 1. a) Abertura das trincheiras para extração dos blocos indeformados acoplados em caixas, b) Blocos indeformados, c) Amostra indeformada.

A coleta dos blocos de solo foi realizada após a abertura das trincheiras, com auxílio de uma pá reta, os quais foram parafinados e acondicionados em caixas de madeira para preservação das características estruturais. As amostras indeformadas foram coletadas empregando o amostrador com o anel de 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro; totalizando 15 blocos e 15 amostras indeformadas, acondicionadas e transportadas ao Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos do DEAGRI/UFRPE.

Ensaio de laboratório

As amostras indeformadas foram utilizadas para realizar os ensaios de compressibilidade empregando a prensa de adensamento tipo Bishop tradicional Solotest, conforme a norma da ABNT NBR 12007/1990, submetidas a cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, as quais foram acrescentadas a cada 120 segundos (Macedo et al., 2010), realizados com carga, descarga e recarga.

Cada uma das amostras analisadas foram acondicionadas e equilibradas a capacidade de campo na câmara de Richard (equivalente a 100 hPa). Uma vez realizados os ensaios de compressibilidade, as amostras foram secas a 105 °C durante 24 h e pesadas para determinação a densidade seca (D_s), conforme descrito no manual da EMBRAPA (2017). Posteriormente, foram gerados os gráficos da variação de altura (índice de vazios) versus logaritmo de tensões aplicadas. Uma vez obtidas as curvas de compressibilidade, foram determinadas as tensões de pré-consolidação, índice efetivo de compressão (C_c) e índice efetivo de descarregamento-recarregamento (C_s) de cada amostra, através do método de Pacheco Silva (1970).

Das 4 amostras indeformadas extraídas em cada bloco realizou-se o ensaio de cisalhamento direto. As amostras foram retiradas com o uso do anel quadrático $0,06 \times 0,06 \times 0,02$ m, posteriormente, acondicionadas a capacidade de campo na câmara de Richard a 100 hPa, previamente pesadas e; ensaiado na prensa de cisalhamento direto Solotest por acionamento elétrico, com leituras em função do deslocamento horizontal (DAS, 2002).

As tensões normais aplicadas para os ensaios de cisalhamento foram calculadas em função do peso específico do solo e a profundidade de cada amostra (Stokes & Mattheck, 1996), os quais são: 15, 20, 25 e 30 kPa para cada uma das amostras da camada de 0-0,2 m; 35, 45, 55 e 70 kPa para cada amostra da profundidade de 0,2-0,4 m; 70, 75, 80 e 85 kPa na estratificação 0,4-0,6 m; 95, 105, 115 e 130 kPa para cada amostra da camada de 0,6-0,8 m; e 120, 140, 160 e 170 kPa para cada amostra da camada de 0,8-1,0 m.

Após a análise, as amostras foram secas na estufa a 105 °C durante 24 h e pesadas para determinar a densidade seca (Ds). Posteriormente foram gerados os gráficos de deslocamento horizontal versus tensão tangencial, conforme a metodologia de círculo de Mohr (Coulomb, 1776), Estes círculos se ajustaram a uma reta tangencial, onde foram determinados o ângulo de atrito e a coesão.

Tensões aplicadas pelos veículos agrícolas

As simulações numéricas do tráfego de máquinas agrícolas na colheita de cana-de-açúcar foram realizadas para uma área sob cultivo em sexto ciclo. Foram simuladas as tensões aplicadas pelo trator Massey Ferguson 4292 (Goodyear 14,9-26 10 e Dyna 23,1-30); caminhão Mercedes Benz LS 2638 (Goodyear 11 R22 152/149); reboque RodoLinea (Goodyear 10-20 146/143), utilizados durante a colheita semi-mecanizada na Estação Experimental (EECAC/UFRPE).

A distribuição de tensões no contato pneu-solo foi calculada utilizando parâmetros oferecidos dos fabricantes de veículos e rodas (Tabela 2), como a largura, diâmetro, cargas legais por roda e pressão de insuflagem do pneu pelo método analítico (Keller, 2005).

A área de contato do pneu é descrita por uma elipse (Keller et al., 2007), através do método pseudo-analítico (Keller, 2005), assim, empregando-se os parâmetros da Tabela 2 foram encontradas as tensões distribuídas dos rodados do eixo dianteiro do trator, os quais foram decrescendo do centro para as extremidades da interação pneu-

solo: 216, 180, 80 e 60 kPa. Enquanto para cada pneu do eixo traseiro foram 224, 190, 120 e 20 kPa.

Tabela 2. Parâmetros das máquinas utilizados como inputs para as simulações.

Veículo	LC (cm)		DP (cm)		Carga (kg)		Insuflagem (kPa)		NP		SPD (cm)		DR (cm)	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
Trator	34	54	136	172	1669	2500	150	160	2	2	-	-	140	140
Caminhão	24	24	114	114	3000	2125	655	517	2	4	-	10	212	154
Reboque	20	20	105	105	2500	2500	700	724	4	4	10	10	160	160

D: pneus do eixo dianteiro; T: pneus do eixo traseiro; LC: largura do contato pneu-solo (cm); DP: diâmetro do pneu (cm); Carga: carga por pneu (kg); Insuflagem: pressão de insuflagem do pneu (kPa); NP: número de pneu por eixo; SPD: separação entre pneus duplos (cm), DR: distância entre rodas internas do eixo (cm).

Para os pneus do eixo dianteiro do caminhão, foram encontradas e aplicadas tensões distribuídas 810, 720, 500 e 200 kPa. Já para cada pneu do eixo traseiro aplicou-se 656, 570, 350 e 150 kPa. Os eixos do reboque, devido a distribuição equitativa em ambos eixos, consideraram-se uma única análise, onde, as tensões distribuídas do contato pneu-solo, foram aplicados com maior intensificação no centro, correspondentes a 879, 700, 500 e 200 kPa.

Dados de entrada do modelo Cam-Clay Modificado

Para a simulação do tráfego de máquinas agrícolas, foi empregado o modelo Cam-Clay Modificado (Roscoe et al., 1968). Este modelo requer valores dos parâmetros mecânicos e físicos para ser executado, os quais foram obtidos através do ensaio edométrico, cisalhamento e densidade de partículas, onde, a tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressão (C_c) e coeficiente de recompressão (C_r) foram determinados pelo método Pacheco Silva (1970), o ângulo de atrito através do círculo de Mohr Coulomb (1776); e os parâmetros índice de vazios (e), densidade de partícula (D_p) e Porosidade (n) pela EMBRAPA (2017). Foram utilizados média aritmética destes parâmetros dos três perfis para cada camada.

A partir dos parâmetros avaliados, foram calculados os seguintes, cuja formulação matemática corresponde:

$$\lambda = \frac{C_c}{2,3}$$

$$k = \frac{C_r}{2,3}$$

$$\mu = \frac{1 - \sin(\phi)}{2 + \sin(\phi)}$$

$$M = \frac{6 \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)}$$

A declividade da reta virgem λ foi calculada a partir do índice de compressão C_c ; a declividade da reta de descompressão κ foi obtida através do coeficiente de C_s ; o coeficiente de Poisson (μ) determinou-se em função do ângulo de atrito (ϕ); a inclinação da linha de estados críticos M , calculou-se a partir do ϕ . Na Tabela 3, observa-se a média dos dados de entrada do modelo Cam-Clay Modificado das cinco camadas do perfil de solo; processado no software numérico CODE _BRIGHT (Olivella et al., 1996).

Tabela 3. Parâmetros para solução do modelo Cam-Clay Modificado.

Parâmetros do modelo constitutivo	Camada (m)				
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
Declividade da reta de descompressão (κ)	0,0156	0,0056	0,0026	0,0046	0,0071
Coeficiente de Poisson (μ)	0,2492	0,2105	0,2764	0,2105	0,2106
Declividade da reta virgem (λ)	0,11	0,05	0,12	0,07	0,08
Inclinação da LEC (M)	1,20	1,43	1,05	1,43	1,43
Tensão de pré-consolidação (kPa)	48,67	171,44	105,55	180,40	163,12
Índice de vazios (e)	0,82	0,48	0,82	0,49	0,56
Porosidade (n)	0,45	0,32	0,45	0,33	0,32
Densidade de partícula D_p ($Mg.m^{-3}$)	2,65	2,63	2,63	2,69	2,69

LEC – linha do estado crítico

Pré-processamento: malhas de elementos finitos e condições de contorno

Para simulação numérica de diversas máquinas agrícolas foi utilizado a geometria do perfil da área de estudo, considerando as dimensões dos veículos e dos pneus, os quais são fornecidos pelos fabricantes (Tabela 2). Considerando uma área com dimensões de $9,00 \times 4,00$ m (largura, profundidade), uma vez que tem sido observado a propagação das tensões abaixo a 1,0 m de profundidade e estratificações de 0-0,2 m; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; 0,8-4,0 m. O esquema foi realizado no programa gmsh (Geuzaine, 2009), e no software Matlab gerando a malha de elementos finitos em 2D (Figura 2).

Aplicaram-se as condições mecânicas de contorno, onde foram totalmente fixados os dois pontos das arestas inferiores do perfil (Figura 2), enquanto, das arestas superiores foram fixadas apenas em x; para as linhas laterais da área (direita e esquerda) aplicaram-se grau de liberdade apenas em y, enquanto, a linha inferior unicamente em x

e para linha superior da geometria tiveram graus de liberdade em x e y, entretanto, o contato do pneu-solo foi sujeita a tensões distribuídas. Foram traçadas três linhas no contato do pneu (abaixo e nas extremidades), para verificação simétrica devido à malha não estruturada.

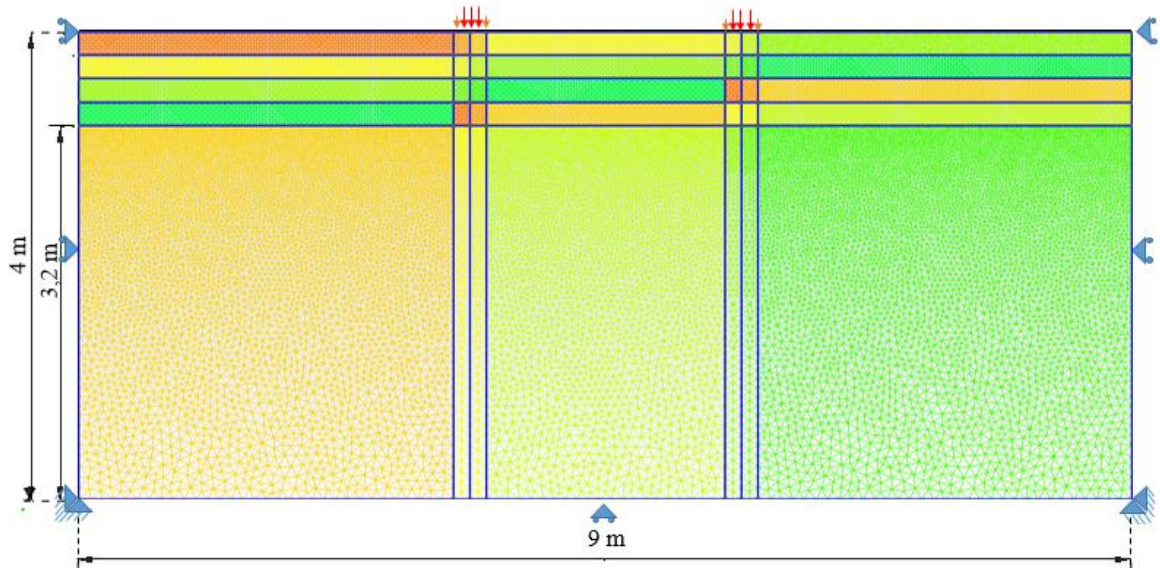


Figura 2. Condições do contorno, distribuição de tensões no contato solo-pneu do trator dianteiro e discretização em elementos não estruturados.

A malha foi gerada através da discretização da geometria em elementos triangulares, das mesmas magnitudes nas 4 camadas da superfície, enquanto que, para o subsolo (0,8 a 4,0), discretizado em elementos triangulares de maior tamanho. A aplicação da malha infinitesimal triangular (não estruturada) com menor tamanho na superfície (0-0,8 m) do que a profundidade de 0,8-4,0 m deve-se para representar a geometria complexa dos poros, uma vez que, este tipo de malha tem flexibilidade da forma que seus elementos podem assumir.

