

WAGNER LUÍS DA SILVA SOUZA

**COMPORTAMENTO FÍSICO – MECÂNICO DE DOIS SOLOS CULTIVADOS COM
CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Profº. Drº. José Ramon Barros Cantalice

RECIFE – PE

2015

nnjk

Ficha catalográfica

S729c Souza, Wagner Luís da Silva
Comportamento físico-mecânico de dois solos
cultivados dois solos cultivados com cana-de-açúcar
em diferentes sistemas de manejo / Wagner Luís
da Silva Souza. – Recife, 2015.
183 f. : il.

Orientador(a): José Ramon Barros Cantalice.
Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência do
Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Agronomia, Recife, 2015.
Referências.

1. Mecânica do solo 2. Cisalhamento
3. Compressibilidade 4. Ângulo de atrito interno 5. Coesão
I. Cantalice, José Ramon Barros, orientador II. Título

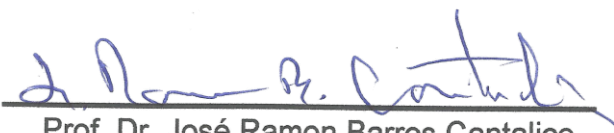
CDD 631.4

WAGNER LUÍS DA SILVA SOUZA

**COMPORTAMENTO FÍSICO – MECÂNICO DE DOIS SOLOS CULTIVADOS COM
CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.


Tese defendida e aprovada em 25 de fevereiro de 2015, pela banca examinadora:



Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

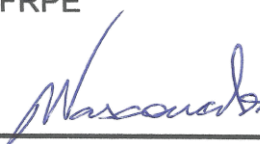
(Orientador)

PPG-Ciência do Solo / UFRPE



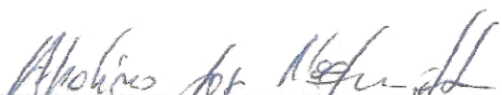
Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

PPG-Ciência do solo / UFRPE



Prof. Dr. Romero F. B. de Vasconcelos

PPG-DTR / UFRPE



Prof. Dr. Apolino José Nogueira da Silva

(EAJ / UFRN)



Prof. Dr. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

DEC/UPE/POLI

Recife – PE

2015

Aos meus pais, Otávio Francisco e
Jucilene Olegário, por todo amor
incondicional e carinho dedicados a mim.

DEDICO

**“Estou sempre alegre. Essa é a melhor
maneira de resolver os problemas da vida.”
(Charles Chaplin)**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder e me conduzir a mais uma vitória.

Aos Meus pais, por entender, segurar minha mão e me orientar, nas várias etapas da vida, além de sempre dedicar a mim um amor inexplicável.

A minhas irmãs, Vanessa, Andresa e Aline, pelos momentos de compreensão durante essa jornada. Cvbnm,

A minha avó, Luzia Ester da Silva por ser simplesmente um exemplo de vida.

A minha tia Severina Maria de Souza Silveira (tia Fia) por ser a pessoa maravilhosa que é, e a todos meus tios, tias e primos, especialmente Alberto Silveira e Eduardo Oliveira.

A Camila Dias, por estar ao meu lado durante essa jornada e muito me compreender nas horas mais importantes.

Ao professor José Ramon Barros Cantalice, pela orientação, amizade, apoio, ensinamentos e paciência a mim conferidos e passados durante todos os anos, da graduação ao doutorado.

Ao professor Brivaldo Gomes de Almeida, pela orientação, amizade, apoio, ensinamentos e paciência a mim conferidos e passados durante a pós-graduação.

Aos professores do PPGCS, pelo compartilhamento do conhecimento de fundamental importância para o enriquecimento do saber.

Aos companheiros e amigos do Laboratório de Manejo e Conservação do Solo, pelos momentos de alegria, Cintia Cordeiro, Yuri Jacques, Douglas Monteiro, Fernando Moraes, Michelangêlo, Carlos Vitor, Ermon, Cícero.

Aos amigos, Guilherme Pessoa, Jaílson, Diego Melo, Heitor, Hildebrandi, Kairon, Valério, Ernan, Tiago Simone, Washington Santiago, Wellington e, a todos os amigos que fiz no Programa da Pós Graduação em Ciência do Solo da UFRPE.

Aos amigos da Usina Trapiche, os engenheiros agrônomos Aloísio Cordeiro, Antônio Tabosa, Amaro, Caubi e Marcos.

Funcionários da Usina Trapiche, Antônio Vanderley, Eduardo Oliveira, Emerson, Sr° Gilvan, Genilton (Geno), Aberto Paulino e Zito fiscal, Célio Gama, Jurandir, Ângela entre outros.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por todo conhecimento adquirido e credibilidade a mim depositados.

Aos funcionários da UFRPE, em especial Maria do Socorro, por todo apoio prestado e ao amigo Josué.

A CAPES pela ajuda financeira por meio da bolsa de estudos.

Meu muito obrigado a todos

SÚMÁRIO

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO I.....	viii
LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO II.....	x
LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO I	xi
LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO II	xii

CAPÍTULO – I COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE UM GLEISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO.....

RESUMO	6
ABSTRACT.....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
HIPÓTESES	15
OBJETIVO GERAL.....	15
MATERIAL E MÉTODOS.....	16
RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

CAPÍTULO – II COMPORTAMENTO FÍSICO - MECÂNICO DE UM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

RESUMO	103
ABSTRACT.....	104
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	105
HIPÓTESES	113
OBJETIVO GERAL.....	114
MATERIAL E MÉTODOS.....	114
RESULTADOS E DISCUSSÕES	133
CONCLUSÃO	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

LISTA DE FIGURA – CAPÍTULO I

Figura 1 - Curva de compressão do solo quando o mesmo foi submetido a pressões prévias.....	11
Figura 2 - Mapa de solos do município de Sirinhaém-PE	17
Figura 3 - Carregamento de cana nas áreas de várzeas.....	19
Figura 4 - Aparelho de Yooder.....	22
Figura 5 - Amostrador eletromagnético Viatest VSM 200.....	23
Figura 6 - Coleta com o amostrador tipo Uhland.....	25
Figura 7 - Proteção das amostras no campo.....	25
Figura 8 - Mesa de tensão (Lab. física do solo UFRPE), com detalhes da vista superior (a); lateral (b) e drenagem da água dos poros na tensão aplicada (c).....	28
Figura 9 - Câmaras de Richards (Lab. física do solo UFRPE). Vista lateral (a e b) e superior (c).....	29
Figura 10 - Penetrômetro de bancada (Lab. física do solo UFRPE).....	30
Figura 11 - Adaptação do amostrador de Uhland.....	31
Figura 12 - Retirada de amostras com o Uhland adaptado.....	32
Figura 13 - Proteção das amostras de compressibilidade de um Gleissolo.....	32
Figura 14 - Prensa de adensamento (a), com detalhes para as peças adaptadas (b e c).....	33
Figura 15 - Extensômetro de carga da prensa de adensamento (a) e sua deformação correspondente às pressões em estudo (b).....	34
Figura 16 - Determinação da tensão de précompressão pelo método de Pacheco Silva.....	34
Figura 17 - Aparelho de cisalhamento direto.....	37
Figura 18- Amostras de cisalhamento na mesa de tensão.....	37
Figura 19 - Sequência de preparo de amostras para cisalhamento, desde a coleta (a) até o término do ensaio (n).....	39
Figura 20 - Conjunto de anéis comparadores de deformações.....	40
Figura 21 - Representação gráfica da obtenção da coesão e do ângulo de atrito interno do solo.....	491
Figura 22 - Gráfico da distribuição da nuvem de variáveis no círculo de correlações nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).....	49

Figura 23 - Dendograma representando os grupos formados pelos sistemas de manejo nas profundidades de 0 – 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).....	51
Figura 24 - Análise discriminante para os sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b) em função da análise de agrupamentos.	53
Figura 25 - Curvas características de retenção de água no solo dos sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).....	55
Figura 26 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Gleissolo Háplico submetido a cinco sistemas de manejo com amostras equilibradas em três umidades volumétricas.....	60
Figura 27 - Coesão de um Gleissolo Háplico em função do carbono orgânico do solo de todos os sistemas de uso estudados.....	64
Figura 28 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais e horizontais.	64
Figura 29 - Processos de deformações horizontais e verticais do Gleissolo Háplico durante os ensaios de cisalhamento direto.	65
Figura 30 - Densidade do solo dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0 – 0,20 m)......	69
Figura 31 - Densidade do solo dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0,20 – 0,40 m).	70
Figura 32 - Índice de vazios dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0 – 0,20 m)......	71
Figura 33 - Índice de vazios dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0,20 – 0,40 m).	72
Figura 34 - Regressão do índice de compressibilidade com diversos atributos do solo na profundidade de 0-0,20 m.	75
Figura 35 - Regressão do índice de compressibilidade com diversos atributos do solo na profundidade de 0,20-0,40 m.	76
Figura 36 - Pressões do rodado dianteiro (D) e traseiro (T) do caminhão.	77
Figura 37 - Rodado dianteiro (D) e traseiro (D) do trator agrícola.....	78
Figura 38 - Pressões geradas pelo rodado de veículos agrícolas no solo.	78

Figura 39 - Bulbo de pressões no solo (kPa) dos rodados das máquinas agrícolas.	800
Figura 40 - Densidade do solo máxima de compressão em função da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b).....	82

LISTA DE FIGURA – CAPÍTULO II

Figura 1 - Distribuição das tensões nas fases sólida, líquida e gasosa em solo não saturado quando submetido a carga norma.....	105
Figura 2 - Curva de compressão do solo quando o mesmo não foi submetido a pressão prévia (a) e quando o solo já passou por compressão prévia (b).....	108
Figura 3 - Representação das forças atuantes no teste de cisalhamento direto.....	111
Figura 4 - Carregamento de cana nas áreas de encostas (a), com detalhes para o relevo em “Mar de Morros” (b).....	116
Figura 5 - Gráfico da distribuição das variáveis no círculo de correlações nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).....	136
Figura 6 - Dendograma representando dos grupos formados pelos sistemas de manejo nas profundidades de 0 – 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).	137
Figura 7 - Análise discriminante para os sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b) em função dos grupos formados na análise de agrupamentos.	138
Figura 8 - Curva característica de retenção de água no “solo” dos sistemas de manejo do Argissolo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).....	140
Figura 9 - Envoltórias de resistência do Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo (a) mata nativa, (b) torta de filtro e (c) vinhaça em três níveis de umidade	144
Figura 10 - Tensão de cisalhamento nas tensões normais de 50 e 100 kPa em função da umidade volumétrica do solo.	147
Figura 11 - Tensão de cisalhamento nas tensões normais de 150 e 200 kPa em função da umidade volumétrica do solo	149
Figura 12 - Processos de deformações horizontais e verticais nas tensões de 50 e 100 kPa nos níveis de umidade em estudo.....	149

Figura 13 - Processos de deformações horizontais e verticais nas tensões de 150 e 200 kPa nos níveis de umidade em estudo.....	150
Figura 14 - Valores de densidade do solo em função da pressão aplicada nos diferentes níveis de umidade (0,0 – 0,20 m).	153
Figura 15 - Valores de densidade do solo em função da pressão aplicada nos diferentes níveis de umidade (0,20 – 0,40 m).	153
Figura 16 - Índice de vazios em função da pressão aplicada nos ensaios de compressibilidade do solo a camada de 0 – 0,20 m.....	156
Figura 17 - Índice de vazios em função da pressão aplicada nos ensaios de compressibilidade do solo a camada de 0,20 – 0,240 m.	156
Figura 18 – Regressão do índice de compressibilidade em função da densidade inicial do solo a o Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0 - 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).....	157
Figura 19 - Pressões aplicadas na superfície solo geradas pelos rodados dianteiros (a) e traseiro (b) da carregadeira de cana-de-açúcar.	158
Figura 20 - Pressões aplicadas na superfície solo geradas pelos rodados dianteiros (a) e traseiros (b) do trato BH 180.....	159
Figura 21 - Distribuição da pressão aplicada na superfície do solo pelos maquinários agrícolas até 1 metro de profundidade.....	160
Figura 22 - Bulbos de pressões dos rodados dianteiros e traseiros da carregadeira e do trator agrícola.....	161

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO I

Tabela 1 – Cordenadas geográficas das áreas selecionadas para o estudo.....	16
Tabela 2 - Rendimento agrícola das áreas cultivadas com cana-de-açúcar.....	18
Tabela 3 - Valores médios de carga sobre os rodados e insuflagem dos pneus.	20
Tabela 4 - Resumo do número de amostras coletadas no realizados no Gleissolo Háplico em todos os sistemas de manejo.	20
Tabela 5 - Caracterização física do Gleissolo Háplico nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0 – 0,20 (m).....	43
Tabela 6 - Caracterização física do Gleissolo Háplico nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0,20 - 0,40 (m).	43
Tabela 7 - Componentes principais para as variáveis em estudo na profundidade de 0-0,20 m.**** Variáveis eliminadas.*Variável em análise.....	47
Tabela 8 - Componentes principais para as variáveis em estudo na profundidade de 0,20–0,40 m.**** Variáveis eliminadas.*Variável em análise	48
Tabela 9 - Valores de coesão de um Gleissolo Háplico em diferentes sistemas de manejo para a profundidade de 0 – 0,20 m.....	60
Tabela 10 - Valores do ângulo de atrito interno de um Gleissolo Háplico em diferentes sistemas de manejo para a profundidade de 0 – 0,20 m.....	61
Tabela 11 - Valores médios das pressões de précompressão (σ_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas.	67
Tabela 12 - Índice de compressibilidade dos diferentes sistemas de manejo.....	74
Tabela 13 - Densidade do solo (D_s), Densidade máxima de compressão ($D_{smáx}$), umidade crítica de compressão (U_{cc}) e grau de compactabilidade do solo obtidos pelos ensaios de compressibilidade, considerando os cinco sistemas de manejo. ..	84
Tabela 14 - Limite de plasticidade (LP), umidade crítica de compactação correspondente a 90% do limite de plasticidade ($U_{CC(90\%LP)}$), umidade crítica de compressão (U_{cc}^*) pelo teste de compressibilidade, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) considerando os sistemas de manejo e profundidades.....	86
Tabela 15 - Resistência mecânica à penetração em laboratório (kPa) e umidade volumétrica do solo nos diferentes sistemas de manejo.....	87

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO II

Tabela 1- Coordenadas geográficas das áreas selecionadas para o estudo.....	114
Tabela 2- Rendimento agrícola das áreas cultivadas com cana-de-açúcar.....	115
Tabela 3 - Valores médios de carga sobre os rodados e insuflagem dos pneus ...	117
Tabela 4 - Resumo do número de amostras coletadas no realizados no Argissolo Amarelo nos dois sistemas de manejo e na mata.	117
Tabela 5 - Caracterização física e carbono orgânico total do Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de manejo na profundidades de 0 – 0,20 (m)....	130
Tabela 6 - Caracterização física e carbono orgânico total do Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0,20 – 0,40 (m).....	130
Tabela 7 - Análises de componentes principais das variáveis físicas e carbono orgânico do solo na profundidade 0 – 0,20 m.***** Variáveis eliminadas. * variáveis em estudo.	134
Tabela 8 - Análises de componentes principais das variáveis físicas e carbono orgânico do solo na profundidade 0,20 – 0,40 m. ***** Variáveis eliminadas. * Variáveis em estudo.....	135
Tabela 9 - Valores coesão de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo na cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0 – 0,20 m.....	141
Tabela 10 - Valores do ângulo de atrito interno de um Argissolo Vermelh-Amarelo submetido à diferentes sistemas de manejo na cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0 – 0,20 m.	142
Tabela 11 - Valores médios das pressões de précompressão (σ_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas.	152
Tabela 12 - Índice de compressibilidade dos diferentes sistemas de manejo.....	155

INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da cana-de-açúcar é uma das principais “commodities” do agronegócio brasileiro, ocupando uma área de 8.056 mil hectares, com produção de 658,8 milhões de toneladas na safra 2013/14 (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2014). Dados do Ministério da Agricultura e Pecuária - MAPA, (2014) apontam que a região Nordeste contribui em média com 7,5 % da produção nacional, apresentando índices médios de produtividade inferiores aos encontrados nos Estados do Centro-sul e da região Centro-oeste. Mesmo com estes indicadores, o cultivo da cana-de-açúcar é viável, principalmente devido ao seu potencial na geração de energia, produção de alimentos e geração de resíduos reaproveitados no processo produtivo. No entanto, a grande maioria do cultivo da cana-de-açúcar é realizado sob manejo convencional (Evangelista, 2013).

A produção de cana-de-açúcar no nordeste brasileiro é realizada basicamente na zona úmida e próxima ao litoral, denominada de Zona da Mata, particularmente nas áreas de terras altas a exemplo dos Tabuleiros Costeiros e áreas do domínio de Mar de Morros. Após o incentivo governamental na década de 80 para a exploração agrícola das áreas de várzeas (Pró-várzeas), houve um incremento significativo na utilização dessas áreas para a produção de cana-de-açúcar. De acordo com dados de produtores dessas regiões, é nas várzeas onde são obtidas as maiores produtividades de cana-de-açúcar da região Nordeste (Mendonça, 2011). Dessa forma, considerando a sua extensão e a incorporação no sistema produtivo, a cana-de-açúcar resulta em atividade econômica importante.

As características químicas e físicas do solo na cultura da cana-de-açúcar podem ser alteradas por meio do uso e manejo do solo. Diversos estudos abordando diferentes sistemas de manejo de solo cultivados com cana-de-açúcar têm constatado alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas conforme os de Li et al.(2013); Pacheco & Cantalice, (2011); Portugal et al. (2010). Os diferentes sistemas de manejo nos diferentes solos agrícolas, aliado as pressões exercidas na superfície do solo pelo uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas são capazes de ocasionar variações nas propriedades físico-químicas do solo, as quais

exercem forte influência no seu comportamento mecânico (Lima et al. 2004; Wiermann et al. 2000; Silva, 2002).

O comportamento mecânico do solo pode ser avaliado pelos parâmetros da compressibilidade e da resistência do solo ao cisalhamento, porém, para o estudo desses dois parâmetros nos diferentes solos agrícolas, torna-se necessário a criação ou adaptações de metodologias que visem mensurar outras propriedades do solo que relacione o comportamento mecânico em condições dinâmicas pouco estudadas na física do solo convencional (Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al. 1997; Wiermann et al. 2000; Silva, 2002).

A compressibilidade dos solos sob uso agrícola na literatura é apresentada com várias definições, mas todas resultam em explicar que o processo é caracterizado por uma variação do volume de solo e um aumento da sua densidade em resposta a uma pressão aplicada na sua superfície (Sweeney et al. 2006; Soane & Ouwerkerk, 1994; Gupta & Allamaras, 1987). Já a resistência do solo ao cisalhamento pode ser definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem ocorrer ruptura. Essa resistência é determinada de acordo com as características coesivas e friccionais do solo. Nos solos arenosos essa resistência depende basicamente do atrito entre as partículas, enquanto que nos solos argilosos irá depender não só do atrito entre partículas, como também da coesão (Secco 2003; Mckyes et al. 1994; Lebert & Horn, 1991).

Os processos de compressibilidade e cisalhamento de solos tendem a apresentar diferentes valores conforme a variabilidade nas propriedades dos solos, cultivados em diferentes sistemas de manejo. No Brasil, os tipos de solos cultivados com cana-de-açúcar vão desde Neossolos quartzarênicos a Latossolos, sendo estes últimos juntamente com os Argilssolos, os mais representativos na região Nordeste (Silva & Ribeiro, 1997). No Estado de Pernambuco, grande parte das áreas cultivadas com a cana-de-açúcar está incluída em Argilssolos e Latossolos e em menor porção cultivos em Gleissolos e Espodossolos.

REFERÊNCIAS

- COAN, O. Preparo vertical do solo. **IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. Viçosa-Mg. 24.1994.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (**CONAB**). Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar, Quarto Levantamento, Brasília, p.1-14, abr. 2014. 20p.
- EVANGELISTA, C. R; PARTELLI, F.L; FERREIRA, E.P.B; PIRES, F.R. Atributos microbiológicos do solo na cultura da cana-de-açúcar sob manejo orgânico e convencional. **Ciências Agrárias**, v.34, n.4, p.1549-1562. 2013.
- GUPTA, S.C; SHARMA, P.P; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advance Agronomy**, v.42, p.311-338, 1989.
- KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR. M.S. Efeito do manejo da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.497-506, 1999.
- LEBERT, M.; HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v.19 p.275-286, 1991.
- LI, X; UM, Y; CHENG, Y; LIU, X; NIAN, H. Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability. **Acta Physiol Plant**, v.35, p.1113–1119, 2013.
- LIMA, C.L.R; SILVA, A.P; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não-irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004.
- MENDONÇA, S.K.G. **Caracterização de Solos Tiomórficos da várzea do Rio Camocim, Caaporã**, PB. 2011. 86p. Tese (Doutorado em ciência do solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- MCKYES, E; NYAMUGAFATA, P; NYAMAPFENE, K.W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. **Soil & Tillage Research**, v.29, p.357-366, 1994.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (**MAPA**). Sistema de acompanhamento da produção canavieira (SAPCANA). Informe técnico. 2014.
- PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos

tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

PORTUGAL, A.F; COSTA, O. D. V; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona Da Mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.575-585, 2010.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003. 128f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

SILVA, A.J. N DA; RIBEIRO, M.R. Caracterização de Latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.677-684, 1997.

SILVA, V.R; REINERT, D. J; REICHERT, J. M; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I - estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

SOANE, B.D; OUWERKERK, V. C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. 660p.

SWEENEY, D. W; KIRKHAM, M. B; SISSON, J. B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, v.98, p.637-643, 2006.

WIERMANN, C; WERNER, D; HORN, R; ROSTEK, J; WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.117-128, 2000.

CAPÍTULO – I

COMPORTAMENTO FÍSICO - MECÂNICO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

RESUMO

Os diferentes sistemas de manejo no cultivo tradicional da cana-de-açúcar são capazes de promover mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, as quais podem repercutir no seu comportamento mecânico, que pode ser avaliado pelos parâmetros da compressibilidade e da resistência ao cisalhamento, sendo estes de grande importância para o monitoramento e prevenção dos processos de degradação do solo. O presente estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros da compressibilidade e do cisalhamento de um Gleissolo cultivado com cana-de-açúcar. Os sistemas de manejo foram adotados na unidade sucroenergética à mais de 20 anos, correspondem à aplicação de vinhaça, torta de filtro, torta+vinhaça, sem aplicação. Todos os sistemas foram comparados entre si e, com o solo de capineira nativa (*Brachiaria decumbens*) O ensaio de compressão uniaxial foi realizado em amostras estruturadas coletadas nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, as quais foram submetidas à aplicação de cargas nos seguintes estágios de pressão: 12,50; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa em três níveis de umidade volumétrica. Para os ensaios de cisalhamento direto, as amostras foram coletadas nas profundidades de 0-0,20 m e, submetidas ao ensaio de cisalhamento direto também com aplicação de três níveis de umidade e aplicação de tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Em comparação com os sistemas de cana-de-açúcar, o maior conteúdo de carbono orgânico no sistema de capineira proporcionou maiores resistência ao cisalhamento. O valores de coesão variou de 59,45 a 3,75 kPa e, o sistema de capineira nativa apresentou maiores valores em relação aos demais sistemas de manejo. As pressões de précompressão (σ_p) variaram de 59 a 22,18 kPa para as duas profundidades. Estes valores não diferiram estatisticamente pelo teste Tukey ($p < 0,05$) devido à alta umidade volumétrica ligada à baixa macroporosidade. Em ambos os sistemas com cana-de-açúcar e capineira os índices de compressão (C_c) variaram de 0,15-0,29 e 0,38-0,49 respectivamente, diferindo estatisticamente à medida que aumenta o índice de vazios como também, menores valores de densidade inicial do solo foram observados no sistema de capineira.

Palavras-chave: compressibilidade, cisalhamento, coesão, ângulo de atrito interno.

ABSTRACT

Different management system on sugar cane cropping may yield physical, chemical, and biological soil changes which in turn can influence its mechanical behavior. This process can be evaluated based on parameters, such as compressibility and shear resistance. Both are essential to recognize and prevent land degradation. This study aims to assess the parameters related to soil compressibility and shear resistance in the Entisol in response of the use of organic wastes derived from sugar cane. The following management systems have been used at sugarcane power plant over 20 years: vinasse, filter cake (sugarcane byproduct), filter cake + vinasse, and no management. All of these were compared with the soil under native grass system (*Brachiaria decumbens*). The uniaxial trial was carried out in undisturbed samples at 0-0.20 and 0-0.40 m depth. Loads were applied under different pressures – 12.50, 25, 50, 100, 200, 400, 800, and 1600 kPa – as well as three volumetric moisture levels. The trial of direct shear was carried out at 0.20 m depth, under the same moisture levels and following the vertical tensions of 50, 100, and 200 kPa. In comparison with sugar cane system, the highest content of organic carbon on grass “capineira” provided the highest shear resistance. The cohesion ranged from 59.45 to 3.75 kPa and the “capineira” system showed values higher than those from other management systems. The precompression pressures (σ_p) ranged from 59 to 22.18 kPa at 0-0.20 and 0-0.40 m depth. These values showed no significant differences by Tukey test ($p < 0.05$) due to the high volumetric moisture tied to low macroporosity. Both sugar cane system and “capineira” system, compression indices (C_c) ranging from 0.15 to 0.29 and 0.38 to 0.49, differ statistically inasmuch as the highest void ratio and also the lowest initial bulk density values were observed on soils from grass system.

Keywords: compressibility, shear, cohesion, angle of internal friction.

1- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mecânica do solo é um campo da engenharia civil, ligado à geotecnia, que estuda o solo como meio de sustentação de estruturas (Ortigão, 2007). Na engenharia agrônômica, a mecânica do solo está inserida junto à física do solo estudando o comportamento mecânico do solo e sua relação com os animais, máquinas e equipamentos agrícolas e florestais (Reichert et al., 2010).

O comportamento mecânico do solo (alterações no volume e resistência ao cisalhamento) pode ser descrito por seu estado de tensão (Reichert et al., 2010), no entanto, o estudo do comportamento dessas tensões em um solo sob uso agrícola, ou seja, na condição de solo não-saturado, é mais complexo do que o comportamento em um solo saturado (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Nos solos ocorrem tensões devidas ao peso de suas próprias camadas/horizontes e as cargas externas aplicadas. Assim, o estado de tensões em cada ponto depende do peso próprio do terreno, da intensidade da força aplicada e da geometria da área. No caso de tensões induzidas pelo próprio peso das camadas de solo (tensões geoestáticas) e da superfície do terreno horizontal, a distribuição das tensões total, neutra e efetiva, a uma dada profundidade, é imediata, considerando-se apenas o peso do solo sobrejacente.

Holtz & Kovacs (1981), citam que o estudo da tensão efetiva foi proposto por Terzaghi, em 1920, o qual, estabeleceu a partir de observações e da intuição do comportamento dos solos saturados, que a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dependem fundamentalmente da pressão média intergranular das partículas, demonstrando assim, que as mudanças no volume do solo, quando ele está submetido à aplicação de cargas, depende exclusivamente da tensão efetiva aplicada ao mesmo.

As tensões geradas na superfície do solo poderão produzir tensões nas camadas/horizontes ao longo do perfil, podendo resultar em deformações tridimensionais e/ou serem transmitidas como um corpo rígido (Reichert et al., 2010). Segundo Lal & Shurkla (2004), quando submetido a uma tensão ou pressão externa, o solo passa por diferentes tipos de deformações. Segundo Reichert et al., (2010), os diferentes tipos de deformações estão relacionados diretamente com o poder da força em causar deformação e, essa deformação é relacionada diretamente com a

magnitude da força e inversamente relacionada com a área na qual ela atua (Reichert et al., 2010).

As deformações físicas do solo devem-se a uma complexa interação de fatores internos e externos (Semmel & Horn, 1995). Os fatores internos são: histórico de tensões, umidade do solo, textura do solo, estrutura do solo, densidade inicial do solo e matéria orgânica. Mentges (2013) comenta que inúmeras propriedades físicas do solo são sensíveis ao manejo e influenciam o crescimento vegetal e as demais funções do solo no ambiente. Os fatores externos estão relacionados com o tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada e do manejo do solo (Holtz & Kovacs, 1981; Horn & Fleige, 2003).

Os solos são regularmente expostos a diferentes tipos de cargas externas, os quais são geralmente descritos como estáticos, mas na verdade são altamente dinâmicos, com tempo da variação e magnitude da carga (Mordhosrt et al., 2012).

No decorrer das últimas três décadas, a carga de várias máquinas usadas nas operações agrícolas teve um fator de aumento de cerca de 3 à 4 vezes comparado com décadas passadas e, como consequências houve um aumento relevante na compactação das camadas superficiais e mais profundas do solo, nos últimos anos. Então o maior foco de interesse no meio agrícola nos últimos anos, foi em proteger ou remediar o solo contra os efeitos negativos da compactação (Veiga et al., 2007).

1.1 - Compressibilidade de solos agrícolas

Os diferentes sistemas de manejo no cultivo tradicional da cana-de-açúcar são capazes de promover mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Algumas propriedades físicas como densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica, resistência do solo à penetração de raízes, entre outras, são utilizadas largamente para avaliação do processo de compactação de solos e, mesmo refletindo a sua influência no comportamento compressivo destes solos, estas propriedades não são as mais adequadas para avaliar o processo de compressão, o qual é avaliado por meio da compressibilidade (Souza et al. 2012; Flores et al., 2007; Silva & Cabeda, 2006; Lima et al. 2004).

A compressibilidade de solos agrícolas na literatura é apresentada com várias definições, mas todas resultam em explicar que o processo é caracterizado por uma

variação do volume de solo e aumento da sua densidade em resposta a uma pressão aplicada na sua superfície (Sweeney et al., 2006; Soane & Ouwerkerk, 1994; Gupta & Allamaras, 1987). Quando esse processo ocorre pela expulsão de ar dos poros temos o processo de compactação e, o processo de adensamento ocorre quando a expulsão de água (Dias Júnior, 2000). Segundo Horn et al., (1994), quando os solos são expostos a pressões externas, sabe-se que apenas os volumes de ar e de água são afetados diretamente, tanto no que diz respeito às mudanças nos tamanhos e distribuição dos poros como no conteúdo de água.

Os estudos referentes à influência da umidade na compressibilidade de solos em diferentes sistemas de manejo são recentes em relação a outras linhas da física do solo tradicional, mas já começam a ganhar destaques em algumas regiões do Brasil, conforme observado em Pacheco & Cantalice, (2011); Vasconcelos, (2012); Silva et al., (2002), como também naqueles trabalhos que têm por objetivo estudar a influência do estado inicial de compactação do solo (porosidade ou densidade inicial) na sua compressibilidade conforme os de Macedo et al., (2010); Gregory et al., (2006); Silva (2002) verificar o anos dos dois.

O estudo da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga sob diferentes condições de umidade, e sob diversos sistemas de manejo é de grande importância não só para determinar as pressões máximas que o solo pode suportar, mas também para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados (Souza et al., 2012).

A curva de compressão do solo (Figura 1) tem sido usada com base comum para modelar a suscetibilidade do solo à compactação. Quando o solo não foi submetido a nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear. Entretanto, quando o solo já recebeu pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, a variação das pressões atuando sobre o solo determinará a formação de duas regiões distintas na curva de compressão: a curva de compressão secundária e a reta de compressão virgem (Dias Júnior & Pierce, 1996).

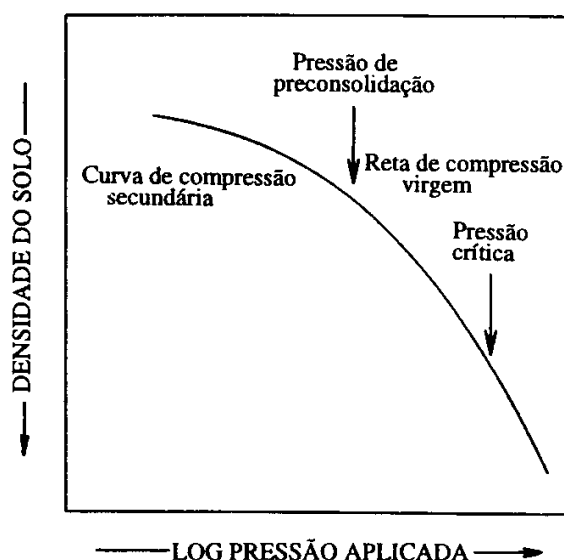


Figura 1 - Curva de compressão do solo quando o mesmo foi submetido a pressões prévias. Fonte: Dias Júnior & Pierce, 1996.

A pressão de précompressão divide a curva de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária), e uma de deformações plásticas e não recuperáveis (reta de compressão virgem). Portanto, na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão previamente aplicada ao solo deve ser evitada para que não ocorra compactação adicional (Silva et al., 2001; Kondo & Dias Júnior 1999; Dias Júnior, 2000; Holtz & Kovacs 1981).

A curva de compressão do solo tem importância para a determinação de parâmetros de compressibilidade que evitem a compactação excessiva dos solos agrícolas (Dias Júnior & Pierce, 1996). Esta curva é representada graficamente pela relação entre algum parâmetro da estrutura do solo, mais frequentemente, o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da carga aplicada. A partir dela, obtém-se a pressão de pré-compressão (σ_p), que é um parâmetro da capacidade de suporte de cargas pelo solo, e o índice de compressão (C_c), que é indicativo da susceptibilidade do solo à compactação (Lima 2004b; Silva, 2002b; Holtz & Kovacs, 1981)

Hakansson e Reeder (1994) constataram que, além das cargas por eixo, outros fatores como a umidade, dimensões dos pneus, pressões de contato, número

de passadas, resistência do solo e o histórico de tensões, são importantes parâmetros para avaliação dos processos de compactação em solos agrícolas.

Para Horn (1994), além dos fatores externos, a extensão da deformação do solo a uma determinada pressão, depende também da resistência do solo, mobilidade e rearranjo das suas partículas. A resistência mecânica de solos estruturados é influenciada pelos parâmetros da agregação, umidade, composição e arranjo dos sistemas de poros. Estes parâmetros são influenciados por parâmetros internos do solo comparáveis como: granulometria, tipo e quantidade de minerais de argila e de cátions, substâncias orgânicas e densidade do solo.

A contínua adição de resíduos orgânicos ao solo dos diferentes sistemas de manejo quer na superfície ou incorporado ao solo, agem na atenuação dos processos de compactação do solo. Quando aplicado em superfície, estes resíduos formam uma cobertura morta que pode dissipar parte da pressão exercida pelas rodas das máquinas e/ou patas de animais, reduzindo com isso os efeitos da compactação (Braida et al, 2006). Ainda segundo os autores, a baixa densidade, a susceptibilidade à deformação e elasticidade destes materiais, fazem com que eles sejam capazes de atenuar as pressões exercidas no solo.

Simulações de pressões em solos exercidas por máquinas agrícolas, podem ser realizadas por ensaios de compressão uniaxial (Cavaliere et al., 2008; Krummelbein et al. 2008; Dias Júnior, 1994), também conhecido por ensaio de adensamento unidimensional, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-MB 3336/90) o qual, tem como objetivo determinar as propriedades de adensamento do solo por meio da velocidade e magnitude das deformações quando o solo é lateralmente confinado e unidimensionalmente carregado e drenado.

Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compressão, mas, à medida que vai umidecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, diminuindo a resistência do solo à compressão (Hillel, 1980). Então, a umidade exerce um papel decisivo no valor da compressibilidade do solo. De maneira geral, quando os demais fatores mantêm-se constantes, a umidade do solo é quem governa a quantidade da deformação do solo.

A curva característica de retenção de água do solo (CCRAS) pode contribuir para a compreensão do comportamento dos solos não saturados frente à variação de umidade (Rahardjo & Leong, 1997). A CCRAS é definida como a relação entre o teor de água e a correspondente energia com a qual a água está retida nos poros do solo, isto é, o potencial mátrico, sendo uma representação da capacidade do solo em armazenar água. Segundo Vasconcelos (2009), a umidade é uma variável determinante no processo de compressão do solo e da magnitude de sua deformação. Sendo assim, quando o solo está sob um alto potencial matricial (valores mais negativos), sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (Dias Júnior, 1994). Diversas pesquisas constatam que a capacidade de suporte de carga, relaciona-se negativamente com a umidade do solo (Horn, 1988; Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva & Cabeda, 2006; Lima et al., 2006).