A precisão da solução depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Em geral, a precisão da solução melhora com o aumento do número de elementos da malha (Cruzado et al., 2012). Para solo-pneu dianteiro do trator foram gerados 54710 elementos e 27675 nós; e solo-pneu traseiro do trator 54652 elementos e 27646 nós. Para malha da interação solo-pneu dianteiro do caminhão foram gerados 54317 elementos e 27479 nós; enquanto para solo-pneu traseiro do caminhão 54606 elementos e 27623 nós; e para o solo-pneu do reboque 54180 elementos e 27409 nós. Posteriormente converteu-se o arquivo de saída do GMSH em três arquivos de entrada ou inputs (root_gen.dat, root_gri.dat e root.dat) do simulador numérico CODE_BRIGHT.

Simulação numérica e Pós-Processamento

A simulação numérica foi realizada com condições mecânicas, considerando 5 tipos de materiais pelas propriedades físicas e mecânicas, dentre estes, a porosidade em cada camada, entretanto, desconsidera as condições hidráulicas, ou seja, analisa o solo da área estudada totalmente drenado. Para simular o tráfego dos veículos agrícolas foi utilizado o modelo de plastificação Cam-Clay Modificado, controlada pela inclinação linha dos Estados Críticos (M) e pela tensão de pré-consolidação no plano p-q.

Através do software CODE_BRIGTH (Olivella et al., 1996) foram resolvidas as equações diferenciais do problema mecânico pelo método iterativo Newton-Raphson. Uma vez realizada a simulação no CODE_BRIGTH, foram visualizados todos os dados mecânicos da simulação numérica pela interface gráfica interativa, o programa GID (Melendo et al., 2018).

Além da visualização dos gráficos matemáticos, gráficos vectoriais, definição da geometria após o carregamento e gráficos de cores, foram extraídos, principalmente os dados de deformações, tensões em qualquer direção (tração, cisalhamento e compressão), porosidade e tensão de pré-consolidação. Já a compactação provocada pelo tráfego de máquinas agrícolas foi analisada através da variação da tensão de pré-consolidação e redução da porosidade, cuja validação foi realizada por Silva et al. (2018) através da comparação da curva de compressão, oferecida pelo modelo Cam-Clay Modificado com a obtida do ensaio edométrico.

Resultados e Discussão

Tensão vertical

Na Figura 3a, são apresentadas a distribuição das tensões provocadas pela passagem do eixo dianteiro do trator, considerando o solo na umidade na capacidade de campo (CC) conforme descrito (Tabela 1). Pode-se verificar uma maior concentração de tensões embaixo da roda, com tensões da ordem de 214 kPa, com bulbos de tensões se propagando próximo de 1,0 m a 45 kPa, portanto, não há uma contribuição na compactação a 1,00 m profundidade uma vez que a tensão de pré-consolidação inicial nessa camada é superior (163 kPa) na entrelinha de cultivo (onde é trafegado o veículo), embora na camada de 0-0,2 m haja compactação.

Observa-se que no centro do eixo temos tensões negativas ($< 0,01$), indicando uma expansão do solo, região não compactada. Quando se observa o eixo do trator dianteiro como um todo, verifica-se que os dois bulbos de tensões se encontram a 0,9 m

com tensões da ordem de 23 kPa. Assim, abaixo dessa profundidade há uma contribuição conjunta dos pneus.

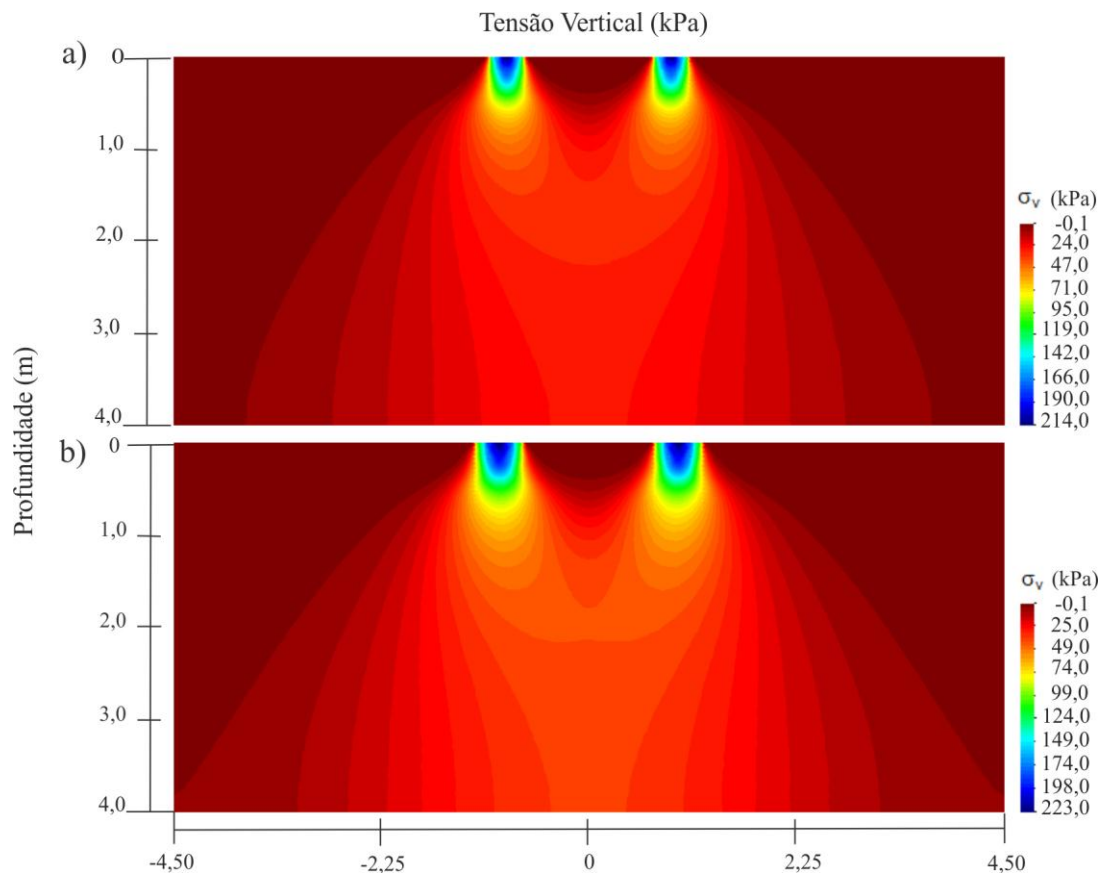


Figura 3. Variação da tensão vertical no solo das rodas do eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do trator para a umidade na capacidade de campo até 4,0 m de profundidade.

Com relação às tensões provocadas pela passagem do eixo traseiro do trator, Figura 3b, considerando o solo na umidade de capacidade de campo, há uma maior concentração de tensões abaixo da roda, da ordem de 224 kPa, com bulbos de tensões se propagando próximo de 1,0 m (60 kPa), o que significa que não há contribuição na compactação a 1,0 m de profundidade, uma vez que a tensão de pré-consolidação inicial nessa camada é superior (163 kPa). Também no centro do eixo temos tensões de tração ($< 0,01$), o que indica uma expansão do solo na região não compactada.

As tensões atuantes no centro do eixo traseiro do trator (Figura 3b) aos 0,4 m de profundidade, região de maior densidade radicular, as tensões são negativas, área de expansão até a profundidade de 1,0 m. Com relação às tensões na interação pneu solo aos 0,4 m de profundidade são da ordem de 140 kPa.

A distribuição das tensões provocadas pela passagem dos pneus do eixo dianteiro do caminhão (Figura 4a), com a umidade do solo na de capacidade de campo, pode-se verificar uma maior concentração de tensões embaixo da roda, com tensões da ordem de

800 kPa, com bulbos de tensões se propagando abaixo de 1,0 m da ordem de 130 kPa. Observa-se que no centro do eixo temos tensões de tração ($<0,01$), indicando uma expansão do solo, região não compactada.

Tensões verticais na linha de cultivo ou no meio do eixo dianteiro do caminhão a 0,4 m são negativas, área de expansão, até a profundidade de 1,0 m, entretanto, na interação pneu-solo a 0,4 m a tensão vertical é da ordem de 285 kPa, superior a tensão de pré-consolidação nessa profundidade, portanto, indicando compactação adicional.

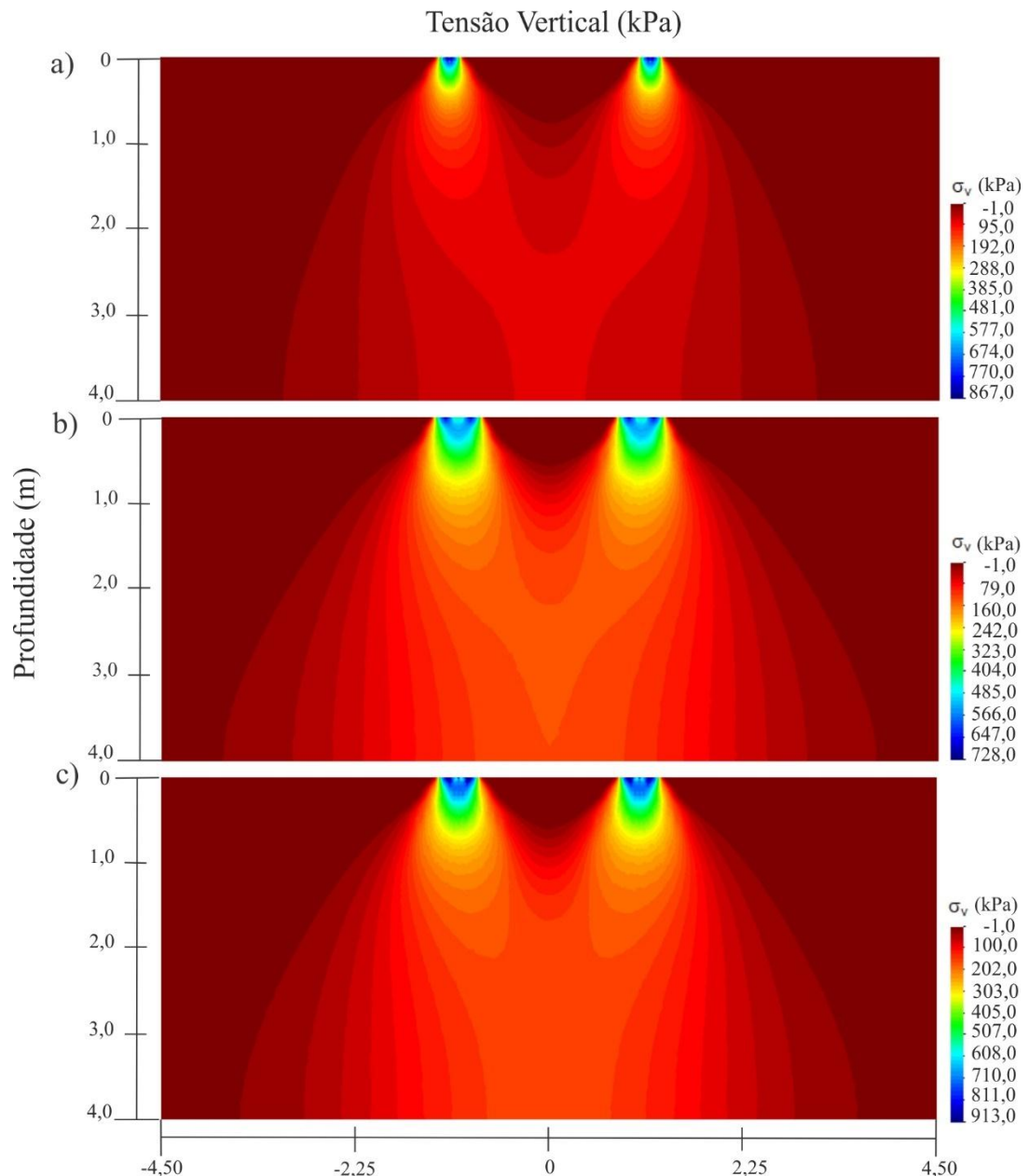


Figura 4. Variação da tensão vertical no solo das rodas do eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do caminhão (c) do reboque para a umidade n capacidade de campo até 4,0 m de profundidade.

Com relação aos pneus do eixo traseiro do caminhão (Figura 4b), embaixo das rodas as tensões são elevadas, atingindo 705 kPa. As tensões provocadas pelo conjunto de pneus traseiros (4 pneus) formam o único bulbo se propagando até 4,00 m de profundidade com tensões de 120 kPa. Com relação a profundidade 0,4 m, as tensões são da ordem de 350 kPa e a 1,0 m de profundidade, atingiu 200 kPa. Quanto ao centro do eixo traseiro do caminhão, temos tensões de tração ($<0,01$) próximo a 0,5 m, o que indica uma expansão do solo e região não compactada.