Kondo & Dias Júnior (1999b), estudaram a compressibilidade de três solos da região de Lavras (MG) e mostraram que o incremento do teor de água no solo provocou a redução da capacidade de suporte, independentemente do tipo de manejo a que haviam sido submetidos. Os autores afirmaram que o teor de água do solo foi o principal fator regulador do comportamento compressivo desses solos. Na mesma linha de pesquisa, Salire et al. (1994), estudando o comportamento compressivo de cinco tipos de solos, observaram que o índice de compressão (C_c) aumentou com o incremento da umidade volumétrica do solo de 0,05 até 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, tendo o índice de compressão atingido valores altos de 0,71 para uma umidade volumétrica de 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

1.2 - Cisalhamento de solos agrícolas

A resistência ao cisalhamento é a resistência (τ) que o solo pode oferecer à tensões de ruptura na sua matriz ou estrutura. Essa resistência pode ser expressa pela equação ($\tau = C + \sigma_n \text{tg}\theta$), a qual foi adaptada do critério de Mohr, e chamada de reta de Coulomb, onde os parâmetros “C” e “ θ ”, representam respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito entre as partículas.

A resistência ao cisalhamento (τ) está diretamente relacionada com as forças de coesão entre as partículas do solo e, com os parâmetros de coesão e ângulo de

atrito interno. Outras propriedades intrínsecas do solo como, por exemplo, o conteúdo de argila e a matéria orgânica do solo também estão diretamente relacionados com a resistência do solo ao cisalhamento (Horn et al, 1994; Knapen et al, 2007).

O ângulo de atrito interno do solo representa as características friccionais entre as suas partículas sólidas, sendo definido como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que ocorra o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Esse ângulo depende de fatores como grau de compactação, quantidade e tipo de argila, tamanho e forma das partículas do solo, entre outros (Pinto, 2000). O efeito do conteúdo de água sobre o ângulo de atrito interno está associado ao efeito lubrificante que a água exerce quando recobre as partículas sólidas. Assim, a medida que o conteúdo de água no solo vai diminuindo, os filmes de água sobre as partículas vão se desfazendo, reduzindo o seu efeito lubrificante e, portanto, aumentando o atrito interno entre as partículas (Braidá et al., 2007).

A coesão do solo (C) é resultado da atração eletrostática entre as superfícies de partículas que estão muito próximas e/ou resultante do efeito de agentes cimentantes (óxidos e argilas) – coesão real. O desenvolvimento da coesão do solo também é fortemente influenciado pelo teor de água no solo (coesão aparente). Alguns autores comentam que quando ocorre uma diminuição do teor de água no solo ocorre um aumento na coesão entre as partículas devido à diminuição da distância entre elas e assim aumentando a força de atração (Arvidsson et al., 2001; Boeni, 2000; Fredlund & Rahardjo, 1993).

O efeito da textura na resistência do solo ao cisalhamento se dá por meio das forças de fricção/atrito atribuídas aos solos com predomínio de frações de partículas mais grosseiras e as forças de coesão atribuídas aos solos com predomínio de frações mais finas. A matéria orgânica exerce uma influência dinâmica nos parâmetros do cisalhamento, modificando dinamicamente a coesão das partículas do solo e sua estabilidade estrutural (Blanco-Canqui et al., 2005).

Os efeitos da matéria orgânica do solo nos parâmetros do cisalhamento são um tanto controversos. Alguns trabalhos (Ohu et al., 1986; Blanco-Canqui et al., 2005; Thiyyakkandi & Annex, 2011) reportaram um decréscimo na tensão de cisalhamento com aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo. Autores

atribuem este comportamento a capacidade que a matéria orgânica tem em diminuir a densidade do solo (Kay et al., 1997; Kay & Angers, 1999), implicando em uma redução na tensão de cisalhamento. Por outro lado, a matéria orgânica do solo aumenta as forças de coesão entre as partículas do solo que está diretamente relacionada com a tensão de cisalhamento do solo (To & Kay, 2005). Muitos trabalhos (Davies, 1985; Gantzer et al., 1987; Ekwue, 1990; Cruse et al., 2000; Rachman et al., 2003) constataram um aumento na tensão de cisalhamento com o incremento de matéria orgânica nos solos cultivados.

2- HIPÓTESES

- A adição de matéria orgânica no solo proveniente de aplicação na forma de vinhaça e da torta de filtro, produzidas no processo de industrialização da cana-de-açúcar, exercem influência nos parâmetros da compressibilidade do solo nos diferentes sistemas adotados no cultivo da cana-de-açúcar pelo efeito de dissipação de energia pelos menores valores de pressão de précompressão;
- A aplicação de matéria orgânica no gleissolo, na forma de vinhaça e torta de filtro, promovam menores valores da pressão de précompressão, quando comparados com o sistema sem a aplicação de matéria orgânica;
- A coesão do solo, como parâmetro da resistência ao cisalhamento direto aumentará com a aplicação da torta de filtro em relação aos demais sistemas de cultivo da cana, desde que o solo não esteja saturado;
- O ângulo de atrito entre as partículas, não apresenta tendência de redução, desde que o solo esteja não saturado.

Diante do exposto, as hipóteses serão testadas por meio dos seguintes objetivos:

3- OBJETIVO GERAL

Avaliar a compressibilidade e a tensão de cisalhamento de um Gleissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetidos a cinco sistemas de manejo do solo.

3.1 - Objetivos específicos

- a) Determinar a pressão de précompressão (σ_p), o índice de compressão do solo (C_c) e a tensão de cisalhamento (τ) dos horizontes A_p e subjacentes submetidos aos sistemas de manejos adotados na cultura da cana-de-açúcar em comparação com área de capineira nativa, como também:
- b) Avaliar por meio da pressão de précompressão, o histórico de pressões armazenadas nos solos e sua relação com os diferentes sistemas de manejos adotados na cultura da cana-de-açúcar;
- c) Investigar as relações existentes das pressões de précompressão (σ_p), índice de compressão do solo (C_c) e a tensão de cisalhamento (τ) do horizonte A_p sob diferentes sistemas de manejo com as propriedades físicas e com o carbono orgânico do solo;
- d) Investigar as relações existentes entre os sistemas de manejo do solo com os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto do solo.

4- MATERIAL E MÉTODOS

4.1- Área Experimental

A amostragem experimental foi realizada na unidade sucroenergética da Usina Trapiche, localizada no município de Sirinhaém a 80 km do Recife – PE. Foram selecionadas quatro áreas de várzeas cultivadas com cana-de-açúcar em um Gleissolo Háptico, um dos quatros solos de maior incidência na região (figura 2). Os quatro sistemas de manejo distintos foram: torta de filtro; vinhaça; sem aplicação de vinhaça e torta de filtro e; torta + vinhaça. Estes sistemas de manejo foram comparados com a área de capineira nativa sob várzea, pela não existência de mata na várzea.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das áreas selecionadas para o estudo

Sistemas de manejo	Localização (GPS)
Sem aplicação	S 08°32'25.50" / W 035°12'15.90"
Torta de filtro	S 08°32'16.90" / W 035°08'08.60"
Vinhaça	S 08°34'57.80" / W 035°08'20.60"
Torta + Vinhaça	S 08°34'44.40" / W 035°05'19.40"
Capineira nativa	S 08°32'02.50" / W 035°08'17.40"

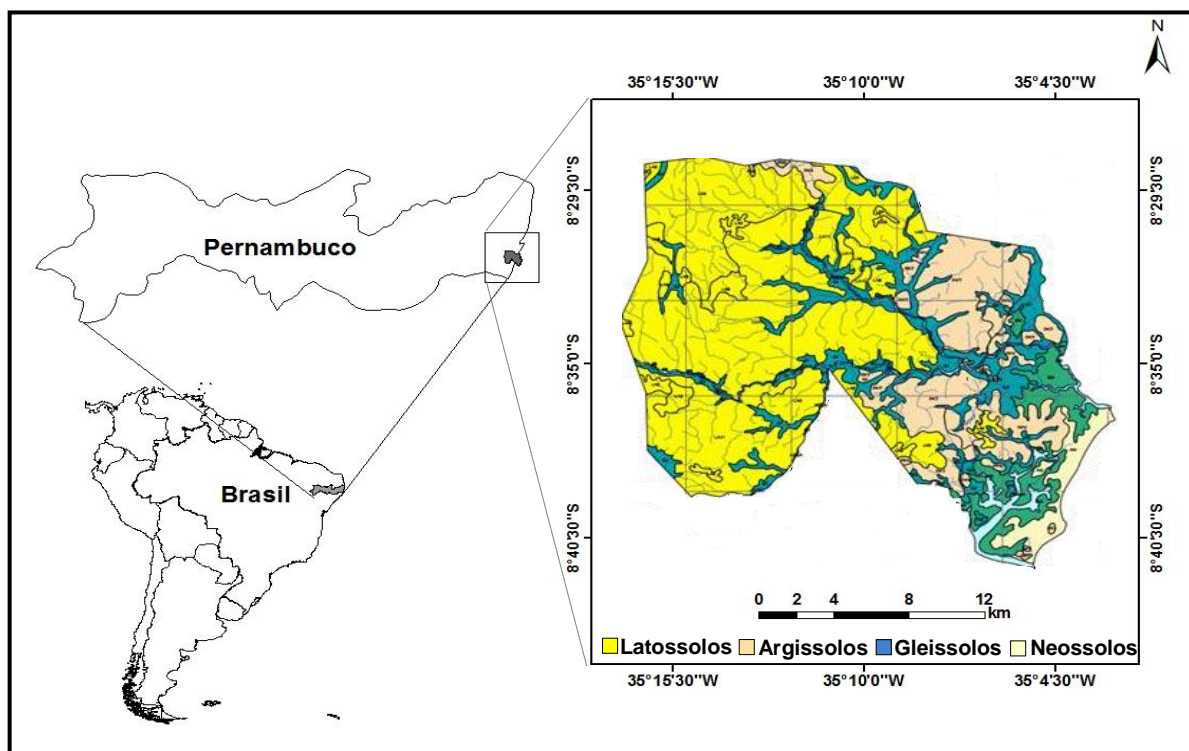


Figura 2 - Mapa de solos do município de Sirinhaém-PE (Embrapa, 2002-Modificada).

4.2 - Histórico de cultivo das áreas selecionada

As áreas possuem um histórico de cultivo com cana-de-açúcar com mais de 30 anos nas várzeas. A aplicação de vinhaça e torta de filtro nas áreas da unidade sucroenergética é de aproximadamente 20 anos.

No sistema de manejo que ocorre a aplicação de vinhaça, conforme o tipo de solo, é estabelecido um tempo de irrigação de 30 minutos à 2 horas por ponto de aspersão, em lâminas variando de 40-45 mm para socarias e, 30 – 35 mm em cana planta. A irrigação com vinhaça geralmente é realizada a partir do segundo corte da cultura nas áreas próximas aos canais de vinhaça.

No sistema de manejo com torta de filtro, aplica-se em média 40 ton ha^{-1} de torta em área total durante o plantio. A aplicação de torta + vinhaça nas áreas de cultivo é realizada com a torta sendo colocada no fundo do sulco durante o plantio e, após o primeiro corte ocorre à aplicação de vinhaça na 1ª ou 2ª socaria, conforme a lâmina e o tempo de irrigação estabelecido.

A adubação química com N-P-K nas áreas com vinhaça é realizada apenas na socaria, sendo utilizados 500 kg ha^{-1} da formulação (21-00-00) composta

exclusivamente por sulfato de amônio. Para as áreas com aplicação torta de filtro, “torta de filtro + vinhaça” e, “sem aplicação” no período de inverno, é realizada durante o plantio dentro do sulco, a aplicação 500 kg ha⁻¹ de fosfato natural. Após 60 dias, ocorre a aplicação em superfície de 500 kg ha⁻¹ de uréia e cloreto de potássio na formulação (15-00-26).

No período de verão, a adubação nas áreas de vinhaça permanece a mesma utilizada anteriormente, no entanto nas áreas com aplicação de torta de filtro, torta + vinhaça e “sem aplicação”, é aplicado no plantio, dentro do sulco, 600 kg ha⁻¹ da formulação 10-20-20, composta por uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio. Nas socarias permanece os mesmos compostos usados na adubação da cana planta, no entanto, ocorre apenas mudanças na formulação (16-08-24) e, na quantidade (400 kg ha⁻¹).

Os rendimentos agrícolas das últimas quatro safras das áreas selecionadas encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Rendimento agrícola das áreas cultivadas com cana-de-açúcar

Safras (ano)	Vinhaça + Torta	Vinhaça	Ton ha ⁻¹	
			Torta de Filtro	Sem aplicação
2004/2005	64,51	61,48	63,36	83,05
2005/2006	75,40	74,78	58,52	65,43
2006/2007	101,20	81,97	71,03	75,83
2007/2008	97,62	64,80	72,60	83,48
2008/2009	78,37	75,41	80,38	80,40
2009/2010	75,40	67,31	73,24	73,91
2010/2011	87,00	74,00	69,90	66,20
2011/2012	64,90	57,40	69,30	42,40
2012/2013	60,60	68,80	65,40	68,10
2013/2014	90,90	92,30	68,00	90,00
Média	79,59	71,83	69,17	72,88

O plantio nas áreas de várzeas ocorre com uso de tratores acoplados com implementos agrícolas (arado, sulcadores, subsoladores e grade niveladora) que são utilizados conforme as condições físicas do solo e, no período de corte da cana-de-açúcar, o uso de maquinários agrícolas resume-se a caminhões, reboques, tratores e carregadeiras de cana (bels), a retirada da cana se faz pelo carregamento dos reboques que são retirados por tratores após o carregamento dentro dos

talhões/lotes (figura 3). No entanto, nem sempre ocorre a restrição de caminhões com reboques (tetraminhão ou pentaminhão) carregados dentro do canal no momento da colheita.



Figura 3 - Carregamento de cana nas áreas de várzeas.

4.3 - Determinação das pressões das máquinas no solo

Os veículos considerados neste trabalho foram introduzidos nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar para realização das tarefas de transporte de cana queimada (caminhão) e plantio (trator) na safra 2013/2014.

Os veículos foram escolhidos pela maior representatividade do modelo na usina, com isto, consistindo de: (a) cinco caminhões Volvo FH-520 com capacidade individual para transportar simultaneamente cinco reboques, cada caminhão tem os rodados traseiros com duas rodas duplas em tandem com pneus da Goodyear 11.00-22 com insuflagem de 758 kPa e, mesmo modelo usado no eixo dianteiro com rodado simples e insuflagem de 689 kPa; (b) Cinco tratores (Valtra BH 180) usados para plantio e transporte de reboques carregados com cana dentro do talhão, o rodado simples no eixo dianteiro do trator é constituído por pneus Goodyear 18.4-26 com uma insuflagem de 179 kPa e rodado traseiro simples também da Goodyear 24.5-32 com 165 kPa, ambos possuem 75% de água de lastro.

As informações foram plotadas com a média para cada veículo no software Tasc versão 2.0, com inserção de outras informações como profundidade de avaliação, granulometria, condição de dureza do solo conforme o teste de resistência à penetração, bitola dos veículos, entre outras, obtendo-se, assim, as

pressões exercidas no solo pelo rodado veículos. As características dos veículos estão na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Valores médios de carga sobre os rodados e insuflagem dos pneus

Veículo	Rodados		Carga por rodado (kg)				Pressão de insuflagem	
			Sem carregamento		Com carregamento		(kPa)	
	Dianteiro	Traseiros	Dianteiro	Traseiros	Dianteiro	Traseiros	Dianteiro	Traseiros
Caminhão	Simple	Duplo	1500	1500	3000	3000	689	758
Trator	Simple	Simple	2500	2500	-----	-----	179	165

4.4 - Definição do número de amostras

As amostras foram coletadas na profundidade de ocorrência do horizonte Ap e subjacentes. No entanto, constatou-se que normalmente no Gleissolo Háplico o horizonte Ap estava situados na faixa de profundidade de 0-0,20 m e o horizonte glei a partir de 0,20 m. Nos quatro sistemas de manejo e na área de capineira nativa, a quantidade de amostras para os tipos de ensaios e/ou análises foram coletadas conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Resumo do número de amostras coletadas no Gleissolo Háplico em todos os sistemas de manejo

Análises / Ensaios	Descrição	Estado da Amostra	Quantidade
Física	Atributos físicos	Não estruturada	40
	Curva de retenção	Estruturada	40
	Resistência à penetração em lab.	Estruturada	160
Mecânica	Compressibilidade	Estruturada	160
	Cisalhamento direto	Estruturada	135
Químicos	Carbono orgânico	Não estruturada	40

4.5 - Atributos físicos com amostras não estruturadas

A coleta das amostras não estruturadas para os ensaios de física do solo ocorreu nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, sendo coletadas quatro repetições em cada profundidade no mesmo sistema de manejo, totalizando 40 amostras não estruturadas para todos os sistemas de manejo. Os ensaios/análises com estas amostras são apresentados a seguir:

4.5.1 - Limite de plasticidade

O limite de plasticidade (LP) foi determinado por meio da moldagem do solo em cima de uma plataforma de vidro áspero até ficar na forma de um bastão com rachaduras, ocorrendo a saída de água do bastão para a plataforma. Desse modo, formam-se pequenos cilindros de dimensões padronizadas, conforme norma da ABNT (1984 b), onde o LP corresponde a umidade gravimétrica contida nos cilindros moldados.

4.5.2 - Limite de liquidez

O limite de liquidez foi determinado por meio do aparelho de Casa Grande, conforme a norma da ABNT (1984 a), a qual estabelece como o limite de liquidez, a umidade gravimétrica necessária para fechar uma fissura na massa do solo da concha em 25 batidas.

4.5.3 – Índice de plasticidade

O índice de plasticidade foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, constituindo uma indicação da plasticidade do solo.

4.5.4 – Estabilidade de agregados via úmida

A estabilidade de agregados via úmida foi realizada pelo método de peneiramento com um aparelho de oscilação vertical do tipo Yooder, proposto por Kemper & Rosenau (1986), com modificações. O aparelho tipo Yooder utilizado é composto por três recipientes cilíndricos (figura 4a), inserindo-se um conjunto de cinco jogos de peneiras em cada recipiente (3,35 - 2,00 - 0,5 - 0,25 - 0,125 mm).

Coletou-se aleatoriamente amostras com 50 g de agregados de vários tamanhos os quais, foram umedecidos em papel filtro por capilaridade, durante 24

horas, evitando-se assim o aprisionamento de ar dentro dos agregados. Depois da saturação, as amostras foram transferidas para o conjunto de peneiras, sendo depositadas cuidadosamente na peneira superior, com 3,35 mm de malha (figura 4b). As amostras ficaram submetidas ao peneiramento via úmida com 25 oscilações verticais por minuto, durante um período de 10 min.



Figura 4 - Aparelho de Yooder.

Após o peneiramento por 10 minutos (figura 4c), os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para latas de alumínio, com auxílio de jatos fracos d'água, dirigidos ao fundo das peneiras, sendo esse material seco em estufa (105°C) por 24 h, com sua posterior pesagem para determinação da distribuição da classe de agregados estáveis em água.

Os pesos obtidos foram usados nas equações do diâmetro médio ponderado (1) e do diâmetro médio geométrico (2) ambas propostas por Kemper & Rosenau (1986) conforme apresentadas a seguir:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i \quad (1)$$

em que: DMP = diâmetro médio ponderado (mm); x_i = diâmetro médio das classes (mm); w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n wp \times \log x_i}{\sum_{i=1}^n wp} \quad (2)$$

em que: DMG = diâmetro médio geométrico (mm); wp = peso dos agregados de cada classe (g); x_i = diâmetro médio das classes (mm).

4.5.5 – Estabilidade de agregados via seca

A estabilidade de agregados via seca foi realizada com um agitador eletromagnético, fabricante ViaTeste, equipado com um conjunto de peneiras com os seguintes diâmetros de abertura de malha: 3,35; 1,70; 0,850; 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075; 0,053 mm e uma fechada (figura 5), a uma intensidade de 90 vibrações por segundo, durante 10 minutos. Foram coletados aleatoriamente 300 gramas de agregados secos ao ar, posteriormente colocou-se no agitador para proceder ao ensaio. Após o término, realizou-se a pesagem da fração de agregados retidos em cada classe de peneiras do agitador e, com estes pesos, determinou-se o DMP e o DMG, conforme as equações 1 e 2 de Kemper & Rosenau (1986).



Figura 5 - Amostrador eletromagnético Viatest VSM 200.

4.5.6 – Densidade de partículas

A densidade de partículas sólidas do solo (D_p) foi realizada pela determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo 20 g de terra fina seca em estufa (< 2 mm), de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

4.5.7 – Análise granulométrica

A determinação da distribuição das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) para caracterização do solo estudado (Tabela 5), foi realizada conforme metodologia sugerida por Almeida (2008). Nessa, a fração argila do solo, foi dispersa quimicamente pelo uso da solução de hexametáfosfato de sódio e, fisicamente por agitação lenta, no agitador tipo Wagner por 16 h.

Após a agitação, o material foi passado em peneira de 0,053 mm, coletando-se as frações argila e silte em proveta de 1L, até o volume de 940 mL, posteriormente, agitando-se manualmente com uma haste. Após 24 h de repouso, o material em suspensão (argila total) teve sua densidade medida pelo uso do densímetro de Bouyoucos (152 H). Procedendo-se a leitura também da prova em branco (apenas dispersante + água). O material retido na peneira, após secagem em estufa a 105°C por 24 h, foi pesado e calculado como areia total. O silte foi obtido pela diferença entre as frações [% silte = 100 – (% areia + % argila)].

Da mesma forma, foram determinadas as quantidades de argila dispersa em água (ADA), sendo calculados os índices de floculação (IF) a partir da relação entre os teores de argila total e argila dispersa em água.

4.6 - Atributos físicos com amostras estruturadas

A coleta de amostras de solo para as determinações da condutividade hidráulica saturada, da curva de retenção de água no solo (CCRAS), densidade do solo, porosidade (total, macro, meso, micro, criptoporosidade), em laboratório, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, foi realizada nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. sendo coletadas em cada profundidade, quatro repetições em cada sistema de manejo, totalizando 40 amostras para todos os sistemas de manejo.

A coleta foi realizada com uso de um amostrador de solos tipo Uhland com anéis volumétricos de dimensões de 5,0 cm de altura (h) x 5,0 cm de diâmetro interno (\emptyset_i).

Após a introdução do amostrador no solo (figura 6a) e sua retirada, marcou-se o sentido da coleta no anel (figura 6b), e procedeu a retirada do cilindro com auxílio de uma faca (figura 6c) deixando um excesso de solo no anel para ser retirado no laboratório (toaleta) (figura 6d).

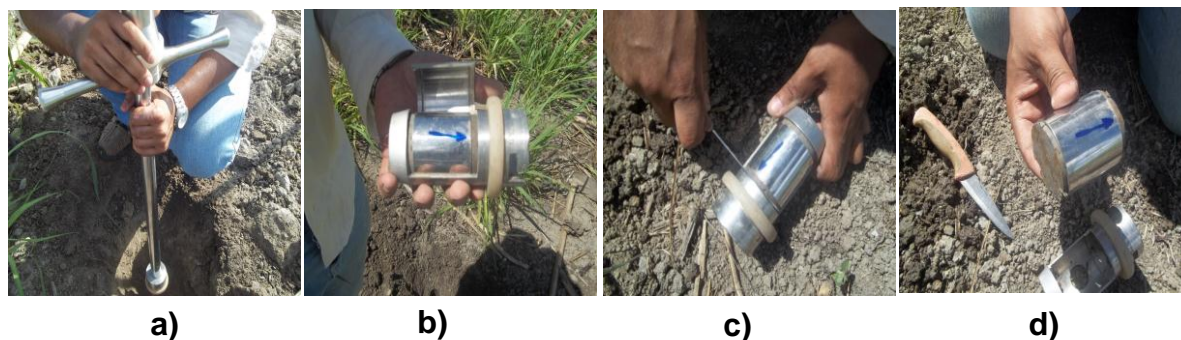


Figura 6 - Coleta com o amostrador tipo Uhland.

Em seguida, as amostras foram envolvidas em plástico filme para conservar a umidade e manter a estrutura, sendo posteriormente envolvidas em plástico-bolha (figura 7) para reduzir impactos mecânicos durante o transporte do campo para o laboratório de manejo e conservação do solo da UFRPE.



Figura 7 - Proteção das amostras no campo.

4.6.1 – Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica em meio saturado foi determinada pelo método de carga decrescente, conforme metodologia descrita por Reynolds & Elrick (2002). Os anéis volumétricos contendo as amostras de solos foram submetidos a completa saturação por um período de 48 h, procedendo-se a condutividade hidráulica de carga decrescente, calculada conforme equação (3).

$$K_{sat} = \left(\frac{a \times L}{A \times \Delta t} \right) \times \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

em que, K_{sat} – condutividade hidráulica saturada do solo ; a = área de da seção transversal do dispositivo de cargas (cm^2); L = altura do cilindro de solo; A = área da seção transversal da amostra (cm^2); t - tempo de escoamento (s); h_1 = carga hidráulica inicial (ml) e h_2 = carga hidráulica final (ml).

4.6.2 – Porosidade total do solo

A porosidade total foi determinada pelo método da saturação. Neste, os anéis volumétricos contendo solo saturado foram pesados, obtendo-se volume de poros. Este peso foi utilizado nos cálculos da umidade volumétrica de saturação (θ_{saturada}), assumindo-se que a densidade da água é igual a 1 g cm^{-3} , então, por definição, pode ser considerada como a porosidade total da amostra (P_t), conforme equação (4).

$$P_{(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})} = \frac{M_{su \text{ saturação}} - M_{ss \text{ } 105^\circ \text{C}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{saturação}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{t \text{ solo}}} = \theta_{\text{Saturação}} \quad (4)$$

em que, P = porosidade total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); M_{su} = massa de solo úmido na saturação (g); M_{ss} = massa de solo seco à 105°C (g); $V_{\text{saturação}}$ = volume da água na saturação (cm^3); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{t \text{ solo}}$ = volume total do solo (cm^3); V_{poros} = volume de poros (cm^3) e, θ = umidade volumétrica na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

4.6.3 – Determinação da distribuição do tamanho de poros do solo

Para determinar a distribuição de tamanho de poros do solo (macro, meso e microporos) utilizou-se a classificação por diâmetro (\emptyset) de poros proposta por Prevedello (1996), ficando definidos como macroporos aqueles poros que drenam água à tensão de 0,10 mca ($d > 300 \mu \text{m}$), mesoporos aqueles que drenam água entre as tensões de 0,10 e 0,60 mca ($50 \mu \text{m} < d < 300 \mu \text{m}$) e, microporos a aqueles que drenam água à tensão $> 0,60 \text{ mca}$ ($d < 0,50 \mu \text{m}$).

Desse modo, a macroporosidade foi determinada nos conjuntos anel-amostra de solos submetidos a uma tensão de 1kPa. Após equilibrada a tensão, os conjuntos anel-amostra foram pesados, adotando-se para propósitos práticos 1 g cm^{-3} como

sendo a densidade da água. Desse modo, determinado-se o volume de água extraído dos macroporos, calculado-se a macroporosidade, conforme equação (5), expressa em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

$$\text{Macroporosidade} \text{ (cm}^3 \text{cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su} \text{ (Saturado)} - M_{su} \text{ (}\psi \text{ 10 cca)}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{w \text{ extraído - até } \psi \text{ 10 cca}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{macroporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (5)$$

em que, $M_{su(\text{Saturado})}$ = Massa de solo úmido na saturação (g); $M_{su} \text{ (}\psi \text{ 10 cca)}$ = Massa de solo úmido na tensão de 10 cca (g); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w \text{ extraído-até-}\psi \text{ 10 cca}}$ = volume de água extraído até a tensão de 10 cca (cm^3); $V_{\text{macroporos}}$ = volume de macroporos (cm^3); V_{Solo} = volume do solo (cm^3).

A mesoporosidade foi determinada nos anéis conjuntos anel-amostra de solos submetidos a uma tensão de 6kPa. Após equilibrada a tensão, obteve-se os pesos do conjunto anel-amostra, determinando assim, o volume de água extraído dos mesoporos e calculado a mesoporosidade, conforme equação (6), expressa em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

$$\text{Mesoporosidade} \text{ (cm}^3 \text{cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su} \text{ (}\psi \text{ 10 cca)} - M_{su} \text{ (}\psi \text{ 60 cca)}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{w \text{ (}\psi \text{ 10 cca - 60 cca)}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{mesoporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (6)$$

em que, $M_{su} \text{ (}\psi \text{ 10 cca)}$ = massa de solo úmido na tensão de 10 cca (g); $M_{su} \text{ (}\psi \text{ 60 cca)}$ = massa de solo úmido na tensão de 60 cca (g); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w \text{ (}\psi \text{ 10-60 cca)}}$ = volume de água extraído entre as tensões de 10 e 60 cca (cm^3); $V_{\text{mesoporos}}$ = volume de mesoporos (cm^3); V_{Solo} = volume de solo (cm^3).

A microporosidade foi determinada pela diferença entre o peso da amostra de solo à 60 cca (6 kPa) e o peso da amostra a 15000 cca (1500 kPa), conforme a equação (7).

$$\text{Microporosidade} \text{ (cm}^3 \text{cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su} \text{ (}\psi \text{ 60 cca)} - M_{su} \text{ (}\psi \text{ 15000 cca)}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{w \text{ (}\psi \text{ 60 - 15000 cca)}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{microporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (7)$$

em que, $M_{su} \text{ (}\psi \text{ 60 cca)}$ = massa de solo úmido na tensão de 60 cca (g); $M_{su} \text{ (}\psi \text{ 15000 cca)}$ = massa de solo úmido na tensão de 15000 cca (g); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w \text{ (}\psi \text{ 60-15000 cca)}}$ = volume de água extraído da tensão de 60 à 15000 cca; $V_{\text{microporos}}$ = volume de microporos (cm^3); V_{Solo} = volume de solo (cm^3);

A criptoporosidade foi determinada e classificada numericamente, equivalendo à umidade volumétrica no ponto de murcha permanente, a qual é a diferença entre o peso da amostra equilibrada em 15000 cca (1500 kPa) e amostra seca em estufa, conforme a equação (8).

$$\text{Criptoporosidade (cm}^3\text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su(\psi 15000\text{ cca})} - PM_{ss 105^\circ\text{c}}}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{w(\psi 15000\text{ cca})}}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{\text{criptoporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (8)$$

em que, $M_{su(\psi 15000\text{cca})}$ = Massa de solo úmido na tensão de 15000 cca (g); $M_{ss 105^\circ\text{c}}$ = massa de solo seco à 105°C (g); $V_{t\text{anel}}$ = volume total do anel (cm³); $V_{w(\psi 15000\text{cca})}$ = volume de água retida na tensão de 15000 cca (cm³); $V_{\text{criptoporos}}$ = volume de criptoporos (cm³); V_{solo} = volume de solo (cm³).

4.6.4 – Determinação da curva característica de retenção de água do solo (CCRAS)

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas em cada sistema de manejo utilizando quatro repetições para cada profundidade (0 - 0,20 e 0,20-0,40 m), totalizando 8 amostras. Para construção da curva foram determinadas as seguintes tensões de 1; 3; 6; 10; 33; 100; 300; 500; 1000 e 1500 kPa. As amostras foram colocadas para saturar por 48 horas e, posteriormente transferidas para mesa de tensão (figura 8a e b) para determinação da umidade volumétrica nas menores tensões de 1; 3; 6 e 10 kPa.

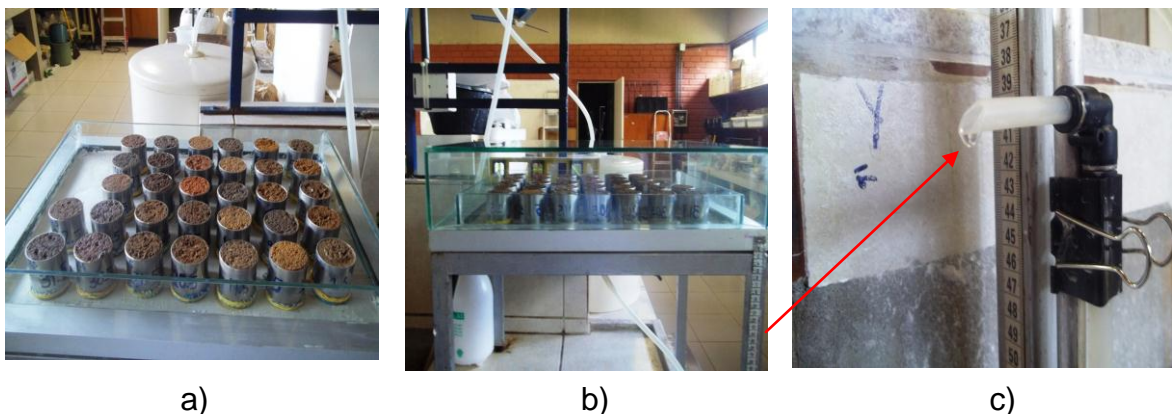


Figura 8 - Mesa de tensão (Lab. física do solo UFRPE), com detalhes da vista superior (a); lateral (b) e drenagem da água dos poros na tensão aplicada (c).

Terminada as etapas da mesa de tensão, as amostras foram colocadas na câmara de Richards de baixa pressão (figura 9a), para determinar as umidades nas tensões de 33; 100; 300 e 500 kPa e, finalizando na câmara de Richards para altas tensões (figura 9b) de 1.000 e 1.500 kPa.

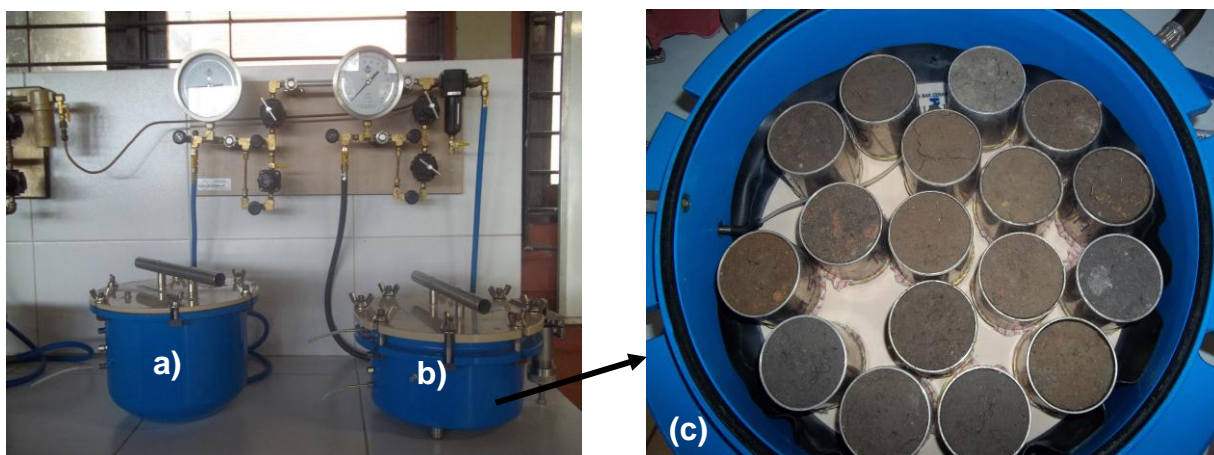


Figura 9 - Câmaras de Richards (Lab. física do solo UFRPE). Vista lateral (a e b) e superior (c).

Os dados obtidos da curva de retenção de água no solo foram ajustados pela equação (9), proposta por Van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \times \psi)^n\right]^m} \quad (9)$$

em que, $\theta =$ é a umidade volumétrica do solo $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; $\theta_r =$ é a umidade residual do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); $\theta_s =$ umidade de saturação; $\alpha =$ é um parâmetro de dimensionamento, inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros (cm^{-1}); Ψ é a tensão de drenagem desejada (kPa) e, n e m são parâmetros empíricos. Para o cálculo do valor de m, foi utilizada a expressão proposta por Mualem (1976), ($m= 1 - 1/n$).

4.6.5 – Determinação da resistência à penetração

Para o ensaio de resistência à penetração de raízes, foi realizada a coleta em cada sistema de manejo, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Foram coletadas em cada profundidade, quatro repetições para serem usadas em cada

nível umidade (0,50; 0,48; 0,45 e 0,43 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), totalizando 160 amostras para os cinco sistemas de manejo.