Quanto ao reboque (Figura 4c), veículo de maiores pressões de insuflagem e menor largura de contato (Tabela 2), as tensões embaixo das rodas chegam a 880 kPa. As tensões provocadas pelo conjunto de pneus formam um único bulbo se propagando aos 0,4 m, 470 kPa, onde, a 1,0 m de profundidade atingiu 230 kPa, indo até 4,0 m de profundidade com tensões próximas de 120 kPa. Quanto ao centro do eixo traseiro do reboque, temos tensões de tração ($<0,01$), indicando, mais uma vez, expansão do solo, região não compactada.

Observa-se que para todos os veículos modelados, as rodas duplas do reboque são as que transmitem as maiores tensões verticais ao solo (Figura 4c), seguidas pelas rodas simples e duplas em tandem do caminhão (Figura 4b) e do trator traseiro e dianteiro. De maneira geral, as menores tensões no solo foram transmitidas pelas rodas simples dos eixos dianteiro e traseiro do trator.

Nos cinco cenários modelados: pneus do trator dianteiros e traseiros, do caminhão pneus dianteiros e traseiros e reboque, as tensões entre rodas do eixo do reboque estão na ordem de 12 kPa até 0,4 m, praticamente nulas. A influência das cargas transmitidas pelos pneus do Reboque é nula na linha de plantio, ou seja, não causará compactação adicional ao sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar. Esses valores se propagam até os 0,5 m de profundidade e, estendendo-se até 1,6 m com tensões próximas de 100 kPa.

Vale diferenciar que para o Reboque (Figura 4c) as maiores tensões estão abaixo das rodas duplas, em concordância dos encontrados por Lozano et al. (2013), Keller (2005) e Keller & Arvidsson (2004) que obtiveram as maiores tensões abaixo do centro de cada uma das rodas duplas. O método aplicado para avaliar as tensões transmitidas no solo destes autores foi por meio dos modelos semi-analítico, baseado nos modelos de compactação que utilizam a aproximação de Söhne (1953), com equações analíticas de transmissão de tensões verticais ao solo, desenvolvidas por Boussinesq (1885) e Fröhlich (1934), com consideração de deformação elástica, ao contrário do modelo Cam-Clay Modificado pelo MEF.

Dos três veículos analisados, o Reboque transmitiu as maiores tensões no solo (Figuras 5e). Em concordância com essa afirmação, Lozano et al. (2013), utilizando veículos similares, modelou através do SoilFlex (método semi-analítico), obtendo as mesmas conclusões. As elevadas tensões verticais transmitidas pelo Caminhão e o Reboque nos primeiros 0,3 m de profundidade podem ser atribuídas aos maiores carregamentos (Lamandé & Schjønning, 2011).

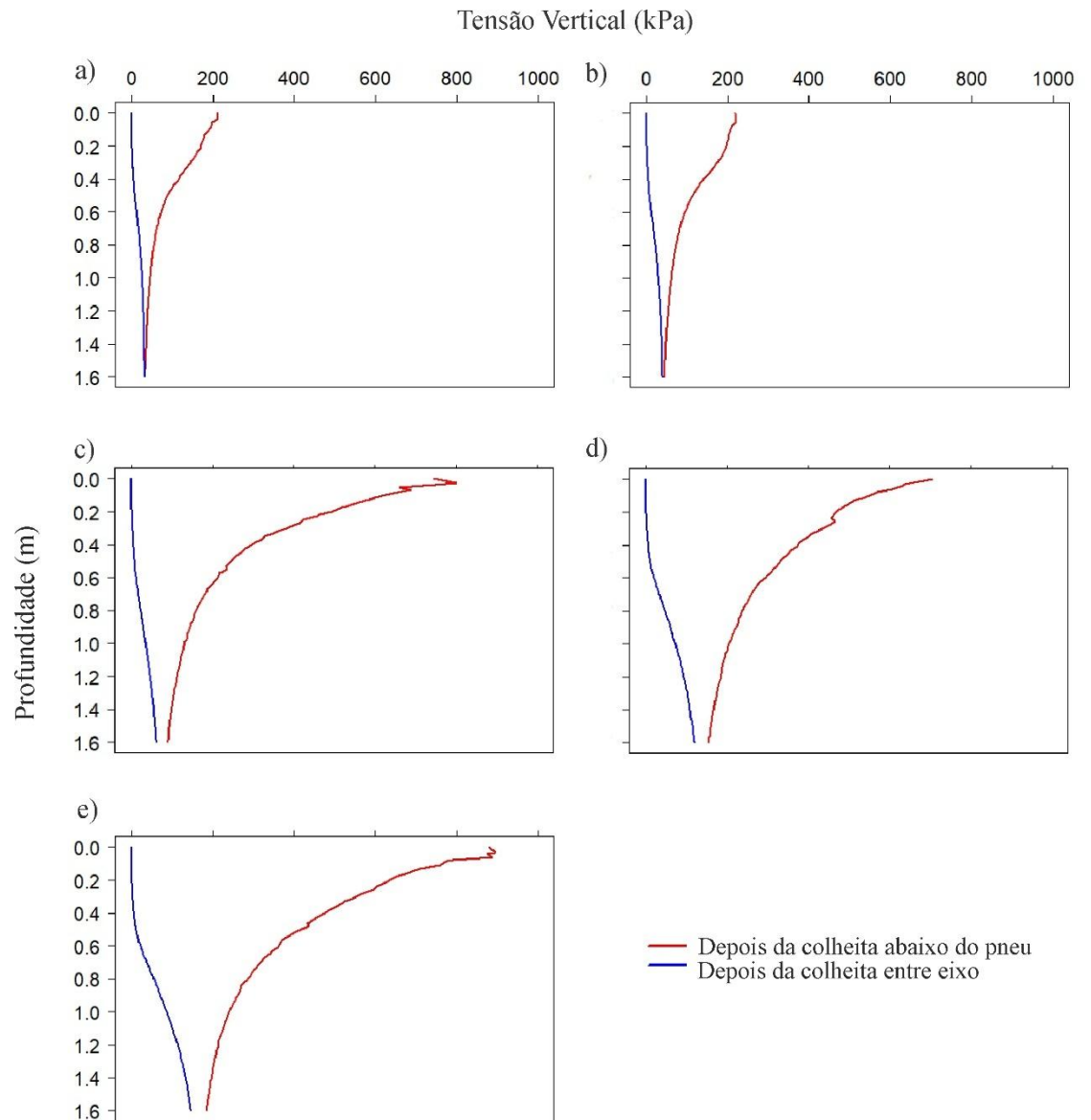


Figura 5. Tensões verticais transmitidas ao solo para a roda dianteira (a), e traseira do trator (b); roda dianteira (c), e traseira do caminhão (d); e rodas do reboque (e) na umidade de capacidade de campo, em duas situações: abaixo do contato central dos pneus e no meio do eixo.

De maneira geral, para todos os veículos analisados no centro do eixo, região entre rodas, onde se encontra a linha de plantio da cana-de-açúcar, e posterior a colheita,

na soqueira, tem-se como alternativas o manejo com controle de tráfego agrícola (Roque et al., 2010), que preserva, as regiões não trafegadas para favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente, o desenvolvimento das culturas (Vermeulen & Mosquera, 2009).

Em todos os cenários analisados, na região entre eixo o solo recebe uma expansão, favorecendo um acréscimo da sua porosidade na primeira camada. Para que isto aconteça, deve haver gerenciamento do tráfego durante a colheita, onde, é necessário separar as zonas de tráfego (entrelinhas) e as zonas de crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas permanentes, com redução da área submetida ao tráfego agrícola (Braunack et al., 2006), assim, reduzindo a compactação no talhão, concentrando apenas nas linhas permanentes.

Outro aspecto a ser observado é que na zona de tração (tensão negativa) concentra a zona radicular da cultura. Na literatura, estima-se que a cana-de-açúcar possibilita o maior acúmulo de biomassa das raízes, concentrando 80% até 0,6 m de profundidade (Noronha, 2018). Grande percentual do sistema radicular está concentrado na camada de 0-0,4 m, região não compactada, desde que não haja tráfego de veículos na entre linha da cultivo, zona de tração.

Tensão de pré-consolidação

A tensão pré-consolidação é uma variável de história da função do modelo Cam-Clay Modificado, representando deformações elastoplásticas do solo (Roscoe et al., 1968). A tensão de pré-consolidação para o tráfego do trator na capacidade de campo, no eixo dianteiro e traseiro foram 87 e 94 kPa, respectivamente, na camada 0-0,2 m (Figura 6a e c). Sendo próximos a valores de tensão de pré-consolidação para a profundidade de 0-0,2 em um Argissolo da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, os quais foram analisados a 15% de umidade por Tavares (2016).

Para as condições prévias da colheita, a tensão de pré-consolidação inicial da camada 0-0,2 m era 48 kPa, o que indica que antes do tráfego o solo tinha capacidade de ser submetido a tensões <48 kPa, embora, o trator aplicou tensões >200 kPa, porém, houve uma deformação plástica, conseqüentemente, aumento da tensão de pré-consolidação, o qual representa o novo parâmetro do trecho elástico para os futuros carregamentos.

A diferença das tensões de pré-consolidação entre a camada de 0-0,2 e 0,2-0,4 m indica o maior trecho elástico da segunda estratificação devido à maior compactação inicial, portanto, quando submetido a tráfego do trator, há um ligeiro incremento da

tensão de pré-consolidação, enquanto que a camada da superfície representa maior tendência de deformação irreversível. Uma vez que as tensões verticais se propagam até na profundidade de 1,0 m, onde, a partir de aproximadamente 0,4 m não houve modificação das tensões de pré-consolidação (observa-se que antes e depois da colheita são similares), indicando deformação elástica no subsolo, ou seja, sem aumento da compactação a partir de 0,4 m quando trafegado o trator.

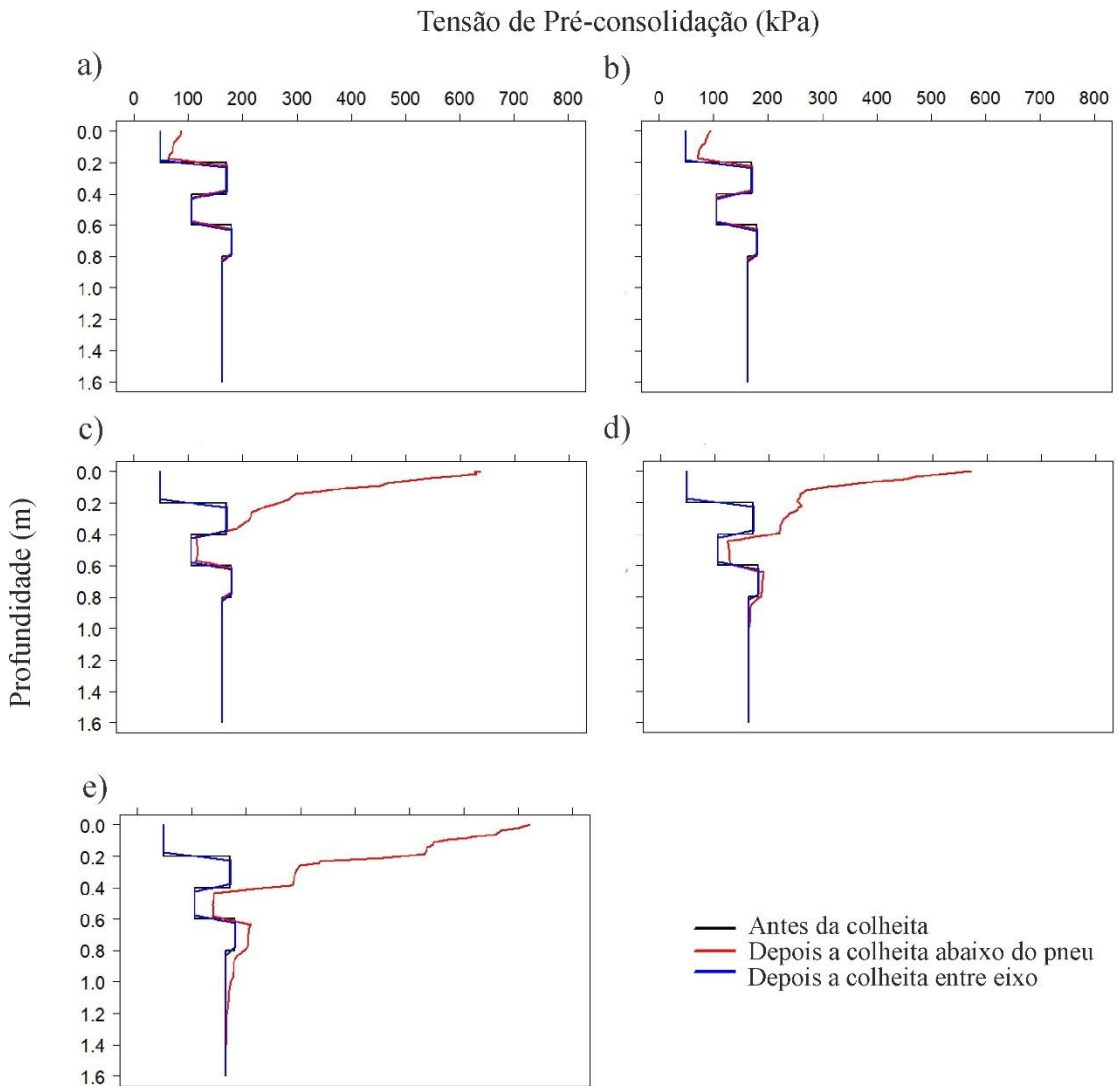


Figura 6. Tensão de pré-consolidação nos eixos dianteiro (a) traseiro (b) do trator e dianteiro (c) traseiro (d) do caminhão, e de ambos os eixos do reboque (e).