Os ensaios de resistência do solo à penetração de raízes (RP) foi realizado por um penetrômetro eletrônico de bancada, com célula de carga de 20 kgf, que aplica uma carga constante, a uma taxa de 4 mm min^{-1} , por meio de uma agulha com base do cone de 4 mm. O motor de propulsão, acoplado a célula de carga, conectada a agulha, promove sua penetração na amostra do solo. Um sistema de aquisição de dados registra a força aplicada ao solo contido no anel volumétrico, necessária para penetração da agulha ao solo. O modelo do penetrômetro usado nos ensaios possui software que já fornece os resultados de RP em MPa (Figura 10).

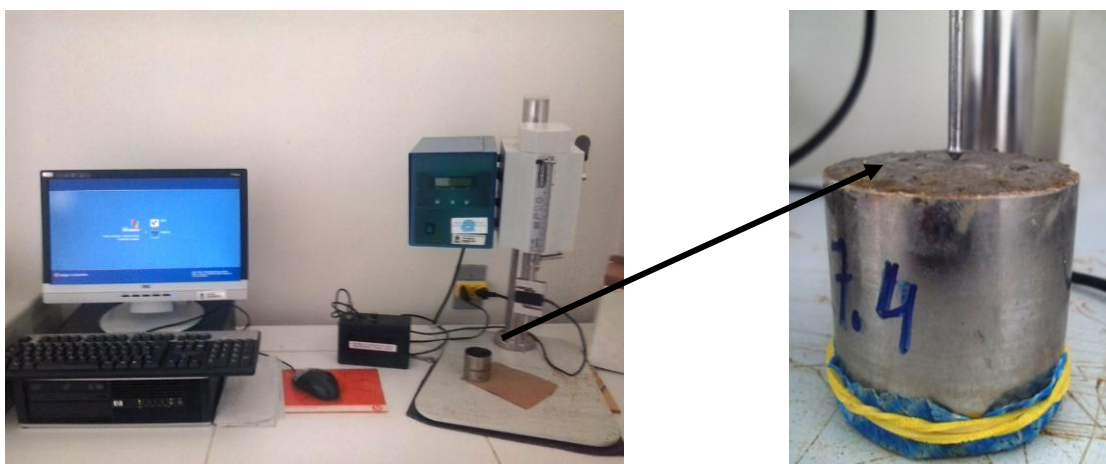


Figura 10 - Penetrômetro de bancada (Lab. física do solo UFRPE).

Nos ensaios de RP as umidades estabelecidas foram com base na curva de retenção, em 0,43; 0,45; 0,48 e 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Desse modo, foram determinadas para cada umidade, quatro repetições de cada sistema de manejo em duas profundidades, totalizando oito amostras. Após preparo das amostras no laboratório e sua respectiva saturação, as amostras foram colocadas em placas de cerâmicas porosas para serem submetidas às tensões correspondentes aos seus valores de umidade pré-estabelecidos. Conforme as tensões a serem aplicadas, as amostras poderiam ser colocadas na mesa de tensão ou na câmara de Richards.

Atingido o equilíbrio na tensão aplicada, as amostras foram pesadas e processadas para os ensaios da resistência do solo à penetração. Durante a inserção da agulha nas amostras, os dados de resistência eram coletados e

registrados pela célula de carga, desde a superfície até 4,0 cm de profundidade do anel volumétrico, deixando-se 1,0 cm entre a agulha e a base do equipamento, devido ao efeito de bordadura. Por este mesmo motivo, foram descartados os dados referentes ao primeiro centímetro de penetração, para a obtenção do valor final da RP. Com isso, foram consideradas as informações dos três centímetros centrais de cada amostra, utilizando-se a média dos maiores valores constantes da resistência à penetração de cada amostra.

Após a obtenção da RP, as amostras foram secas em estufa (105 °C, por 24h), para determinação do conteúdo de água em base volumétrica (θ) e da densidade do solo (D_s).

4.6.6 – Ensaio de compressibilidade do solo

Para o ensaio de compressibilidade, foi realizada a coleta em cada sistema de manejo, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Foram coletadas em cada profundidade, quatro repetições para serem usadas em cada nível umidade (0,50; 0,48; 0,45 e 0,43 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), totalizando 160 amostras para os cinco sistemas de manejo.

Para os ensaios de compressibilidade foi necessário que os anéis apresentassem uma relação de diâmetro interno (\varnothing_i) e altura (h) entre 2,50 e 3,0 cm conforme preconiza a norma da ABNT-MB 3336/90. Com base nesta norma, foi realizada uma adaptação no amostrador de Uhland, alterando-se as dimensões do cachimbo, para que fossem acoplados os anéis confeccionados com dimensões de $\varnothing_i = 7,30 \text{ cm}$ e $h = 2,60$, cuja relação \varnothing_i / h correspondesse a 2,80 (figura 11).



Figura 11 - Adaptação do amostrador de Uhland (vermelho).



Figura 12 - Retirada de amostras com o Uhland adaptado.

Após a retirada, todas as amostras foram envolvidas em plástico filme e posteriormente em plástico-bolha (figura 13). As amostras foram colocadas dentro de caixas de isopor protegidas internamente com espuma, para serem transportadas até o Laboratório de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE, para proceder aos ensaios. Todo esse processo foi realizado para reduzir ao máximo os impactos mecânicos advindos do transporte para o laboratório.



Figura 13 - Proteção das amostras de compressibilidade de um Gleissolo.

No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo do anel volumétrico e, colocadas para saturar por 72 horas. Após decorrido o tempo, as amostras foram submetidas às tensões equivalentes as umidades pré-estabelecidas anteriormente, conforme as tensões a serem aplicadas, algumas as amostras eram colocadas na mesa de tensão ou nas câmaras de Richards, sendo retirada após o cessamento da drenagem nas suas respectivas tensões equilibradas.

Após a retirada da mesa de tensão ou das câmaras de Richards, as amostras foram pesadas e, colocadas numa prensa de adensamento, adaptada anteriormente

para ser usada conforme a dimensão dos anéis cilíndricos para compressibilidade (figura 14).

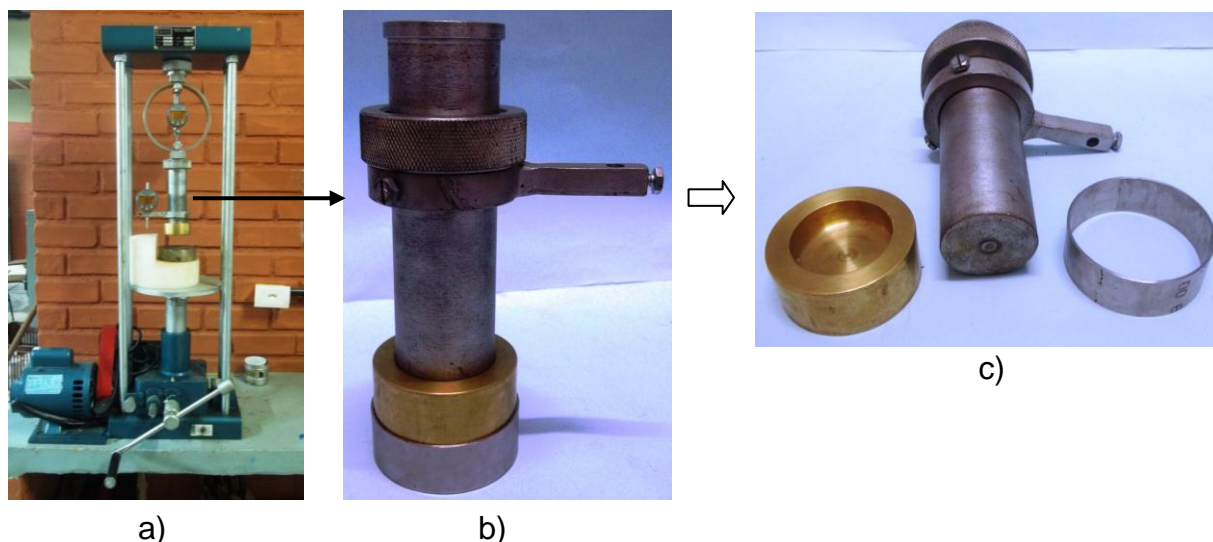


Figura 14 – Prensa de adensamento (a), com detalhes para as peças adaptadas (b e c).

O ensaio foi realizado numa prensa de adensamento com capacidade de carga de 1000 kgf, consistindo na aplicação das pressões de 12,50; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa estabelecidas pela norma ABNT-MB 3336/90. As leituras de deformação vertical foram medidas pelo relógio microcomparador. As pressões eram aplicadas de maneira crescente por uma alavanca manual (figura 14a), permanecendo por 30 segundos em cada estágio de pressão.

Os estágios de pressões eram estabelecidos por meio da deformação do anel dinamométrico em mm, a qual correspondia à pressão aplicada na amostra (figura 15b). Ao mesmo tempo, no estágio inicial de cada pressão, era medida a deformação vertical na amostra por meio de um extensômetro comparador de deformação. No final do ensaio, as amostras foram levadas a estufa a 105° C, por 24 h, para determinação da umidade volumétrica após o ensaio, tendo-se desse modo, os a umidades volumétricas antes e após os ensaios.



(a)

Leitura no extensômetro	σ_p
(mm)	kPa
0,03	12,5
0,06	25
0,11	50
0,22	100
0,45	200
0,89	400
1,79	800
3,58	1600

(b)

Figura 15 - Extensômetro de carga da prensa de adensamento (a) e sua deformação correspondente às pressões em estudo (b).

Os dados obtidos da deformação vertical, medida no relógio microcomparador após a aplicação de cada uma das cargas verticais, alimentaram o programa computacional “Compress” (Reinert et al., 2003), que calcula e fornece a partir do deslocamento registrado, a curva de compressão, a tensão de précompressão (σ_p') e o índice de compressão (C_c).

Na determinação da tensão de précompressão (σ_p') utilizou-se o método gráfico de Pacheco Silva. A figura 16 ilustra a curva de compressão e o processo gráfico para determinação da tensão de précompressão pelo referido método.

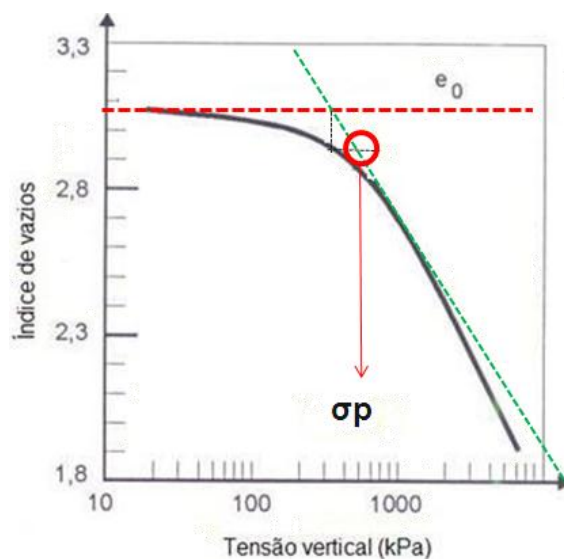


Figura 16 - Determinação da tensão de précompressão pelo método de Pacheco Silva.

No método de Pacheco Silva, ilustrado na figura 16, prolonga-se uma reta tangenciando a reta virgem (tracejado verde) e traça-se uma reta até perpendicular a reta virgem, na horizontal correspondente ao índice de vazios inicial (e^o) da amostra (tracejado vermelho). Do ponto de interseção das duas retas, baixa-se uma vertical até a curva de compressão e , deste ponto (tracejado preto), traça-se outra reta horizontal de encontro à reta que tangencia a reta virgem. A interseção desta horizontal com o prolongamento da reta virgem (círculo em vermelho) é considerada a tensão de pré-compactação.

O índice de vazios em cada estágio de pressão foi calculado conforme a norma da ABNT 12007/90, onde estabelece as seguintes equações:

$$e_i = \left[\left(\frac{D_p}{D_s} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

em que: e_i = índice de vazios inicial (adm); D_s = densidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); D_p = densidade de partículas ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Adicionando o resultado da equação 10, na equação 11, tem-se a altura de sólido dada pela equação abaixo:

$$H_s = \frac{H_i}{1 + e_i} \quad (11)$$

em que: H_s = altura do sólido do corpo de prova (cm); H_i = altura inicial do corpo de prova (cm); e_i = índice de vazios inicial (adm).

Com os valores da altura de sólidos do corpo de prova procedeu-se o cálculo para o índice de vazios no final de cada estágio de pressão, adicionando o resultado da equação 11 na equação 12 a seguir.

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (12)$$

em que: e = índice de vazios no final do estágio de pressão (adm); H_s = altura de sólidos do corpo de prova (cm); H = altura do sólido do corpo de prova no final de cada estágio de pressão (cm).

O índice de compressão (C_c) é a inclinação da reta virgem de compressão (Holtz & Kovacs, 1981), determinado pela relação:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_{p2} - \log \sigma_{p1}} \quad (13)$$

em que C_c = índice de compressão (adm); e_1 = índice de vazios inicial (adm); e_2 = índice de vazios final (adm); σ_1 = pressão aplicada no estágio inicial; σ_2 = pressão aplicada no estágio final.

4.6.7 – Curva de compressibilidade do solo

Para a construção da curva de compressibilidade, foram utilizadas amostras estruturadas do ensaio de compressibilidade na pressão de 1600 kPa em cada umidade volumétrica (0,50; 0,48; 0,45; 0,43 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Desse modo, plota-se os valores de umidade *versus* densidade do solo na pressão de 1600 kPa, construindo-se assim, a curva de compressão do solo. Na curva, a umidade crítica de compressão (U_{cc}) está localizada entre o segundo e o terceiro ponto da curva de compressão.

4.6.8 – Ensaio de cisalhamento direto

Para o ensaio de cisalhamento, a coleta em cada sistema de manejo, ocorreu na profundidade de 0-0,20 (m) em três repetições, para serem usadas em cada tensão normal (50, 100 e 200 kPa) para os níveis de umidade estabelecidos (0,47; 0,45 e 0,42 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), totalizando 135 amostras para os cinco sistemas de manejo.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado conforme a norma ASTM D-3080/98, conduzido em um aparelho de cisalhamento direto com 12 velocidades cisalhantes (1,25; 0,625; 0,25; 0,125; 0,05, 0,025; 0,01; 0,005; 0,002; 0,001; 0,0004; 0,0002 mm min^{-1}) e com capacidade de tensão normal de até 8 kgf cm^{-2} . A figura 17 apresenta o equipamento utilizado, com detalhes para os aparatos de sua constituição.

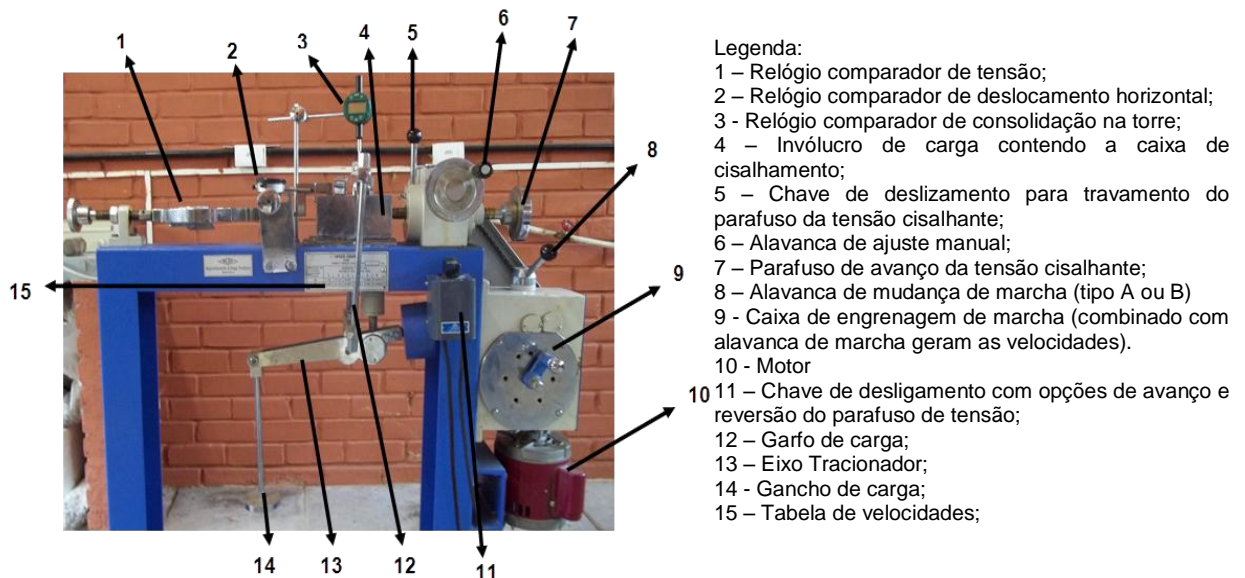


Figura 17 - Aparelho de cisalhamento direto.

A velocidade de cisalhamento utilizada nas amostras foi de $0,125 \text{ mm m}^{-1}$, em três estágios de tensões normais de 50; 100 e 200 kPa. Com estes três estágios, foi possível determinar um valor de coesão e o de ângulo atrito interno.

As amostras foram coletadas no campo por meio de uma caixa retangular de aço inox, confeccionada nas dimensões de 0,06 (l) x 0,06 (c) x 0,043 (h) m. As amostras foram introduzidas no solo por meio de pressão (figura 19-a), para não gerar nenhum tipo de abalo físico e consequentemente danificar a estrutura. Após a retirada das amostras, elas foram cobertas com plástico-bolha e condicionadas em caixas de isopor. No laboratório, foi retirado o excesso de solo (figura 19-c) e colocadas para saturar por 48 horas. Posteriormente, conforme as tensões a serem aplicadas nas amostras, utilizou-se a mesa de tensão, e/ou câmara de Richards, onde foram retiradas após cessar a drenagem (figura 18).

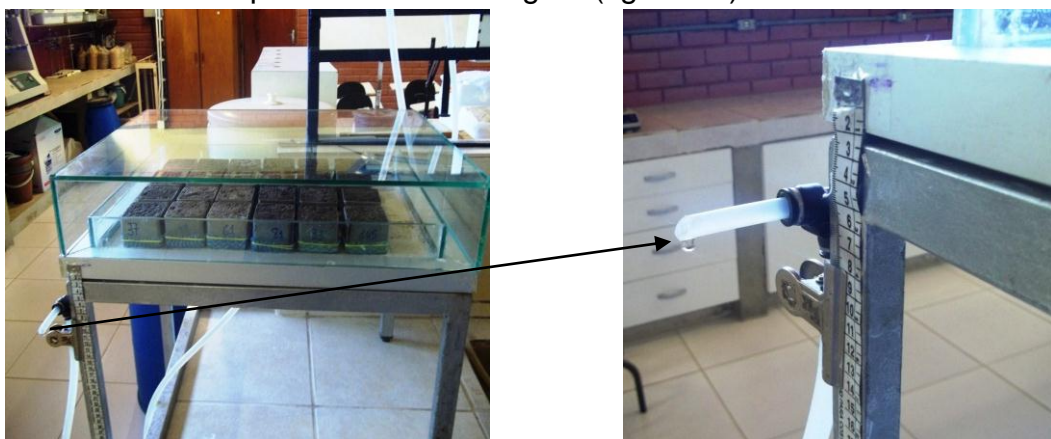


Figura 18 - Amostras de cisalhamento na mesa de tensão.

Após a drenagem de água e estabelecido o equilíbrio do potencial aplicado, as amostras eram retiradas individualmente para realizar alguns ajustes finais antes de proceder aos ensaios, como por exemplo, a remoção 1,0 cm de solo da caixa de coleta com auxílio de um bastão de madeira (figura 19-d) para coincidir com a altura da caixa de cisalhamento (3,3 cm). Com a amostra já ajustada (figura 19-e), esta foi colocada na caixa de cisalhamento com o auxílio do bastão (figura 19-h), ficando pronta para realizar o ensaio de cisalhamento (figura 19-m). A figura 19-n ilustra o aspecto da amostra após o término do ensaio.

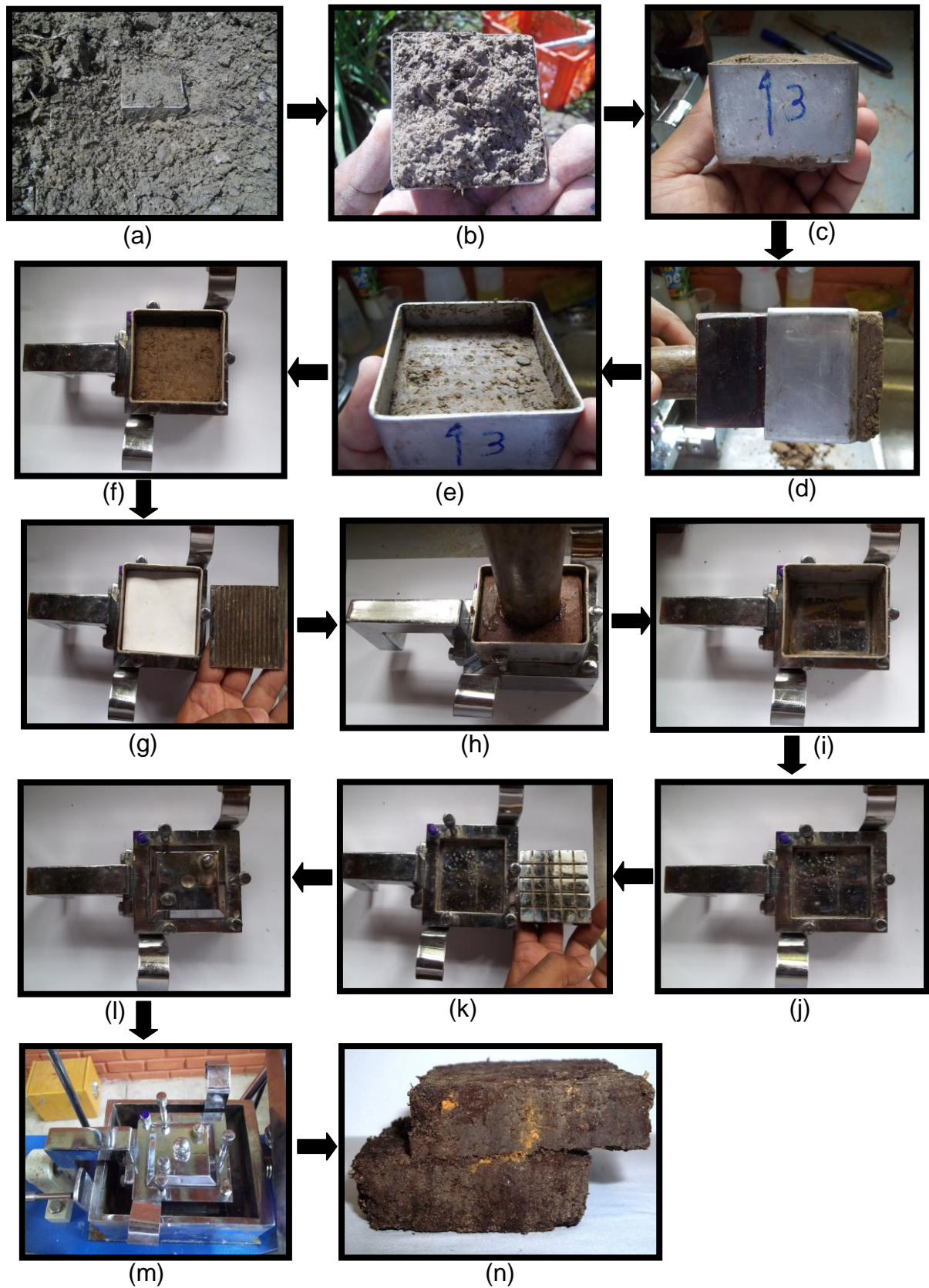


Figura 19 - Sequência de preparo de amostras para cisalhamento, desde a coleta (a) até o término do ensaio (n).

A modalidade do ensaio foi caracterizada pela aplicação simultânea inicial das tensões: normal constante (s_n) e cortante (T), sendo esta última aumentada gradativamente até a ruptura do corpo de prova. A força horizontal provocou o deslocamento com velocidade constante na metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade foi registrada por leitura no relógio comparador do anel dinanométrico (figura 20-a). As leituras no anel dinanométrico (figura 20-a) e no relógio comparador de deformação vertical (figura 20-c) foram realizadas conforme as deformações horizontais medidas pelo relógio comparador de deslocamento horizontal (figura 20-b) em intervalos de 0-10 mm. Assim, foi determinado para cada tensão normal (s_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (T), necessária para provocar a deformação contínua do solo até a ruptura do corpo de prova (LAMBE, 1951).



Figura 20 - Conjunto de anéis comparadores de deformações.

Com o término do ensaio, foram obtidos os dados para preencher os requisitos das equações (14) e (15).

$$\sigma = \frac{N}{a} \quad (14)$$

em que: σ = Tensão normal; N = Força normal aplicada no corpo de prova; a = área da secção transversal da amostra;

$$\tau = \frac{T}{a} \quad (15)$$

em que: τ = tensão de cisalhamento; T= força aplicada no corpo de prova (kPa); a= área da secção transversal da amostra;

O ângulo de atrito interno e o valor de coesão foram determinados com o valor da tensão de cisalhamento em cada tensão normal no final do ensaio, plotando-se um gráfico com a relação tensão cisalhante x tensão normal (figura 21), onde obteve-se os valores de coesão, pelo intercepto da equação da reta formada no gráfico e, o ângulo de atrito interno obtido pela inclinação da reta, como também, a formação das de envoltórias do círculo de Mor-Coulomb.

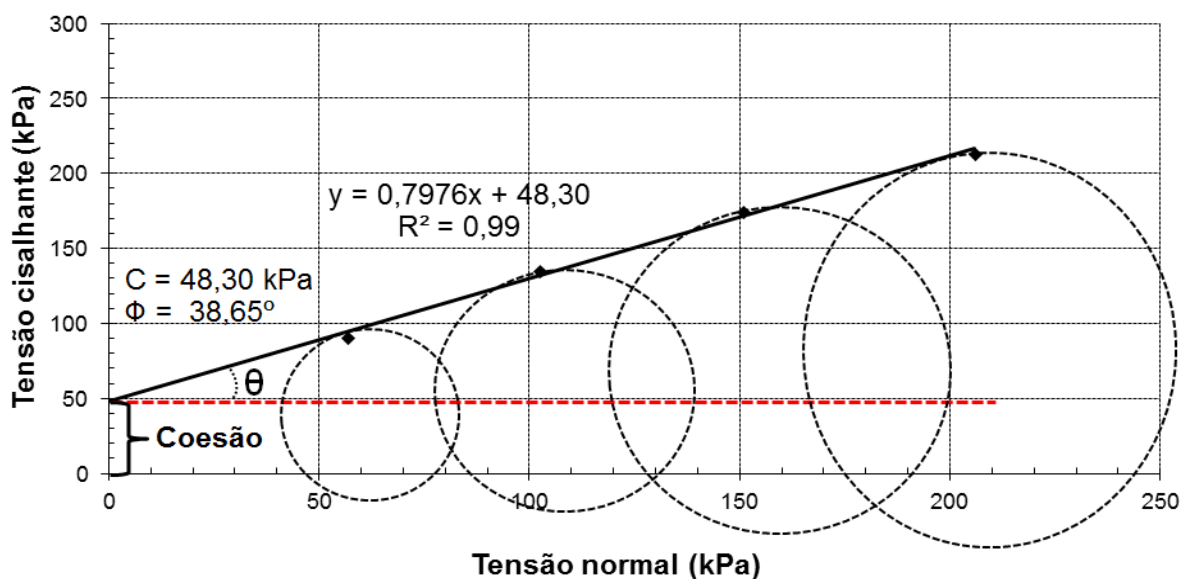


Figura 21. Representação gráfica da obtenção da coesão e do ângulo de atrito interno do solo.

4.7 - Caracterização física do solo e análise do carbono orgânico do solo

As análises de caracterização física e de carbono orgânico do solo, nos diferentes sistemas de manejo, foram realizadas no Laboratório de Física do Solo e no de Química do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, cujos resultados estão na tabela 5, para a profundidade de 0-0,20 m, e na tabela 6, para a profundidade de 0,20-0,40 m.

A análise de carbono orgânico do solo seguiu a metodologia adotada pela EMBRAPA (2009), cujo princípio do método é a oxidação do carbono orgânico do solo pelo dicromato de potássio e titulação com o sulfato ferroso amoniacal.

Tabela 5 - Caracterização física e carbono orgânico total do Gleissolo Háplico nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0-0,20 m

Variáveis	Unid	Profundidade 0 - 0,20 (m)																								
		Capineira					Torta de filtro					Vinhaça					Sem aplicação					Torta + vinhaça				
		Média	Max	Min	DP	CV	Média	Max	Min	DP	CV	Média	Max	Min	DP	CV	Média	Max	Min	DP	CV	Média	Max	Min	DP	CV
Argila	g kg ⁻¹	570,40	630,40	510,40	69,28	12,15	437,00	652,00	312,00	156,10	35,72	541,60	712,00	364,80	172,35	31,82	555,40	670,40	390,40	118,18	21,28	557,00	672,00	352,00	1442,71	25,62
Areia	g kg ⁻¹	404,56	467,29	346,31	62,96	15,56	531,55	659,40	347,40	151,12	28,43	227,13	580,32	69,74	237,21	104,44	311,65	562,72	132,35	182,82	58,66	248,15	582,20	34,80	235,58	94,93
Silte	g kg ⁻¹	25,04	39,56	15,01	10,36	41,37	31,45	79,60	0,60	35,70	113,51	231,27	505,46	54,88	192,85	83,39	132,95	197,25	46,88	66,02	49,66	194,85	333,20	65,20	110,92	56,93
Arg. disp. água	g kg ⁻¹	486,20	561,20	401,20	66,08	13,59	351,20	461,20	261,20	95,92	27,31	431,20	621,20	341,20	128,06	29,70	351,20	521,20	61,20	208,17	59,27	516,20	621,20	341,20	123,69	23,96
Grau de floc.	(%)	14,65	21,39	5,72	7,59	51,83	18,02	29,26	11,24	7,81	43,32	18,04	42,66	6,47	16,62	92,13	32,71	90,87	11,72	39,81	118,66	22,80	46,01	8,88	16,52	72,45
DMG seco	(mm)	1,46	1,57	1,39	0,08	5,20	1,47	1,59	1,31	0,13	8,92	1,40	1,62	1,25	0,16	11,65	1,52	1,60	1,47	0,06	3,92	1,47	1,57	1,38	0,10	6,59
DMG úmido	(mm)	1,37	1,40	1,35	0,02	1,53	1,44	1,49	1,35	0,07	4,69	1,37	1,48	1,32	0,07	5,36	1,35	1,45	1,27	0,08	5,61	1,57	1,56	1,56	0,01	0,65
DMP Seco	(mm)	2,81	3,02	2,58	0,18	6,47	2,76	3,11	2,35	0,32	11,67	2,68	3,11	2,51	0,28	10,61	2,55	2,70	2,33	0,17	6,60	2,71	30,30	2,42	0,28	10,38
DMP úmido	(mm)	2,32	2,40	2,26	0,06	2,64	2,59	2,74	2,35	0,18	7,12	2,38	2,71	2,19	0,23	9,47	2,33	2,62	2,05	0,23	10,01	2,90	2,96	2,83	0,05	1,87
Dens. Part.	g cm ⁻³	2,53	2,67	2,41	0,11	4,21	2,63	2,70	2,56	0,08	3,04	2,63	2,74	2,50	0,11	4,31	2,57	2,67	2,50	0,07	2,87	2,62	2,74	2,35	0,18	6,98
Dens. do solo	g cm ⁻³	1,01	1,12	0,87	0,13	13,00	1,39	1,50	1,26	0,12	8,56	1,49	1,62	1,38	0,11	7,50	1,36	1,45	1,30	0,07	4,87	1,31	1,44	1,17	0,13	9,64
Limite de liquidez	g g ⁻¹	0,67	0,70	0,65	0,02	3,25	0,50	0,59	0,40	0,08	15,37	0,51	0,62	0,41	0,09	17,97	0,55	0,64	0,45	0,08	14,71	0,56	0,77	0,37	0,16	28,68
Limite de plasticidade	g g ⁻¹	0,49	0,54	0,46	0,04	7,58	0,29	0,37	0,21	0,09	30,36	0,31	0,37	0,27	0,05	15,84	0,34	0,38	0,27	0,05	14,26	0,33	0,51	0,24	0,13	38,62
Índice de plasticidade	adm.	0,18	0,24	0,11	0,06	31,48	0,21	0,30	0,14	0,06	30,21	0,20	0,25	0,13	0,05	25,70	0,22	0,26	0,18	0,03	15,73	0,23	0,32	0,13	0,08	34,87
Macroporosidade	(%)	4,30	6,72	2,37	1,93	44,96	1,91	2,99	1,00	0,82	42,77	2,45	3,69	1,85	0,85	34,77	2,27	2,41	2,17	0,11	4,68	3,26	4,50	2,17	1,25	38,46
Mesoporosidade	(%)	4,92	5,34	4,12	0,56	11,43	2,59	3,03	1,91	0,48	18,44	3,08	5,85	1,21	1,99	64,70	1,41	3,16	0,72	1,17	83,21	4,36	5,68	3,60	0,98	22,50
Microporosidade	(%)	9,97	13,01	6,14	3,00	30,07	6,55	7,54	5,76	0,77	11,73	8,88	10,86	7,99	1,33	14,96	11,15	13,77	8,91	2,00	17,90	8,83	9,70	7,78	0,86	9,69
Criptopors	(%)	41,65	47,81	38,04	4,28	10,28	36,06	41,30	31,25	4,30	11,91	30,58	33,76	28,15	2,58	8,42	35,98	40,93	28,05	5,64	15,67	32,70	41,49	26,80	6,70	20,50
Porosidade total	(%)	60,84	66,09	54,57	4,75	7,80	47,11	51,09	42,49	3,67	70,80	45,00	49,50	40,11	4,03	8,95	50,81	53,00	47,15	2,78	2,78	49,14	56,62	44,69	5,46	11,12
θ _{vcc}	cm ³ cm ⁻³	0,47	0,51	0,43	0,03	7,07	0,39	0,44	0,35	0,04	10,52	0,36	0,41	0,33	0,03	9,73	0,42	0,46	0,35	0,05	11,80	0,38	0,48	0,31	0,08	20,39
θ _{vmp}	cm ³ cm ⁻³	0,42	0,48	0,38	0,04	10,28	0,36	0,41	0,31	0,04	11,91	0,31	0,34	0,28	0,03	8,42	0,36	0,41	0,28	0,06	15,67	0,33	0,41	0,27	0,07	20,50
UCC (0,90*LP)	g g ⁻¹	0,42	0,46	0,39	0,03	7,85	0,25	0,31	0,18	0,07	30,36	0,27	0,31	0,23	0,04	15,84	0,29	0,33	0,23	0,04	0,04	0,28	0,43	0,20	0,11	38,62
Carbono org. do solo	dag kg ⁻¹	10,48	12,35	8,30	1,84	17,60	3,13	4,55	2,45	0,97	30,98	3,61	5,60	1,10	2,03	56,06	3,35	3,35	3,35	0,00	0,00	5,94	9,35	3,50	2,64	44,50
Cond. hidráulica saturada	mm h ⁻¹	8,46	17,75	1,94	7,09	83,85	16,28	37,44	3,80	14,93	91,72	2,06	4,44	0,57	1,75	84,60	1,56	2,41	0,71	0,70	45,03	31,11	67,79	1,52	27,84	89,50

Max= valor máximo; Min = valor mínimo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; UCC(0,90*LP) = umidade crítica de compactação correspondente a 90% do limite de plasticidade.