Houve redução da tensão de pré-consolidação gradativamente para os dois veículos em todo o perfil de solo, entretanto, a intensificação foi na superfície. As tensões verticais excedem à tensão de pré-consolidação inicial para todos os veículos, levando à compactação nas estratificações 0-0,2. No estudo de Silva et al. (2018), o tráfego do caminhão influenciou na compactação até 1,0 m de profundidade sob cargas constantes na interação pneu-solo.

A tensão de pré-consolidação para o eixo dianteiro do caminhão foi superior do que para os eixos traseiro, 749 kPa e 706 kPa, respectivamente (Figura 6c e d). Entretanto, foram inferiores aos eixos do reboque (Figura 6e), atingido até 880 kPa na camada 0-0,2 m. Das cinco simulações, o tráfego do reboque apresentou aumento gradual da tensão de pré-consolidação devido à resposta plástica oferecida pela propagação das tensões verticais, uma vez que a 1,0 m de profundidade, atinge 200 kPa, enquanto que o trecho elástico representado pela tensão de pré-consolidação antes do tráfego é <163 kPa.

Destaca-se que as maiores tensões de pré-consolidação antes do tráfego, corresponderam às camadas com menor porosidade, correspondentes à 0,2-1,0 m de profundidade. Os quais apresentam maior trecho elástico em comparação com a primeira camada. Houve mudanças destas tensões de pré-consolidação para tensões elevadas em comparação com as tensões oferecidas pelo trator, indicando que este veículo pode transmitir tensões verticais até 1,0 m de profundidade.

Porosidade do solo

No contato do pneu dianteiro do trator, houve um decréscimo da porosidade até à profundidade de 0,4 m, sendo atenuado na primeira camada (Figura 7a). Entretanto, na linha de cultivo houve um ligeiro acréscimo da porosidade na superfície quando trafegado com o trator. O eixo traseiro do trator (Figura 7b) apresentou mudanças na porosidade nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, demonstrando ainda, um ligeiro decréscimo na profundidade de 0,4-1,0 m. No meio de ambos os eixos houve uma diminuição da porosidade unicamente na camada de 0,2-0,4 m, indicando a possível influência da propagação de tensões horizontais na linha de cultivo, resultantes do pneu, uma vez que não tem aplicação direta de tensões no meio do eixo.

A diminuição da porosidade no contato dos pneus do eixo frontal do caminhão (Figura 7c) foi alterada até 0,6 m, o qual, representa maior deformação em comparação com o trator, entretanto, na linha do cultivo, houve um ligeiro ganho da porosidade até 0,2, já para a camada 0,2-0,4 m reduz, estas alterações podem estar sujeitas à diversas trajetórias das tensões.

Para o eixo traseiro do caminhão (Figura 7d) e eixos do reboque (Figura 7e), atingido até aproximadamente 1,0 m, houve um decréscimo pronunciado nas três primeiras camadas, enquanto que na profundidade de 0,6-1,0 m houve decréscimo menos pronunciado, onde, na primeira camada diminui de 45% para 30%, já as camadas 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de 32% para 28% e 45% para 42%, respectivamente. Embora houve

um ganho da porosidade até 0,2 m no meio dos eixos e levemente decrescente ao longo do perfil.

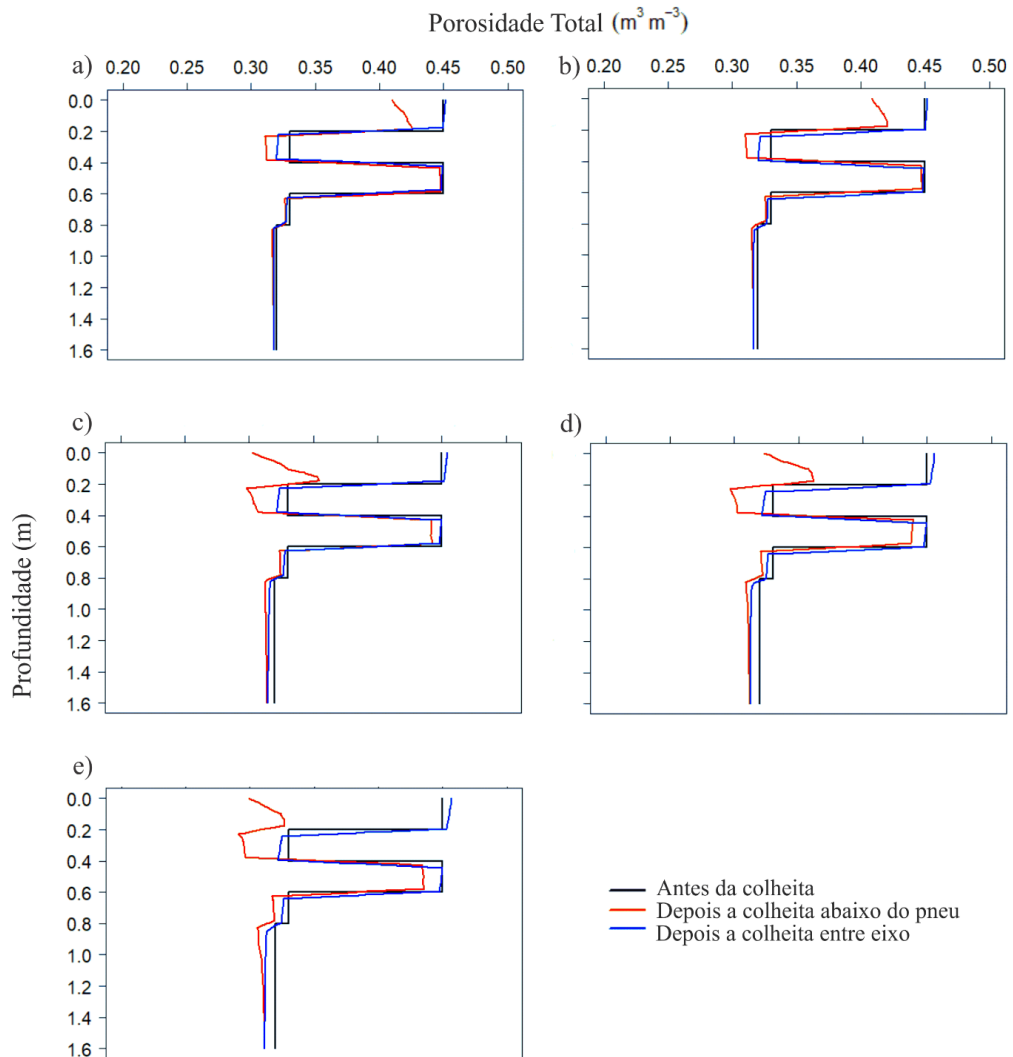


Figura 7. Variação da porosidade antes e após a colheita pelo eixo dianteiro (a) e traseiro (b) do trator, do eixo dianteiro (c) e traseiro (d) do caminhão, e dos eixos do reboque (e)

O veículo que ofereceu maior redução do volume de poros no perfil foi o reboque, seguido pelo eixo traseiro do caminhão, eixo dianteiro do caminhão, eixo traseiro do trator e parte frontal do trator. A existência de uma camada (0,2-0,4 m) de solo com menor porosidade, representa uma barreira física, o qual pode afetar no desenvolvimento e morfologia das raízes, podendo ser usada como indicador de compactação (Defosse & Richard, 2002), por sua vez, limita a intensificação das tensões nas próximas profundidades, embora, pode influenciar na propagação horizontal e favorecer a diminuição da deformação irreversível ao longo do perfil.

Conclusões

A propagação das tensões verticais no perfil de solo sob tráfego do caminhão (eixo traseiro) e do reboque atingiram a profundidade de 4,0 m, enquanto que para o trator atingiu até 1,0 m.

A maior compactação do solo foi observada para camada de 0-0,2 m quando trafegada com o reboque, seguido pelo caminhão e o trator. O tráfego do caminhão e reboque compactaram até 0,6 m e o trator até 0,4 m. A porosidade aumentou na linha de cultivo para a camada de 0-0,2 m e decresceu para camada de 0,2-0,4 m.

As camadas do perfil de solo mostraram a heterogeneidade antes e após a colheita de cana-de-açúcar através da porosidade e tensão de pré-consolidação.

O maior número elementos não estruturados infinitesimais permitiram representar o comportamento elastoplástico de um perfil de solo no programa CODE_BRIGTH.

Referências Bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Ensaio de adensamento unidimensional - NBR 12007. Rio de Janeiro, p.13, 1990.
- Abu-Hamdeh, N. H.; Reeder, R. C. Measuring and predicting stress distribution under tractive devices in undisturbed soils. *Biosystems Engineering*, v.85, p.493-502, 2003.
- Albert, R. P.; Pinto, M. A. B.; Lima, C. L. R.; Santos, F. J.; Scheunemann, T.; Miguel, P. Physico-mechanical attributes of a Typic Hapludox in areas with different sugarcane cultivation times. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, p.1-8, 2018.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2014.
- Arvidsson, J.; Westlin, H.; Keller, T.; Gilbertsson, M. Rubber track systems for conventional tractors—Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, v.117, p.103-109, 2011.
- Berli, M.; Kirby, J. M.; Springman, S. M.; Schulin, R. Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, v.73, p.57-66, 2003.
- Braunack, M. V.; Arvidsson, J.; Håkansson, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. *Soil and Tillage Research*, v.89, p.103-121, 2006.

- Coulomb, C. A. Remarque sur la rupture des corps. *Memories presents par divers savants al, Academic*, v.7, 1776.
- Cueto, O. G.; Coronel, C. E. I.; Bravo, E. L.; Morfa, C. A. R.; Suárez, M. H. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *Journal of Terramechanics*, v.63, p.61-67, 2016.
- Cruzado, A.; Urchegui, M. A.; Gómez, X. Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in thin steel wires. *Wear*, v.289, p.26-38, 2012.
- DAS, B. M. Soil mechanics laboratory manual. New York, USA: Oxford University, 2002.
- Defossez, P.; Richard, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research*, v.67, p.41-64, 2002.
- Défossez, P.; Richard, G.; Boizard, H.; O'Sullivan, M. F. Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. *Geoderma*, v.116, p.89-105, 2003.
- Drucker, D. C.; Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, v.10, p.157-165, 1952.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos de análise de solo. 3ª Edição, Brasília, p.573, 2017.
- Frohlich, O. K. *Druckverteilungim Baugrunde (Pressure Distribution in Soil Foundation)*. Springer, Wien, p.178, 1934.
- Gens, A.; Potts, D. M. Critical state models in computational geomechanics. *Engineering Computations*, v.5, p.178-197, 1988.
- Geuzaine, C.; Remacle, J. F. Gmsh: athree-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.79, p.1309-1331, 2009.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010. Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 01/04/2019.
- Keller T, Arvidsson J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*, v.79, p.191-205, 2004.

- Keller, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, v.92, p.85-96, 2005.
- Keller, T.; Défossez, 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 and Tillage Research*, v.93, p.391-411, 2007.
- Keller, T.; Berli, M.; Ruiz, S.; Lamandé, M.; Arvidsson, J.; Schjønning, P.; Selvadurai, A.P.S. Transmission of vertical soil tension under agricultural tyres: comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, v.140, p.106-117, 2014.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v.129, p.61-68, 2013.
- Melendo, A.; Coll, A.; Pasenau, M.; Escolano, E.; Monros, A. Software GID 14.0.1. <www.gidhome.com>. Acesso em 22/07/2018.
- Mion, R. L.; Holanda, Á. S.; Barroso, S. H. D. A.; SILVA, S. D. A. E. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. *Engenharia Agrícola*, v.36, p.63-77, 2016.
- Noronha, R. H. D. F. Plantio de mudas pré brotadas (mpb) de cana-de-açúcar em sistema de manejo conservacionista de solo. Tese de Doutorado em Produção Vegetal – Universidade Estadual Paulista, 2018.
- OCDE-FAO. *Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024*. 21ª Ed. Agricultura Brasileira, p.24, 2015.
- Olivella, S.; Gens, A. S; Carrera, J.; Alonso, E. E. Numerical formulation for a simulator CODE-BRIGHT for the couple analysis of saline media. *Engineering Computations*, v.13, p.87-112, 1996.
- Pacheco Silva, F. A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. *Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, v.2, p. 225-232, 1970.
- Poodt, M. P.; Koolen, A. J.; Van der Linden, J. P. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. *Soil and Tillage Research*, v.73, p.67-76, 2003.
- Potts, D. M.; Zdravković, L. Finite Element Analysis. *Geotechnical Engineering: Theory*, v.34, 1999.

- Ribeiro, M. R. Solos de Referência do Estado de Pernambuco. Disponível em: <<http://www.colecaomateusrosas.com.br/home/TesesArtigos>>. Acesso em: 22/01/2019.
- Roque, A. A. O.; Souza, Z. M.; Barbosa, R. S.; Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.744-750, 2011.
- Roscoe, K. H; Burland, J. B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plasticity*, v.33, p. 535-609, 1968.
- Schjønning, P.; Lamandé, M.; Tøgersen, F. A.; Arvidsson, J.; Keller, T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. *Biosystems Engineering*, v.99, p.119-133, 2008.
- Schjønning, P.; Lamandé, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. *Soil and Tillage Research*, v.108, p.77-82, 2010.
- Sheng, D.; Sloan, S. W.; Yu, H. S. Aspects of finite element implementation of critical state models. *Computational Mechanics*, v.26, p.185-196, 2000.
- Sheng, D.; Smith, D. W.; Sloan, S. W.; Gens, A. Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part II: Verification and application. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v.27, p.767-790, 2003.
- 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. *Soil and Tillage Research*, v.181, p.1-10, 2018.
- Sorin-Stefan, B.; Valentin, V. Use of Finite Element Method to Determine the Influence of Land Vehicles Traffic on Artificial Soil Compaction. *Water Stress*. Tech Croatia, p.179-198, 2012.
- Stokes, A.; Mattheck, C. Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, v.47, p.693-699, 1996.
- Vaunat, J.; Cante, J. C.; Ledesma, A.; Gens, A. A stress point algorithm for an elastoplastic model in unsaturated soils. *International Journal of Plasticity*, v.16, p.121-141, 2000.
- Vermeulen, G. D.; Mosquera, J. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. *Soil and Tillage Research*, v.102, p.126-134, 2009.

CAPÍTULO III:
INDICADORES FÍSICO-MECÂNICO DE UM ARGISSOLO AMARELO
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Indicadores físico-mecânico de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar

RESUMO: A compactação do solo tem sido analisada através dos parâmetros de porosidade, tensão de pré-consolidação, resistência à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e recentemente pela análise visual da estrutura do solo (VESS). Assim, objetivou-se avaliar os indicadores físico-mecânico de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. Coletas de amostras deformadas e indeformadas foram realizadas em três pontos aleatórios na entrelinha da cultura com cinco camadas de 0,20 até 1,00 m para determinar as características físicas e mecânicas do solo, a saber: estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência à penetração (RP), densidade seca, tensão de pré-consolidação e VESS. Os dados foram submetidos a análise de variância multivariada ao 5% de probabilidade. A heterogeneidade do perfil de solo foi observada através da variação da RP ao longo das profundidades. A classificação dos dados em grupos foi feita pela análise discriminante canônica, os quais, evidenciaram a elevada RP e Ds correlacionadas com o critério de VESS e percentagem de agregados de diâmetro <0,25 mm. Houve correlação canônica entre os parâmetros da densidade, RP, menor diâmetro de agregados, tensão de pré-consolidação e técnicas de análise visual do solo. A ligação entre parâmetros físicos, mecânicos e de avaliação visual, mostraram que houve correlação canônica entre a densidade do solo, tensão de pré-consolidação, resistência à penetração e score da avaliação visual, corroborando a eficiência do VESS.

Palavras-chave: Tensão de pré-consolidação, resistência à penetração, VESS, SubVESS

Physical-mechanical indicators of an Ultisol cultivated with sugar cane

Abstract: Soil compaction has been analyzed through porosity, precompression stress, soil penetration resistance (RP), bulk density (Ds) and recently by visual analysis of soil structure (VESS). The objective was to study the physical-mechanical indicators of an Ultisol cultivated with sugarcane and correlates them to each other. Samples of disturbed and undisturbed samples were collected at three random points at the crop inter-rows with five layers of 0.20 to 1.00 m to determine the physical and mechanical characteristics of the soil, namely: aggregate stability, organic carbon, soil penetration resistance (RP), bulk density, pre-consolidation stress and VESS. Data were submitted

to multivariate analysis. There was a canonical correlation between the parameters of bulk density, RP, lower diameter of aggregates, precompression stress and techniques of visual analysis of the soil. The heterogeneity of the soil profile was observed through the variation of the PR along the depths. The classification of the data into groups was done by the canonical discriminant analysis, which, evidenced the high RP and bulk density correlated with the VESS criterion and percentage of aggregates of diameter <0.25 mm. The connection between physical, mechanical and visual evaluation parameters showed that there was a canonical correlation between bulk density, pre-consolidation stress, soil penetration resistance and visual evaluation score, corroborating the efficiency of the VESS.

Keywords: Pre-consolidation stress, penetration resistance, VESS, SubVESS

Introdução

A demanda de matéria prima para a produção do biocombustível, promovido pela crise do petróleo em 1975 e constante aumento do preço do petróleo, viabilizou uma crescente expansão no cultivo e produção de cana-de-açúcar no Brasil, sendo um dos países com maior produção e consumo de etanol, assim como de produção de matéria prima e açúcar refinado (Szmrecsányi & Moreira, 1991; BRASIL, 2007).

Os produtores adaptaram sistemas mecanizados ou semi-mecanizados para facilitar o processo de lavoura, aplicação de adubos e, principalmente, a colheita. Para esta fase são necessários veículos de cargas com elevada tensão oferecida no solo, embora para todos os processos culturais haja uma consequente aplicação de tensões e rearranjo na estrutura do solo (Lozano et al., 2013; Cavalcanti et al., 2019).

A colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar pode influenciar na produção e longevidade da cultura, bem como nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Silva et al., 2014; Almeida et al., 2016; Amaral et al., 2017). A qualidade da estrutura e estabilidade de agregados são influenciados pelas tensões que o solo é submetido durante a colheita, já que, o uso contínuo de veículos de carga geralmente traz consequências negativas à sua estrutura (Cavalcanti et al., 2019).

Em cultivos perenes como a cana-de-açúcar com mais de 5 colheitas, aumentam os riscos de compactação do solo e da degradação da estrutura, especialmente, em condições adversas de umidade e a alta porosidade inicial (Albert et al., 2018; Silva et al., 2018; Cavalcanti et al., 2019). Alterações na estrutura dos agregados deve-se a tensões externas, para qual há um rearranjo das partículas do solo, principalmente, com

o uso de colhedoras, caminhões, trator-reboque e transbordos que intensificam a compactação do solo devido à altas tensões oferecidas (Lozano et al., 2013; Albert et al., 2018).

Em consequência há formação de torrões, com estrutura extremamente compactada que limita o desenvolvimento das raízes, dificulta a infiltração de água e contribui para processos erosivos (Keller & Hakanssona, 2010; Sampietro et al., 2015). A descompactação pode ser realizada através do subsolador, entretanto, a elevada compactação precisa maior número de repetições o que indica maior custo no preparo do solo (Bangita & Rao, 2012). Silva et al. (2014) e Barbosa et al. (2018) demonstraram o decréscimo da produtividade devido à estruturação dos agregados.

A avaliação da estrutura do solo tem sido analisada através da distribuição dos agregados, densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e tensão de pré-consolidação (Lozano et al., 2013; Cavalcanti et al., 2019; Keller et al., 2014). Entretanto, Ball et al. (2007) sustenta que a estrutura do solo pode ser analisada com técnicas da avaliação visual, as quais são comparadas com as propriedades físicas do solo, a fim de tornar estes métodos menos subjetivos. Dentre estes métodos, destacam-se a Avaliação Visual de Estrutura do Solo (VESS) para análise superficial (Ball et al., 2007; Guimarães et al., 2011) e para análise do subsolo, a metodologia SubVESS (Ball et al., 2015).

Diversos estudos têm buscado relacionar o VESS com outros atributos físicos do solo. Guimarães et al. (2017) usaram equações de regressão para avaliar a relação do VESS com a resistência à penetração (RP) e carbono orgânico (CO), onde observaram uma relação significativa entre o VESS e a RP e o CO, mostrando que esta pode ser usada para identificar o estado de degradação da estrutura do solo. Adicionalmente, Cherubin et al. (2017) encontraram correlação entre VESS e densidade, macroporosidade, capacidade de armazenamento de água no solo e resistência à penetração em áreas de floresta, pastagem e canavial.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar indicadores físico e mecânico de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar após sucessivas colheitas semi-mecanizadas.

Materiais e Métodos

Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar Carpina (EECAC/UFRPE) (Figura 1), localizada na Zona da Mata de Pernambuco, Brasil, com

coordenadas geográficas: 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo "AS" tropical chuvoso (Alvares et al., 2014), precipitação média anual em torno de 1.300 mm entre março e julho e temperatura de 24 °C (INMET, 2019).



Figura 1: Localização da área experimental na Estação de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE).

O solo é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de textura franco arenosa (Tabela 1), o qual vem sendo cultivado com cana-de-açúcar de sexto ciclo e submetida à colheita semi-mecanizada (cana crua), com corte manual e transporte pelo uso de caminhões. A área estudada tem uma extensão de 6 ha, sob cultivo de sexto ciclo, onde para implementação da cana-de-açúcar, foi realizado a subsolagem, correção do solo com calcário e gesso, gradagem e sulcagem.

Tabela 1. Caracterização física das camadas de um Argissolo Amarelo Distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar

Camada (m)	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Dp Mg m ⁻³	CC kg kg ⁻¹
0,00-0,20	757	32	210	2,65	0,13
0,20-0,40	730	32	237	2,63	0,14
0,40-0,60	679	26	294	2,63	0,15
0,60-0,80	672	22	305	2,69	0,14
0,80-1,00	652	24	323	2,69	0,14

CC: capacidade de campo; Dp: Densidade de partículas.

Amostragem

Foram selecionados três pontos aleatórios na entrelinha de cultivo, onde se extraíram amostras de solo nas camadas de 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0

m. A amostragem consistiu na abertura de três perfis até 1 m de profundidade, onde foram coletadas 4 amostras indeformadas em cada camada pelo uso do amostrador Ulhand, com anel volumétrico de 0,052 m de altura e 0,047 m de diâmetro, totalizando 60 amostras indeformadas para análise física.

Em cada camada foi coletada uma amostra indeformada para ensaio edométrico, através do amostrador e anel de 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro, totalizando 15 amostras. Além disso, foram coletadas amostras deformadas em cada uma das camadas dos três pontos (perfis) para análise de matéria orgânica e agregados. As amostras foram transportadas ao Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) para análise física-mecânica.

Análises físicas e mecânicas do solo

A granulometria do solo foi determinada através da metodologia do densímetro de Boyoucos (EMBRAPA, 2017), onde a areia foi separada por peneiramento, enquanto a argila pela sedimentação e o silte pela diferença. A determinação da densidade de partículas do solo (D_p) foi realizada através do deslocamento de um volume de líquido ou ar por uma amostra de solo de massa conhecida, pelo método do balão volumétrico com o uso de álcool, seguindo a metodologia da EMBRAPA (2017).