Tabela 6 - Caracterização física e carbono orgânico total do Gleissolo Háptico nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0,20-0,40 m

Variáveis	Unid	Profundidade 0,20 - 0,40 (m)																								
		Capineira					Torta de filtro					Vinhaça					Sem aplicação					Torta + vinhaça				
		Média	Max	Min	DP	Cv	Média	Max	Min	DP	Cv	Média	Max	Min	DP	Cv	Média	Max	Min	DP	Cv	Média	Max	Min	DP	Cv
Argila	g kg ⁻¹	554,40	750,40	450,40	137,60	25,00	477,00	962,00	292,00	173,88	36,45	550,20	732,00	344,80	200,43	36,43	655,40	710,40	570,40	61,91	9,45	627,00	732,00	472,00	144,75	18,30
Areia	g kg ⁻¹	400,39	527,96	130,20	183,95	45,94	455,05	684,00	260,60	176,49	38,78	352,51	573,02	133,40	241,17	71,25	208,69	388,19	110,71	123,87	59,36	214,50	463,00	15,20	188,08	87,69
Silte	g kg ⁻¹	49,21	119,40	21,64	46,92	95,33	67,95	134,00	24,00	47,32	69,65	97,29	151,40	21,00	58,79	60,42	135,91	178,89	41,41	63,52	46,74	158,50	252,80	65,00	76,68	48,38
Arg. disp. água	g kg ⁻¹	456,20	641,20	361,20	125,83	27,58	416,20	601,20	281,20	152,64	36,68	471,20	621,20	321,20	151,88	32,23	241,20	541,20	81,20	208,49	86,44	256,20	461,20	121,20	166,03	64,81
Grau de floc.	(%)	17,41	20,59	14,55	3,23	18,54	12,38	23,16	3,70	8,17	65,97	13,17	18,37	6,84	4,89	37,10	62,30	88,24	16,79	32,51	52,19	54,88	83,44	2,29	37,52	68,38
DMG seco	(mm)	1,48	1,53	1,40	0,05	3,69	1,38	1,58	1,20	0,22	15,54	1,48	1,64	1,15	0,23	15,28	1,57	1,61	1,53	0,04	2,32	1,50	1,61	1,29	0,15	10,06
DMG úmido	(mm)	1,45	1,59	1,37	0,10	7,17	1,37	1,49	1,27	0,09	6,33	1,38	1,45	1,32	0,05	3,95	1,32	1,46	1,18	0,11	8,63	1,38	1,57	1,14	0,18	12,88
DMP Seco	(mm)	2,79	2,95	2,61	0,14	5,07	2,47	3,03	1,89	0,60	24,22	2,79	3,21	1,92	0,59	21,12	2,53	2,87	2,34	0,25	9,74	2,79	3,11	2,12	0,46	16,55
DMP úmido	(mm)	2,57	3,04	2,29	0,34	13,08	2,38	2,63	2,09	0,26	10,78	2,40	2,60	2,23	0,15	6,45	2,19	2,63	1,75	0,36	16,17	2,31	2,92	1,42	0,64	27,53
Dens. Part.	g cm ⁻³	2,62	2,74	2,41	0,14	5,48	2,61	2,67	2,56	0,04	1,69	2,59	2,67	2,50	0,07	2,85	2,61	2,67	2,53	0,06	2,21	2,65	2,78	2,53	0,11	4,12
Dens. do solo	g cm ⁻³	1,17	1,36	0,74	0,29	24,57	1,47	11,76	1,22	0,23	15,43	1,39	1,84	1,16	0,31	22,60	1,30	1,44	1,23	0,09	7,21	1,32	1,48	1,22	0,12	9,12
Limite de liquidez	g g ⁻¹	0,63	0,80	0,56	0,11	17,94	0,54	0,61	0,41	0,09	16,97	0,50	0,59	0,39	0,10	20,13	0,66	0,71	0,60	0,05	7,44	0,65	0,79	0,50	0,12	18,89
Limite de plasticidade	g g ⁻¹	0,46	0,58	0,39	0,09	18,93	0,33	0,40	0,22	0,08	24,11	0,28	0,35	0,26	0,04	15,20	0,40	0,44	0,34	0,05	11,32	0,34	0,42	0,27	6,00	18,08
Índice de plasticidade	adm.	0,18	0,22	0,15	0,03	17,10	0,21	0,22	0,19	0,01	5,77	0,22	0,33	0,13	0,08	37,75	0,26	0,27	0,26	0,01	2,01	0,31	0,37	0,18	0,09	28,68
Macroporosidade	(%)	3,05	4,13	1,83	1,12	36,76	1,22	1,52	0,58	0,43	35,37	2,45	5,16	0,80	1,90	77,64	1,62	2,12	0,78	0,62	37,98	1,34	2,08	1,02	0,50	37,06
Mesoporosidade	(%)	4,60	5,51	2,86	1,22	26,56	2,47	2,92	2,24	0,31	12,49	2,51	3,36	0,90	1,11	44,41	2,89	3,99	1,41	1,08	37,27	3,60	5,27	2,05	1,33	36,96
Microporosidade	(%)	15,13	16,96	13,44	1,52	10,02	12,03	13,55	10,67	1,29	10,72	11,30	13,54	9,39	1,71	15,11	12,90	14,68	11,98	1,24	9,59	10,01	11,38	7,68	1,67	16,65
Criptopors	(%)	35,61	50,42	27,89	10,07	28,29	34,67	44,77	19,76	10,59	30,55	34,90	39,70	23,63	7,59	21,74	33,90	40,83	36,67	1,86	4,72	39,89	4,57	28,56	7,67	19,27
Porosidade total	(%)	58,39	72,35	51,90	9,51	16,30	50,39	59,81	35,25	10,69	21,21	51,16	59,35	34,71	11,16	21,80	51,31	58,02	53,93	1,89	3,34	54,38	58,91	46,28	5,90	10,76
θ _{vcc}	cm ³ cm ⁻³	0,45	0,56	0,37	0,10	21,65	0,43	0,52	0,27	0,11	25,81	0,43	0,49	0,31	0,08	19,28	0,48	0,51	0,45	0,03	5,34	0,46	0,53	0,35	0,08	17,13
θ _{vmp}	cm ³ cm ⁻³	0,36	0,50	0,28	0,10	28,29	0,35	0,45	0,20	0,11	30,55	0,35	0,40	0,24	0,08	21,74	0,39	0,41	0,37	0,02	4,72	0,40	0,46	0,29	0,08	19,24
UCC (0,90*LP)	g g ⁻¹	0,39	0,46	0,34	0,07	18,93	0,28	0,34	0,19	0,07	24,11	0,29	0,29	0,22	0,04	15,20	0,34	0,37	0,29	0,04	11,32	0,29	0,35	0,23	0,05	18,08
Carbono org. do solo	dag kg ⁻¹	9,88	12,35	6,80	2,57	26,03	2,90	5,15	2,00	1,50	51,90	3,13	4,70	1,25	1,45	46,46	1,49	3,05	0,32	1,72	115,45	2,79	5,30	1,25	1,78	64,03
Cond. hidráulica saturada	mm h ⁻¹	5,02	7,25	3,89	1,51	30,10	18,33	5,07	0,10	22,68	123,69	9,66	15,51	0,01	6,83	70,68	2,45	7,86	0,16	3,62	147,69	16,80	45,11	0,50	19,99	119,01

Max= valor máximo; Min = valor mínimo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; UCC(0,90*LP) = umidade crítica de compactação correspondendo a 90% do limite de plasticidade.

4.8 - Análises estatísticas

Inicialmente, todas as variáveis foram submetidas a análise multivariada com aplicação das análises de componentes principais (ACP), agrupamento (AG) e discriminante (AD) na análises exploratórias do comportamento físico-mecânico dos solos estudados sob os manejos específicos.

A análise multivariada é uma interessante ferramenta para a análise exploratória de dados na área de solos, permitindo uma simplificação na variabilidade dos dados, como também o agrupamento de amostras segundo sua similaridade e ainda permitindo a seleção de variáveis de maior importância na discriminação de grupos pré-selecionados.

Outra técnica exploratória dos dados é a análise de agrupamentos, cuja formação dos grupos se dá na identificação de padrões de comportamento de um banco dados (Barroso % Artes 2003), cuja finalidade é reunir por um critério de classificação pré-determinado as unidades amostrais em vários grupos, de tal forma que exista homogeneidade dentro dos grupos e heterogeneidade entre grupos. Segundo Hair Jr. et al.(2006), a ideia é maximizar a homogeneidade dos indivíduos dentro dos grupos, ao mesmo tempo que se maximiza a heterogeneidade entre os grupos.

A análise discriminante (AD) é uma técnica que pode ser usada para classificar elementos de uma população. Para sua aplicação é necessário que os grupos sejam pré-classificados. Desse modo, a AD constrói uma regra de classificação que minimiza o número de classificações incorretas, ou seja, o erro de classificar um elemento amostral de uma população quando, na realidade o elemento pertence à outra população, minimizando/eliminando assim os erros decorrentes de classificações (Nóbrega, 2010).

Os dados também foram submetidos à verificação e constatação da distribuição normal e homecedasticidade, premissas da análise de variância. Posteriormente foi realizada a análise de variância (ANOVA) com as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade por meio do programa estatístico SAS, versão *student 2.0*. Foram também realizadas análises de correlação e regressão desenvolvidas entre atributos físicos e mecânicos dos solos e manejos estudados.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Análise de componentes principais do comportamento mecânico do Gleysolo sob os diferentes sistemas de manejo da cana de açúcar

Assim, consta-se na tabela 7 a aplicação da análise de componentes principais para as variáveis físicas e de carbono orgânico do solo na profundidade de 0-0,20 m, como também o destaque das variáveis que possuem o autovalor superior a 0,70 nas componentes principais para o comportamento físico-mecânico do Gleysolo sob os manejos estudados.

Após o critério de eliminação de variáveis em cada componente principal (critério de Kaiser: autovalor < 0,70) realizou-se novo procedimento de ACP e constatou-se que o peso do autovalor a partir do componente 3 reduziu para valores menores que 1. Logo, componente com autovalor menor que 1, não devem ser indicada para análises ou seleção de componentes principais. Desse modo, pode-se dizer que a componente 1, é a componente mais importante para o estudo, pois é derivada do maior autovalor e possui uma explicação de 51,70% da variância total representada pelas variáveis que mais contribuem na componente 1, as quais são: limite de liquidez, limite de plasticidade, carbono orgânico do solo, densidade inicial do solo e o índice de compressão. As variáveis presentes na componente 2 são responsáveis por 30,59 % da variação total, sendo composta pelo conteúdo de argila e areia.

Observa-se a análise inicial de 18 variáveis que podem exercer influência na pressão de précompressão. Com base na escolha do número de componente principais, foram selecionadas apenas quatro componentes com autovalores superiores a 1. Nesses componentes, apenas três possuem dez variáveis (argila, areia, argila dispersa em água, limite de liquidez, limite de plasticidade, carbono orgânico do solo, diâmetro médio ponderado seco, densidade inicial do solo e o índice de compressibilidade) que apresentaram o peso dos autovalores superiores a 0,70 nas componentes 1, 2 e 3.

Desse modo, as sete variáveis restantes, nas duas componentes principais, são responsáveis por representar mais de 80 % da variância total que está ocorrendo com as pressões de précompressão nos sistemas de manejo da cana-de-açúcar. As variáveis granulométricas, densidade inicial do solo, carbono orgânico

presentes, índice de compressão, limites de liquidez e plasticidade nas C1 e C2 contribuem nos efeitos da pressão de précompressão no Gleissolo na profundidade de 0-0,20 m. Imhoff et al. (2004), estudando vários tipos de solos com ampla variação de textura, sob cultivo de cana-de-açúcar em uma topossequências concluíram que a compressibilidade é dependente de diversos atributos físicos, especificamente do estado de compactação inicial. Então, os autores apresentaram um modelo que incorpora o efeito da textura, umidade, matéria orgânica e densidade do solo na pressão de précompressão.

Tabela 7- Componentes principais para as variáveis em estudo na profundidade de 0–0,20 m.**** Variáveis eliminadas.*Variável em análise

Váriaveis	Componentes principais							
	Análise inicial				Após eliminação			
	C 1	C 2	C 3	C 4	C 1	C 2	C 3	
Argila	-0,32	-0,77	-0,23	0,28	*****	-0,76	0,06	
Areia	-0,02	0,92	0,11	-0,04	*****	0,90	-0,16	
Silte	0,34	-0,68	0,05	-0,21	*****	*****	*****	
Argila dispersa em água	-0,32	-0,05	-0,70	-0,21	*****	*****	*****	
Macroporos	-0,58	0,27	-0,34	0,07	*****	*****	*****	
Mesoporos	-0,61	0,18	-0,26	-0,54	*****	*****	*****	
Microporos	-0,13	0,40	-0,03	0,57	*****	*****	*****	
Criptoporos	-0,68	-0,22	0,43	0,17	*****	*****	*****	
Limite de liquidez	-0,79	-0,48	0,13	0,19	-0,79	-0,34	-0,14	
Limite de plasticidade	-0,81	-0,23	0,34	0,02	-0,81	-0,04	-0,28	
Carbono orgânico do solo	-0,93	0,14	0,03	0,01	-0,93	0,48	-0,41	
DMP Seco	-0,27	0,14	-0,87	-0,02	*****	*****	*****	
DMP úmido	0,43	0,10	0,15	-0,19	*****	*****	*****	
DMG seco	0,03	-0,01	-0,64	0,59	*****	*****	*****	
DMG úmido	-0,04	-0,55	-0,46	-0,30	*****	*****	*****	
Densidade inicial do solo	0,76	-0,15	-0,20	0,09	0,76	-0,40	-0,47	
Umidade volumétrica	-0,32	-0,20	0,41	-0,02	*****	*****	0,41	
Índice de compressão (C c)	-0,84	0,29	-0,01	-0,17	-0,84	0,49	0,30	
* Pressão de pré-compressão	0,42	-0,08	0,00	0,05	0,42	-0,08	0,00	
Autovalor	5,30	3,01	2,66	1,36	3,62	2,14	0,60	
Variância total (%)	29,44	16,70	14,77	7,58	51,70	30,59	8,61	
Autovalor Acumulado	5,30	8,31	10,96	12,33	3,62	5,76	6,36	
Acumulado (%)	29,44	46,14	60,91	68,49	51,70	82,29	90,91	

Na tabela 8, observa-se quatro componentes principais, os quais foram escolhidos em função do seu autovalor maior que 1 para a profundidade de 0,20 – 20,40 (m). Nos componentes principais 1 e 2, observa-se que, do total de 19 variáveis, apenas nove (argila, areia, macroporos, mesoporos, limite de liquidez,

carbono orgânico do solo, diâmetro médio geométrico, densidade inicial do solo e índice de compressão) apresentaram o peso do autovalor superior a 0,70 nas componentes selecionadas.

Após o critério de eliminação de variáveis em cada componente principal (autovalor $\leq 0,70$) procedeu-se uma nova ACP com as nove variáveis restantes e, constatou-se que o peso do autovalor na componente 3 foi menor que 1. Logo, a componente com autovalor menor que 1, não deve ser indicada para análises ou seleção de componentes principais.

Desse modo, pode-se dizer que a componente 1 é a componente mais importante para o estudo, pois é derivada do maior autovalor e possui uma explicação de 56,28% da variância total, sendo que as variáveis que mais contribuem no componente 1 são: argila, areia e o limite de liquidez. A componente 2 possui os maiores pesos nos autovalores, com e com apenas 2 variáveis representadas pelos macroporos e pelo índice de compressão do solo. A componente 2 representa 30,91 % da variância total. Com isso, estas duas componentes principais (C1 e C2), representam mais de 89 % da variância total.

Tabela 8 - Componentes principais para as variáveis em estudo na profundidade de 0,20 – 20,40 m. ****Variáveis eliminadas.*Variável em análise

Variáveis	Componentes principais						
	Análise inicial				Após eliminação		
	C 1	C 2	C 3	C 4	C 1	C 2	C 3
Argila	-0,92	-0,13	-0,05	0,12	0,96	0,03	0,18
Areia	0,91	0,28	0,04	-0,03	-0,97	-0,16	-0,15
Silte	-0,68	-0,52	0,01	-0,17	*****	*****	*****
Argila dispersa em água	0,01	0,32	-0,26	0,65	*****	*****	*****
Macroporos	0,07	0,73	0,21	0,14	-0,16	-0,86	0,47
Mesoporos	0,05	0,75	-0,12	0,01	*****	*****	*****
Microporos	0,14	0,61	-0,31	-0,44	*****	*****	*****
Criptoporos	-0,56	0,16	0,65	0,11	*****	*****	*****
Limite de liquidez	-0,89	0,03	-0,11	-0,32	0,93	-0,13	-0,15
Limite de plasticidade	-0,62	0,44	-0,30	-0,36	*****	*****	*****
Carbono orgânico do solo	-0,20	0,80	-0,33	0,09	*****	*****	*****
DMP Seco	-0,65	-0,05	-0,15	0,56	*****	*****	*****
DMP úmido	-0,53	-0,11	-0,01	-0,22	*****	*****	*****
DMG seco	-0,76	-0,18	-0,08	0,27	*****	*****	*****
DMG úmido	0,01	0,25	-0,47	0,48	*****	*****	*****
Densidade inicial do solo	0,36	-0,76	-0,41	0,11	*****	*****	*****
Umidade volumétrica	-0,08	0,48	0,70	0,28	*****	*****	*****
Índice de compressão (Cc)	-0,33	0,86	-0,06	-0,18	0,23	-0,87	-0,42
*Pressã de pré-compressão	0,03	0,15	0,27	0,06	0,03	0,15	0,27
Autovalor	5,23	4,45	1,77	1,72	2,81	1,55	0,47
Variância total (%)	29,06	24,70	9,81	9,55	56,28	30,91	9,49
Autovalor Acumulado	5,23	9,68	11,44	13,16	2,81	4,36	4,83
Acumulado (%)	29,06	53,76	63,57	73,12	56,28	87,19	96,68

O outro aspecto da ACP é realizar a sobreposição dos componentes 1 e 2, formando uma nuvem de variáveis por meio de correlações. Desse modo é possível identificar visualmente quais das variáveis selecionadas após eliminação estão mais relacionadas com as pressões de précompressão do solo nos sistemas de manejos em estudo.

Observa-se nas figuras 22(a) e 22(b) que as variáveis não estão sobrepostas umas às outras, demonstrando assim diferentes representatividades no gráfico. Como também outro fator importante, é que todas às outras variáveis estão muito próximas da linha do círculo unitário, indicando uma forte correlação com a pressão de précompressão.

Na profundidade de 0-0,20 m (figura 22-a) as variáveis carbono orgânico do solo (CO) e índice de compressão (Cc), estão situada no quadrante I; desse modo, pode-se inferir que a pressão de précompressão é fortemente influenciada por estas variáveis, pois estão situadas no mesmo quadrante I, quando comparadas com as outras variáveis, que estão nos quadrantes opostos II, III e IV. Já para a profundidade de 0,20 – 0,40 m (figura 22-b) constata-se que a pressão de précompressão está situada no quadrante III, indicando que os macroporos e areia estão exercendo forte influência na pressão de précompressão nos sistemas de manejo em estudo.