A densidade seca (D_s) foi determinada por meio de amostras indeformadas por meio da relação massa do solo seco sobre volume do solo. A capacidade de campo foi determinada em mesa de tensão, saturando e posteriormente equilibrando as amostras em 100 hPa. Para umidade gravimétrica (w), utilizou-se a massa úmida do solo obtida em campo conforme o método gravimétrico em amostras indeformadas, secas em estufa a 105 °C durante 24 h (EMBRAPA, 2017). O carbono orgânico (CO) foi determinado pelas metodologias de Walkley & Black (1934) e Yeomans & Bremner (1988), mediante a oxidação quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal.

O ensaio de estabilidade de agregados foi realizado com amostras de solo previamente peneiradas entre 4 a 2 mm; 50 g de solo retido, foi umedecida por capilaridade e depositada no conjunto de peneiras de 2, 1, 0,5, 0,250 e 0,106 mm, as quais foram agitadas verticalmente durante 15 minutos no tanque de Yoder (Kemper & Chepil, 1965). As frações retidas em cada peneira foram separadas em recipientes e colocadas em estufa a 105°C durante 24 h para conhecer o peso do solo seco.

Foram calculados os percentuais de agregados estáveis em água por classe de diâmetro médio ponderado (DMP) (Kemper & Chepil, 1965), índice de estabilidade de agregados (IEA) e módulo de finura (Freire & Piedade Jr., 1979) e o AGRI, somatório dos percentuais, a 2,00 mm (Wendling et al., 2005).

A compressibilidade do solo foi avaliada utilizando amostras indeformadas previamente saturadas e equilibradas a 100 kPa (sucção correspondente à capacidade de campo) na câmara de Richard. Após o equilíbrio, foi realizado o ensaio edométrico uniaxial conforme a norma estabelecida pela NBR 12007 (ABNT, 1990), com aplicação de cargas acrescentadas a cada 2 minutos (Macedo et al., 2010): 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa. A determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressibilidade (IC) foram obtidos a partir da curva de compressão pelo método Pacheco Silva (1970) através do pacote soilphysics (Silva & Lima, 2015) no software R.

Resistencia à penetração e análise visual

Para determinação da resistência à penetração do solo, utilizou-se um penetrômetro de impacto com ângulo de cone de 30°, com quatro repetições em cada ponto, sendo efetuadas as leituras a cada 0,05 m até 1 m de profundidade. Nos quais, a resistência à penetração foi obtida pela fórmula dos "Holandeses" (Stolf, 1991), utilizando a transformação da penetração da haste do equipamento (m impacto⁻¹) pela seguinte equação:

$$R = \frac{Mg+mg+\left(\frac{M}{M+m} * \frac{Mg*h}{x}\right)}{A}$$

Onde, R é a resistência à penetração ((kgf.cm⁻²)*0,098 = MPa); M a massa do êmbolo (4 kg); Mg correspondente a 4 kgf; m a massa do aparelho sem êmbolo (3,2 kg); h a altura de queda do êmbolo (0,4 m); x a penetração da haste do penetrômetro (cm impacto⁻¹), e A a área do cone (1,29 cm²).

Foram abertas trincheiras nos três pontos, de 0,1 até 1 m de profundidade com 5 camadas a cada 0,2 m (Figura 2a). Com o auxílio de uma pá reta retirou-se uma amostra indeformada com dimensões de 0,2 × 0,2 × 0,05 m em cada estratificação nas três trincheiras (Figura 2b).

As amostras foram colocadas cautelosamente em recipientes previamente numerados (Figura 2c), manipulando ligeiramente com as mãos para separar os agregados e foram classificadas, atribuindo pontuações de 1 a 5 conforme as

metodologias de Avaliação Visual da Estrutura do Solo - VESS (Ball et al., 2007; Guimarães et al., 2011) para camadas superficiais, e Avaliação Visual da Estrutura do Subsolo – SubVESS (Ball et al., 2015).

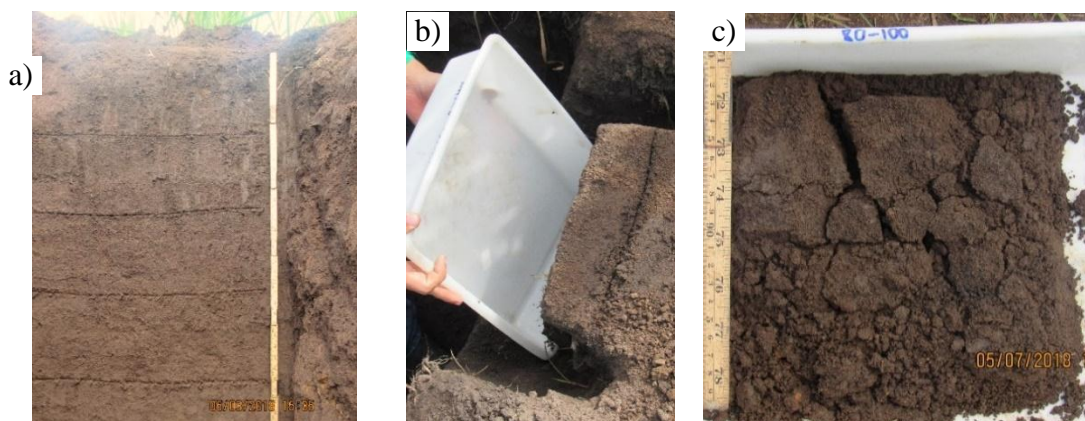


Figura 2. a) Estratificação equitativa do perfil de solo; b) Coleta de amostra indeformada do solo na superfície; c) Amostragem do solo indeformado no subsolo.

Análise de dados

Os dados de resistência à penetração, umidade, densidade seca, porosidade, carbono orgânica, análise visual, percentagem de diâmetros de agregados e tensão de pré-consolidação foram submetidos à análise descritiva e teste de normalidade Shapiro-Wilk com 5% de significância. Foi aplicada a análise de variância, onde as camadas foram utilizadas como tratamentos e os três pontos da área como repetições, por meio da técnica de agrupamento Scott-Knott através do pacote ExpDes (Ferreira et al., 2018) no Software R 3.5.2 (2018).

Assim mesmo, foi aplicado a análise discriminantes canônicas (ADC), em uma abordagem multivariada, com o intuito de agrupar e reduzir variáveis originais através do pacote *candisc* (Friendly & Fox, 2017), no Software R. O gráfico bidimensional (Biplot) foi utilizado para representar as variáveis canônicas com alta retenção da variabilidade experimental. As médias das variáveis canônicas, para cada tratamento, foram comparadas por intervalos de confiança a 95% de significância.

Resultados e Discussão

Nas estratificações dos perfis do solo observou-se maior conteúdo de areia do que silte e argila (Tabela 1), entretanto, os valores de argila foram aumentados gradualmente, principalmente nas profundidades de 0,6-1,0 m, uma vez que as partículas mais finas podem ser consideradas móveis no interior do perfil, onde no estudo de Tavares et al. (2017) e Cavalcanti et al. (2019) para um Argissolo Amarelo

distrocoeso com análise de 0-0,4 m foi evidente o incremento de teor de argila. Nas propriedades físicas do solo houve efeito da profundidade, os valores de densidade seca, nas distintas camadas, onde estes variaram de 1,50 a 1,70 kg dm⁻³ (Figura 3a).

A camada de 0,2-0,4 m apresentou maior densidade seca (Ds) em comparação com as outras estratificações do perfil de solo, este acréscimo foi estatisticamente significativo (Figura 3a), corroborando com Cavalcanti et al. (2019), onde, ocorreu o acréscimo da densidade em diversos estágios da cana-de-açúcar da Zona da Mata de Pernambuco. Enquanto que, nas outras camadas houve menor densidade e não apresentaram diferença significativa. O aumento na densidade de 0,2-0,4 m pode ser o resultado da profundidade de preparo do solo e o número de operações no solo, devido a área já ter sido submetida a cinco colheitas.

A menor umidade foi encontrada nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m e diferiram estatisticamente das demais camadas do solo (Figura 3b). O aumento da umidade no subsolo pode ser o resultado da percolação, drenagem gravitacional e da retenção de água pela concentração de argila, assim como pela porosidade, estrutura e profundidade (Tebebu et al., 2017).

A menor porosidade ocorreu na camada 0,2-0,4 m e diferiu estatisticamente das demais camadas estudadas (Figura 3c), corroborando com Ortiz et al. (2017), onde, ocorreu o acréscimo da porosidade na superfície. O aumento desta porosidade pode ser o resultado do acúmulo de matéria orgânica e do manejo do solo.

O carbono orgânico (CO) é uma grandeza proporcional à presença da matéria orgânica, característico de áreas com aplicação da palhada sobre o solo durante a colheita sem queima de maneira manual ou mecanizada para melhorar a qualidade do solo, favorecendo à formação de agregados e aeração do solo (Almeida et al., 2016; Soriani et al., 2018). Houve correlação entre a maior concentração do CO e percentagem dos agregados >2 mm na camada de 0,0-0,2 m (Figura 3d).

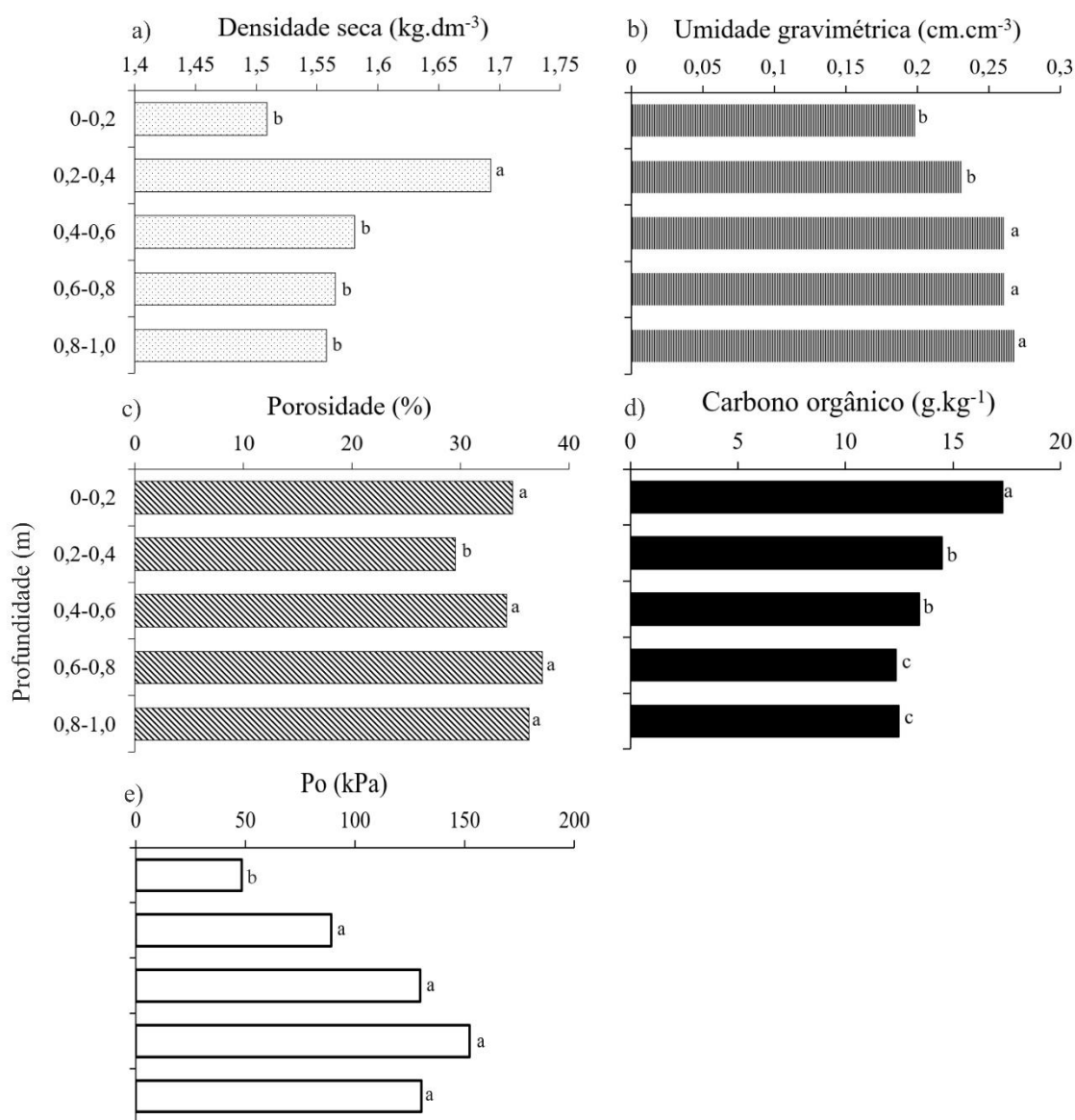


Figura 3. a) Densidade seca; b) umidade gravimétrica; c) porosidade; d) carbono orgânico; e) tensão de pré-consolidação (P_o) de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.

A concentração de carbono orgânico na superfície, diferiu estatisticamente com as demais camadas. A alta concentração de carbono orgânico deve-se ao acúmulo de matéria orgânica devido às palhas depositadas sobre o solo depois do corte manual da cana queimada, corroborado com os estudos de Ortiz et al. (2017) e Tavares et al. (2017) em sistemas de colheita semi-mecanizado de cana-de-açúcar.

A menor tensão de pré-consolidação foi observada na camada de 0-0,2 m (Figura 3e) e diferiu estatisticamente das demais camadas, sendo esta a mais susceptível a compactação devido ao menor trecho elástico, uma vez que, as outras estratificações apresentam limite elástico de aproximadamente 100-150 kPa. Dentre os veículos de

carga com maior aplicação de tensão normal no solo é o reboque, segundo Lozano et al. (2013) as tensões verticais deste veículo foram 880 kPa na superfície, ao ser propagada em profundidade as tensões chegaram entre 60 e 80 kPa a 0,5 m. Isto significa que as camadas superficiais são susceptíveis à compactação adicional.

A resistência à penetração (Figura 4a) teve um aumento na camada 0,2-0,4 m, alcançando valores de 5 MPa, com decréscimo gradual de 0,4 m até 1,0 m de profundidade. A maior resistência à penetração foi localizada na segunda camada, sendo significativamente diferente das demais a 5% de probabilidade, este incremento coincidiu com o acréscimo da densidade seca na camada de 0,2-0,4 m corroborando com Tavares et al. (2017), que observaram a maior RP nessa profundidade e com intensidade semelhante. Na camada 0,8-1,0 m houve um ligeiro aumento da RP, podendo ser o resultado do acúmulo de argila.

A análise visual da estrutura do perfil de solo (Figura 4b), a estratificação 0,2-0,4 m recebeu o maior score de avaliação visual, sendo classificado como pobre segundo a metodologia VESS (Ball et al., 2007), o que corresponde a um solo muito compactado devido à dificuldade de romper-se. Segundo o observado, nesta camada houve ausência de raízes e a RP foi de 5,15 MPa e 1,66 kg dm⁻³ de densidade seca. Na Figura 4c, verifica-se a camada compactada, encontrada na profundidade 0,2-0,3 m aproximadamente, correspondente à máxima resistência à penetração do perfil.

A camada 0,4-0,6 m correspondeu à camada de transição (Figura 4c), uma vez que, comportou-se entre compacto e firme, pois, resulta de uma mistura de agregados porosos <10 cm e com presença de torrões angulares duros, segundo a metodologia SubVESS (Ball et al., 2015) devido à identificação e avaliação da camada de transição antrópica imediatamente abaixo do solo superficial, geralmente >0,3 m de profundidade. Danos severos na compactação foram encontrados até 0,65 m de profundidade usando SubVESS por Obour et al. (2017), onde, a compactação do subsolo induzida pelo tráfego de máquinas de carga e validada por medidas quantitativas de laboratório (porosidade).

As demais camadas foram classificadas como friável devido à facilidade de desagregação e presença de raízes nas profundidades 0-0,2 e 0,45-0,70 m. Peigné et al. (2013) quantificaram a capacidade das raízes de penetrar em zonas compactadas na camada de transição mediante indicadores de número de tocas de minhoca por m² contadas em uma superfície horizontal na base da camada de transição e examinando o número de fissuras, demonstrando que, estes espaços podem explicar o desenvolvimento radicular.

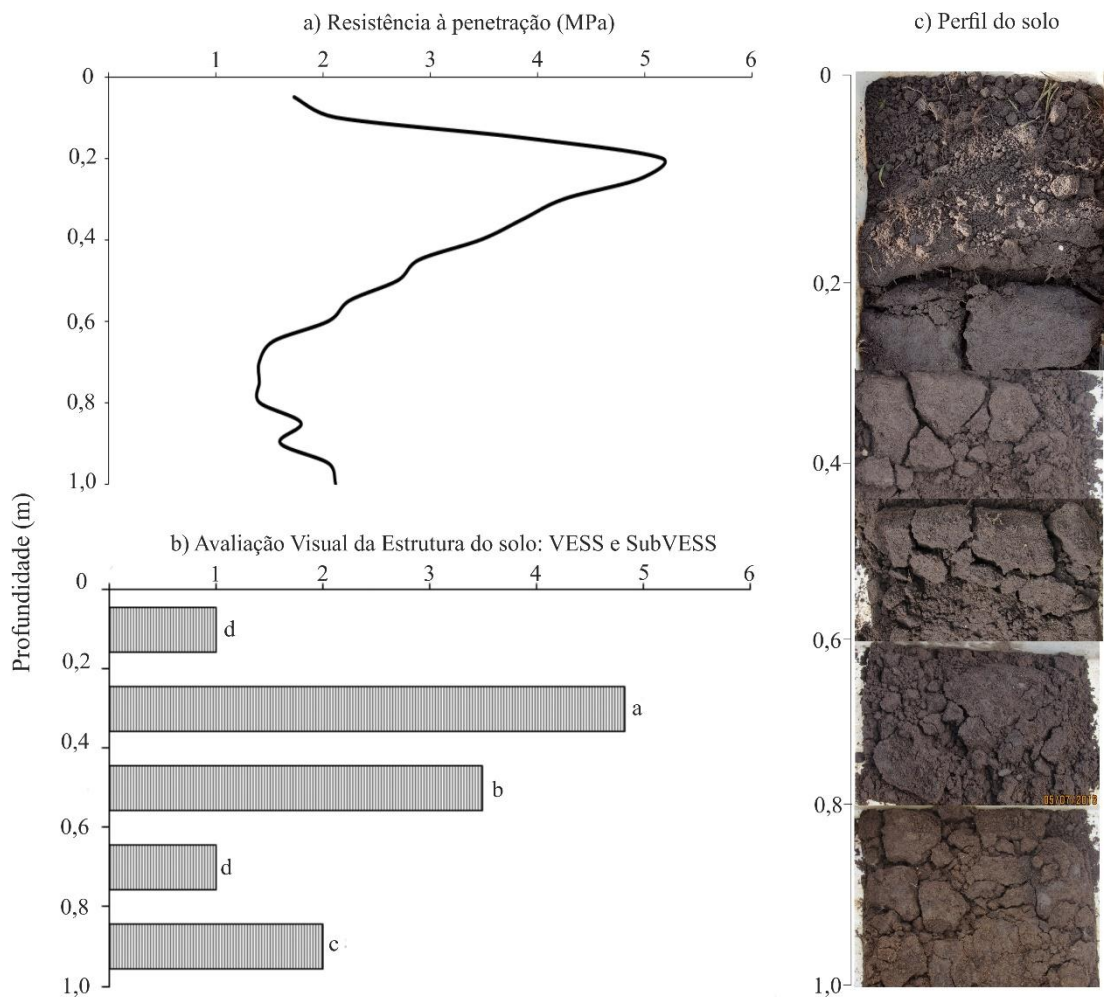


Figura 4. a) Resistência à penetração até 1 m; b) Avaliação visual da estrutura do solo pelas metodologias VESS e SubVESS; c) Agregado do perfil do solo.

A camada 0,4-0,6 m apresentou maior nota da avaliação do SubVESS (3,5) devido à presença de torrões, enquanto que, na profundidade 0,6-0,8 m verificou-se uma boa qualidade da estrutura, presença radicular, agregados <2 cm e fácil destorroamento, avaliada como friável (1). Entretanto, a camada de 0,8-1,0 m foi classificada como moderadamente friável devido ao aumento de dureza e presença de torrões pequenos.

Os maiores percentuais de agregados >2 mm corresponderam à estratificação de 0,6-0,8 m, seguido pela profundidade de 0-0,2 m, onde, as demais profundidades apresentaram menor percentual de agregados >2 mm (Figura 5).

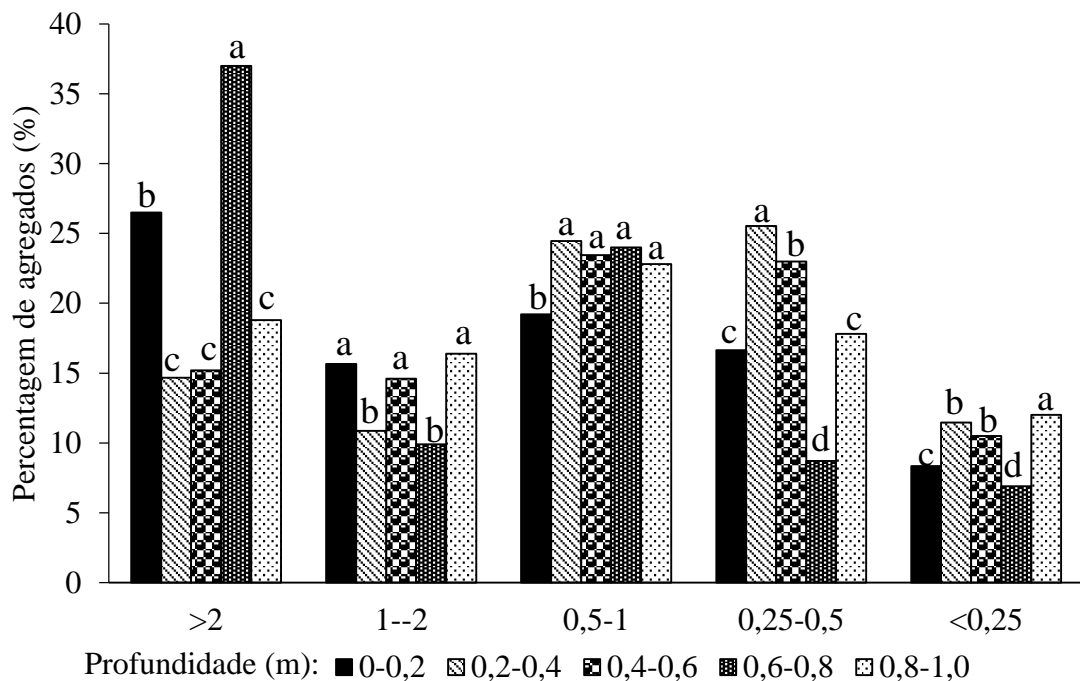


Figura 5. Distribuição de percentagem de diversos diâmetros de agregados estáveis em água em diversas camadas de um perfil de solo de 1 de profundidade.

A elevada concentração desses agregados no subsolo deve-se a possível camada de impedimento correspondente à profundidade de 0,2-0,4 e maior densidade de 0,2-0,6 m, corroborando com os resultados de Tavares et al. (2017).

Os maiores percentuais de agregados com diâmetro <0,25 mm ocorreram nas camadas 0,8-1,0 m, seguido de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Oliveira et al. (2010) verificaram a mesma tendência de 0-0,6 m de profundidade, onde, houve um acréscimo do percentual de <0,25 mm até a 0,2-0,4 m com posterior decréscimo na camada 0,4-0,6 m.

Na profundidade de 0-0,2 m, houve um decréscimo gradativo no percentual dos diâmetros, onde, (> 2) > (0,5-1) > (1-2) > (0,25-0,5) > (<0,25) mm, com exceção do percentual de 1-2 mm. Na profundidade de 0,2-1,0 m, a maioria dos agregados de 0,5-1 e 0,25-0,5 mm apresentaram percentuais semelhantes, em torno de 25 %. Com exceção da profundidade de 0,6-0,8 m, que apresentou maior percentual de >2 mm. Verifica-se que na Figura 5, os percentuais de diâmetro >2 (D2) e <0,25 mm (D025) encontram-se diametralmente opostos, em que, resultados semelhantes foram observados por Cavalcanti (2018).

Os valores médios do Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), módulo de finura (MF) e AGRI apresentaram médias conforme a Tabela 2, onde, os menores valores médios foram característicos das camadas 0,2-0,4; 0,4-0,6 e 0,8-1,0 m. Entretanto, a camada com maiores valores médios pertence à

camada 0,6-0,8 m, seguido pela camada 0-0,2 m, indicando maior estabilidade de agregados nestas camadas.

Tabela 2. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), módulo de finura (MF) e AGRI dos agregados sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes profundidades.

Profundidade (m)	DMP	DMG	MF	AGRI
0-0,2	1,25	0,99	2,94	26,50
0,2-0,4	0,81	0,73	2,30	12,80
0,4-0,6	0,96	0,78	2,61	8,30
0,6-0,8	1,45	1,26	3,03	37,10
0,8-1,0	0,71	0,85	1,89	16,20

As variáveis canônicas Can1 e Can2 explicaram 99% da variância dos dados (Figura 6), portanto, confere uma alta percentagem explicação da variação total dos atributos físicos e mecânicos nas diferentes profundidades do perfil de solo. A canônica (Can1) explicou 92,2% e a canônica (Can2) representou apenas 6,8%.

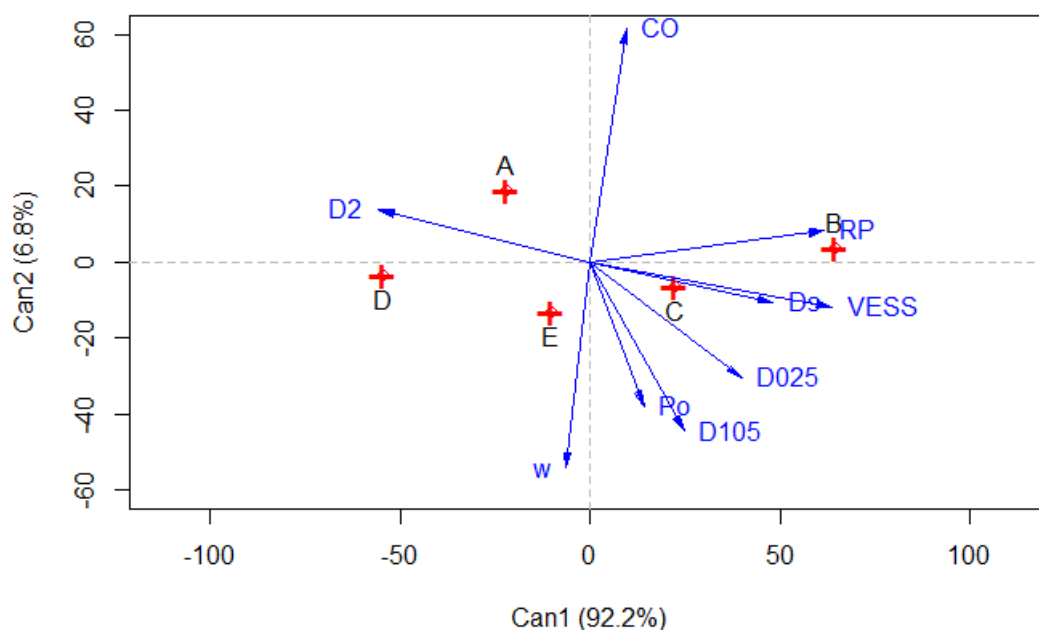


Figura 6. Análise multivariada dos parâmetros físicos e mecânicos do solo: Densidade seca (D_s), tensão de pré-consolidação (P_o), percentagem de agregados com diâmetro >2 mm (D_2), 0,5-1 mm (D_{105}) e $<0,25$ mm (D_{025}), análise visual da estrutura (VESS), resistência à penetração (RP), umidade gravimétrica (w) e carbono orgânico (CO) na camada A (0-0,2 m), B (0,2-0,4 m), C (0,4-0,6 m), D (0,6-0,8) e E (0,8-1,0 m).

Houve relação entre o agregado com diâmetro >2 mm (D_2) e da MO na profundidade de 0-0,2 m (A), em relação ao Can1(92,2 %) e Can2 (6,8 %) (Figura 6),

constatando a concentração da matéria orgânica na superfície em função do tempo, como verificado por diversos autores, os quais, verificaram a concentração de matéria orgânica na superfície de 0-0,3 m em decorrer dos ciclos da cana-de-açúcar (Marinho et al., 2016; Almeida et al., 2016; Ortiz et al., 2017; Cavalcanti, 2018), uma vez que a deposição de palhada na superfície pode influenciar nas propriedades físicas do solo, como a estabilidade de agregados (Tavares et al., 2017; Soriani et al., 2018).

O comportamento dos atributos do solo em diferentes camadas, onde: A, refere-se à profundidade 0-0,2 m; B 0,2-0,4 m; C, 0,4-0,6 m; D (0,6-0,8); e E para camada 0,8-1,0 m, os quais representam heterogeneidade ao longo do perfil, uma vez que há diferença entre si. Resultados similares foram encontrados por Cavalcanti et al. (2019) no estudo de diferentes áreas de plantio e em duas profundidades, com representação dos componentes canônicos de 97 % da variação total dos dados físicos e mecânicos do solo.

Os vetores mais distantes do centro na análise multivariada canônica (Figura 5), possuem maior contribuição com a variação total do conjunto de dados. Verifica-se que a percentagem de diâmetros de agregados >2 mm na camada 0-0,2 m (A), pode estar influenciado pela concentração de CO e RP. Os vetores da camada 0,2-0,4 m (D) se correlacionaram significativamente os parâmetros físico-mecânico e visual: Ds, RP e VESS. Enquanto para o subsolo, na profundidade 0,4-0,6 m houve relação entre a tensão de pré-consolidação e percentagem de agregados de diâmetros $<0,25$ e $0,5-1$ mm.

Keller & Hakanssona (2010) encontraram uma forte correlação entre o conteúdo de matéria orgânica e densidade do solo. No estudo de Cavalcanti et al. (2019) houve correlação canônica entre umidade e CO. Cherubin et al. (2017) encontraram correlação entre VESS e densidade, macroporosidade, capacidade de armazenamento de água no solo e resistência à penetração em áreas da floresta, pastagem e sob cultivo de cana-de-açúcar.

Conclusões

A concentração de carbono orgânico, a percentagem de agregados de >2 mm, alta porosidade, análise visual friável e baixa tensão de pré-consolidação indicaram uma boa qualidade da camada 0-0,2 m.

O efeito inverso dos vetores canônicos do percentual de agregados >2 mm com a densidade seca e VESS mostrou a perda da qualidade do solo.

O alto score de VESS, menor porosidade e maior concentração de agregados de $0,25$ mm indicou menor qualidade da camada 0,2-0,4 m.

Referências Bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Ensaio de adensamento unidimensional - NBR 12007. Rio de Janeiro, p.13, 1990.
- Albert, R. P.; Pinto, M. A. B.; Lima, C. L. R.; Santos, F. J.; Scheunemann, T.; Miguel, P. Physico-mechanical attributes of a Typic Hapludox in areas with different sugarcane cultivation times. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, p.1-8, 2018.
- Almeida, L. S.; Ferreira, V. A. S.; Fernandes, L. A.; Frazão, L. A.; Oliveira, A. L. G.; Sampaio, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1539-1547, 2016.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2014.
- Amaral, K. F. S.; Rosa, H. A.; Giese, V.; Montiel, C. B.; Brondani, S. T.; Secco, D. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Argiloso após compactação induzida mecanicamente. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v.11, p.308-316, 2017.
- Ball, B. C.; Batey, T.; Munkholm, L. J. Field assessment of soil structural quality – A development of the Peerkamp test. *Soil use and Management*, v.23, p.329-337, 2007.
- Ball, B. C.; Batey, T.; Munkholm, L. J.; Guimarães, R. M. L.; Boizard, H.; McKenzie, D. C.; Hargreaves, P. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. *Soil and Tillage Research*, v.148, p.85-96, 2015.
- Bangita, B.; Rao, B. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, v.189, p.351-356, 2012.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Balanço nacional de cana-de-açúcar. Secretaria de Produção e Agroenergia, p.3, 2007. <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-balanco-nacional-da-cana-de-acucar-e-agroenergia-2007/balanco-nacional-da-cana-de-acucar-e-agroenergia-2007.pdf>> Acessado em 13/01/2019.
- Cavalcanti, R. Q. Atributos físicos e mecânicos do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro. Dissertação em Engenharia Agrícola-Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

- 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 and Tillage Research*, v.189, p.140-147, 2019.
- Cherubin, M. R.; Franco, A. L.; Guimarães, R. M.; Tormena, C. A.; Cerri, C. E.; Karlen, D. L.; Cerri, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil and Tillage Research*, v.173, p.64-74, 2017.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos de análise de solo. 3ª Edição, Brasília, p.573, 2017.
- Ferreira, E. B.; Cavalcanti, P. P.; Nogueira, D. A. Experimental Designs. R package version 1.2.0, 2018.
- Friendly, M.; Fox, J. candisc: Visualizing Generalized Canonical Discriminant and Canonical Correlation Analysis. R package version 0.8-0, 2017.
- Guimarães, R. M. L.; Ball, B. C.; Tormena, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, v.27, p.395-403, 2011.
- Guimarães, R. M.; Keller, T.; Munkholm, L. J.; Lamandé, M. Visual soil evaluation and soil compaction research. *Soil and Tillage Research*, v.173, p.1-3, 2017.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010. Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>.
Acesso em: 01/04/2019.
- Keller, T.; Hakansson, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, v.154, p.398-406, 2010.
- Keller, T.; Berli, M.; Ruiz, S.; Lamandé, M.; Arvidsson, J.; Schjønning, P.; Selvadurai, A. P. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, v.140, p.106-117, 2014.
- Kemper, W. D.; Chepil, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C. A.; Evans, D. D.; White, J. L.; Ensminger, L. E.; Clark, F. E. (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 2.ed. p.499-510.
- Klein, V. A.; Madalosso, T.; Baseggio, M. Ensaio de Proctor normal—análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.12, p.199-203, 2014.

- 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.
- Marinho, M. A.; Pereira, M. W.; Vázquez, E. V.; Lado, M.; González, A. P. Depth distribution of soil organic carbon in an Oxisol under different land uses: stratification indices and multifractal analysis. *Geoderma*, v.287, p.126-134, 2017.
- Obour, P. B.; Schjønning, P.; Peng, Y.; Munkholm, L. J. Subsoil compaction assessed by visual evaluation and laboratory methods. *Soil Tillage and Research*, v.173, p.4–14, 2017.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F.; Pedrosa, E. M. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, 2010.
- Ortiz, P. F.; Rolim, M. M.; Lima, J. L.; Pedrosa, E. M.; Dantas, M. S.; Tavares, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v.11, p.62-70, 2017.
- Pacheco Silva, F. A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. *Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, v. 2, p. 225-232, 1970.
- Peigné, J.; Vian, J.F.; Cannavacciuolo, M.; Lefevre, V.; Gautronneau, Y.; Boizard, H. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method. *Soil and Tillage Research*, v.127, p.13–25, 2013.
- R version 3.5.2. The R Foundation for Statistical Computing. Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit), 2018.
- Sampietro, J. A.; Lopes, E. S.; Reichert, J. M. Compactação causada pelo tráfego de Feller Buncher e Skidder em um neossolo regolítico sob distintas umidades. *Ciência Florestal*, v.25, p.239-248, 2015.
- Silva, T. G. F.; Moura, M. S. B.; Zolnier, S.; Souza, L. S. B. Accumulated dry biomass, partitioning and industrial yield of irrigated sugarcane in the Brazilian Semi-Arid. *Revista Ceres*, v.61, p.686-696, 2014.
- Silva, A. R.; Lima, R. P. Soilphysics: Na R package to determine soil preconsolidation pressure. *Computer and Geosciences*, v.84, p.54-60, 2015.
- 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. *Soil and Tillage Research*, v.181, p.1-10, 2018.

- Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, v.52, p.591-611, 1965.
- Scott, A. J.; M. Knott. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v.30, p.507-512, 1974.
- Soriani, R.; Santos, E. D.; Leite, C. A. M.; Barbosa, C. A. C.; Chagas, T. L. K.; Amaral, H. F. Avaliação dos agregados de um Latossolo Vermelho em sistema plantio direto após preparos mecânicos de subsolagem e gradagem. *Revista Terra e Cultura*, v.34, p.103-116, 2018.
- Stolf, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, p.229-235, 1991.
- Szmrecsányi, T.; Moreira, E. P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. *Estudos avançados*, v.5, p.57-79, 1991.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M.; Magalhães, A. G.; Silva, Ê. F. D. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.752-757, 2017.
- Tebebu, T. Y.; Bayabil, H. K.; Stoof, C. R.; Giri, S. K.; Gessess, A. A.; Tilahun, S. A.; Steenhuis, T. S. Characterization of degraded soils in the humid Ethiopian highlands. *Land Degradation and Development*, v.28, p.1891-1901, 2017.
- Walkley, A.; Black, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, v.37, p.29-38, 1934.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476. 1988.2