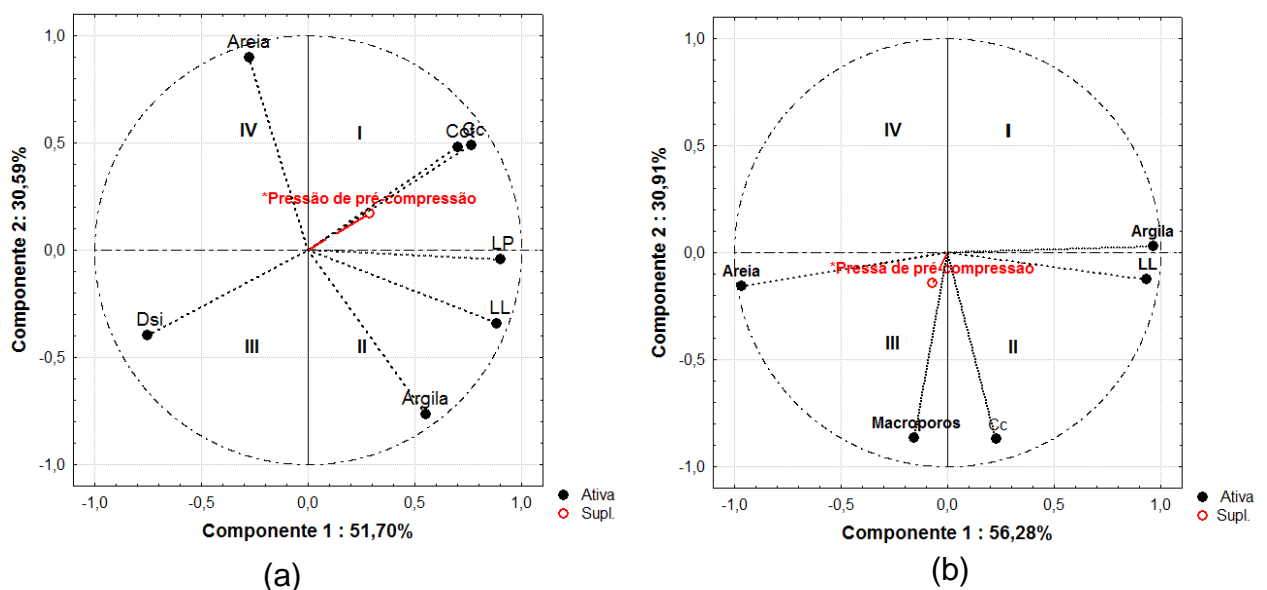


Figura 22 - Gráfico da distribuição da nuvem de variáveis no círculo de correlações nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).

5.2 - Análise de agrupamentos

A figura 23 apresenta os dendogramas de grupos formados pelos sistemas de manejo nas profundidades 0-0,20 (a) e 0,20-0,40m (b), construídos com as variáveis que exercem influência na pressão de précompressão, selecionadas pela ACP nas duas profundidades em estudo. Observa-se que em ambos os dendogramas “a” e “b”, foram formados três grupos conforme o corte na distância Euclidiana. Em ambos dendogramas, não houve a dispersão dos indivíduos do sistema com capineira nativa para outros grupos, ficando concentrados apenas no grupo três (G3) quando comparado com outros sistemas de manejo. No entanto, dentro do G3, surgem outros indivíduos que apresentam características homogêneas com o sistema de capineira nativa e heterogênea em relação a outros grupos. Os grupos 1 e 2 apresentam indivíduos pertencentes aos quatro sistemas de manejo, com isso indicando sistemas distintos com características semelhantes dentro do mesmo, em ambos dendogramas “a” e “b” .

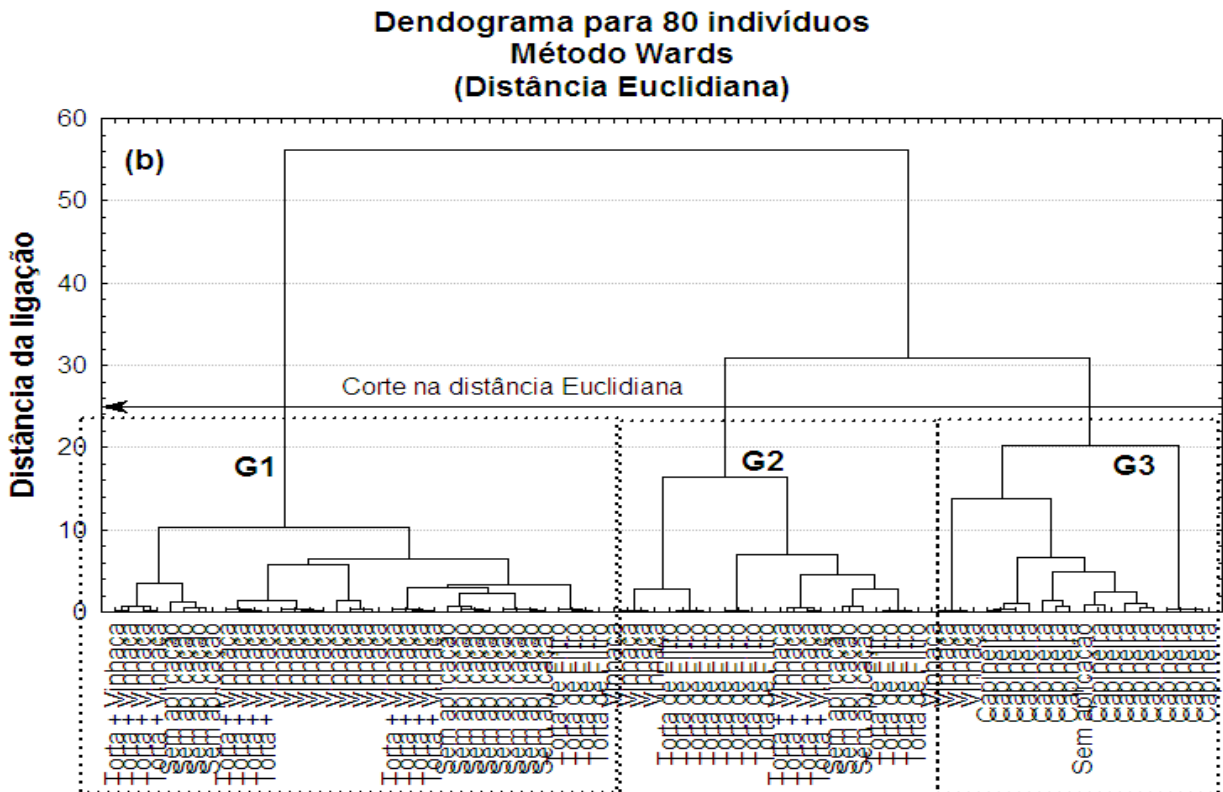
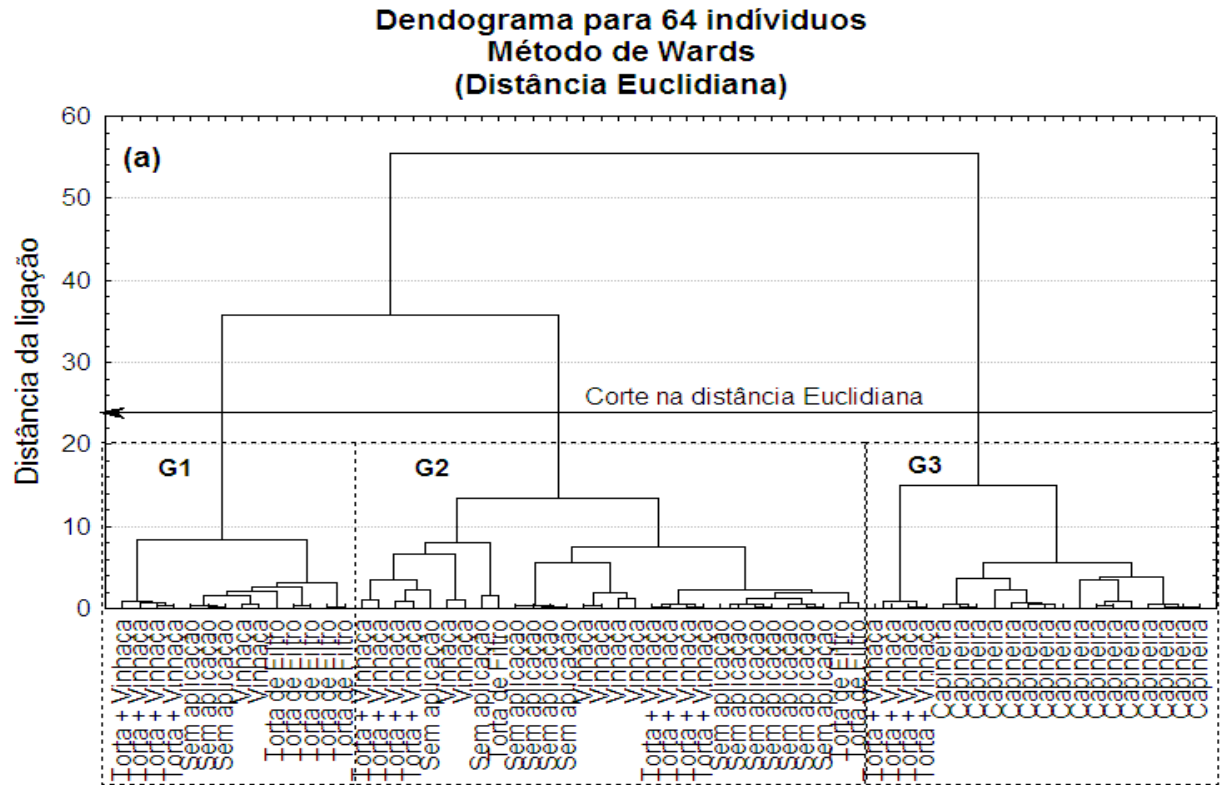


Figura 23 - Dendrograma representando os grupos formados pelos sistemas de manejo nas profundidades de 0 – 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).

5.3 - Análise discriminante

Observa-se que nas figuras 24-a e 24-b, o grupo 1, o qual continha indivíduos dos quatro sistemas de manejo, formou um grupo isolado dos outros sistemas de manejo, confirmando o resultado da AG onde os indivíduos desse grupo foram agrupados corretamente com um percentual de acerto de 100%.

Ainda na figura 24-a, o percentual total de acertos na classificação dos 64 indivíduos formadores dos três grupos foi de 98,92 %, o qual, é considerado muito bom, mesmo a AG, classificando erroneamente 1 indivíduo como pertencente ao grupo 2, enquanto na verdade ele fazia parte do grupo 3, o qual continha o maior número de indivíduos do sistema de capineira nativa.

Ainda na figura 24-b, o percentual total de acertos na classificação dos 80 indivíduos formadores dos três grupos foi de 96,88 %. A AG agrupou erroneamente dois indivíduos em grupos diferentes, os quais pertenciam aos grupos 2 e 3 cada, ou seja, a AG informou que um sistema de manejo pertencia ao grupo 2, enquanto na verdade pertencia ao G3 e vice-versa.

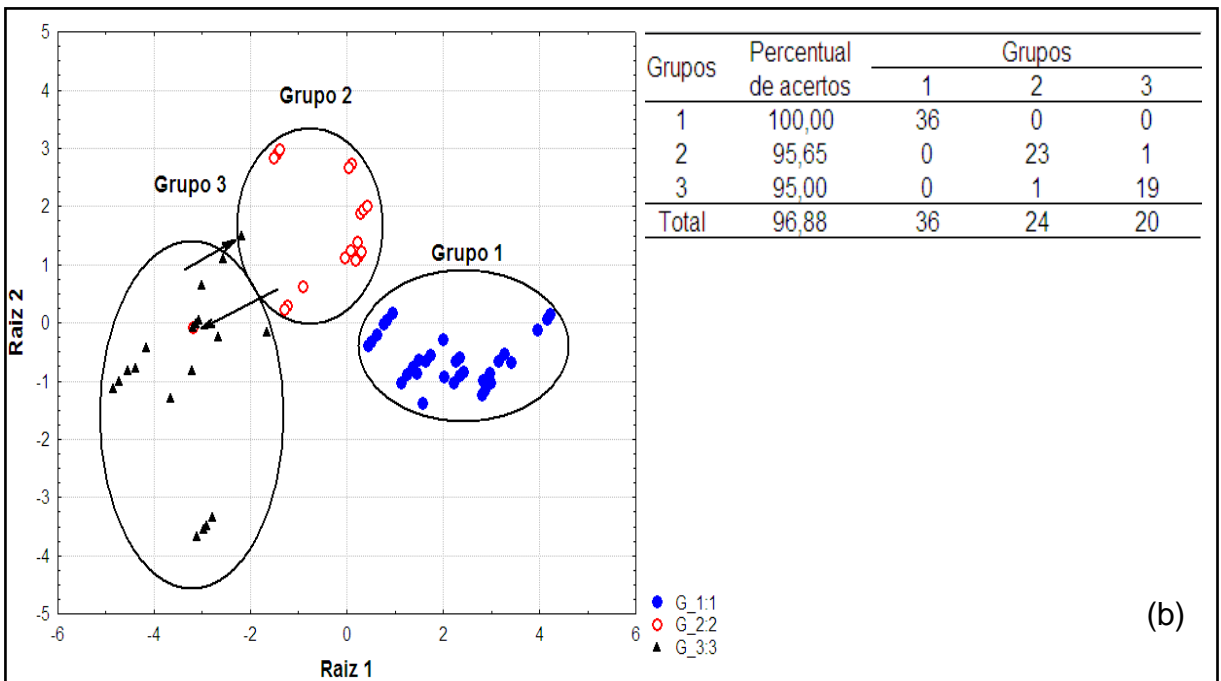
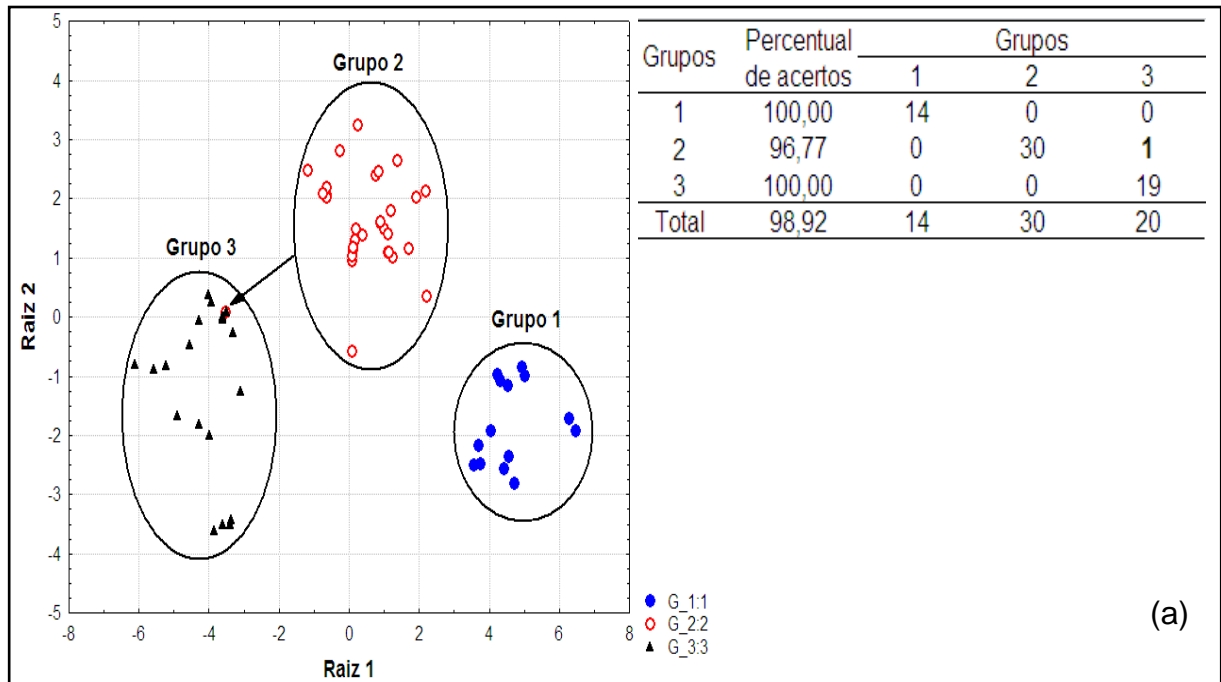


Figura 24 - Análise discriminante para os sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b) em função da análise de agrupamentos.

5.4 - Curva de retenção de água no solo dos sistemas de manejo e umidades usadas nos ensaios de cisalhamento e compressibilidade do solo

Observa-se na figura 25, as curvas característica de retenção de água no solo (CRAS) dos sistemas de manejo, nas quais, foram estabelecidos os níveis de umidade a serem usados em cada sistema de manejo com cana de açúcar e capineira nativa. Procurou-se englobar os níveis de umidade que compreendesse a maior quantidade de sistemas possíveis. Desse modo, foram selecionadas umidades compreendidas entre 0,42 e 0,50 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, as quais compreendem o maior número de sistemas cultivados com cana-de-açúcar e capineira nativa. Observa-se que a entrada de ar e conseqüentemente a saída de água de modo mais intenso, está ocorrendo em praticamente todos os sistemas a partir de 1,0 kPa nas duas profundidades avaliadas, desse modo, demonstrando a dificuldade de drenagem de água de poros em sucções menores que 1 kPa, Porém, apenas o sistema com aplicação de torta de filtro + vinhaça na profundidade de 0,20 – 0,40 m, apresenta uma umidade crítica de sucção a partir de 0,022 kPa.

Com a compressão do solo na superfície, imposta por máquinas e implementos agrícolas nas áreas cultivadas, ocorre a diminuição da macroporosidade, e em um primeiro momento, a microporosidade aumenta (tabela 5 e 6), aliado a predominância da micro e criptoporosidade de origem pedogenética, estes dois fatores promovem um incremento do potencial matricial nas áreas cultivadas, o qual foi constatado pela menor inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão, conforme observado CCRA nas duas profundidades (figura 25). Desse modo, dificultando a drenagem em baixas tensões. Segundo Reichert et al., (2007), a microporosidade é responsável pela retenção e armazenamento, enquanto que a macroporosidade comanda a infiltração e a drenagem da água no solo.

Comparando os pontos de inflexão, nota-se uma variação bastante expressiva entre os sistemas com capineira nativa e os cultivados com cana-de-açúcar. No sistema com capineira nativa, constata-se que, o ponto de inflexão está em potencial mátrico menos negativo, fato ocasionado possivelmente pela maior macroporosidade (tabela 5 e 6) e, conseqüentemente aumentando a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão.

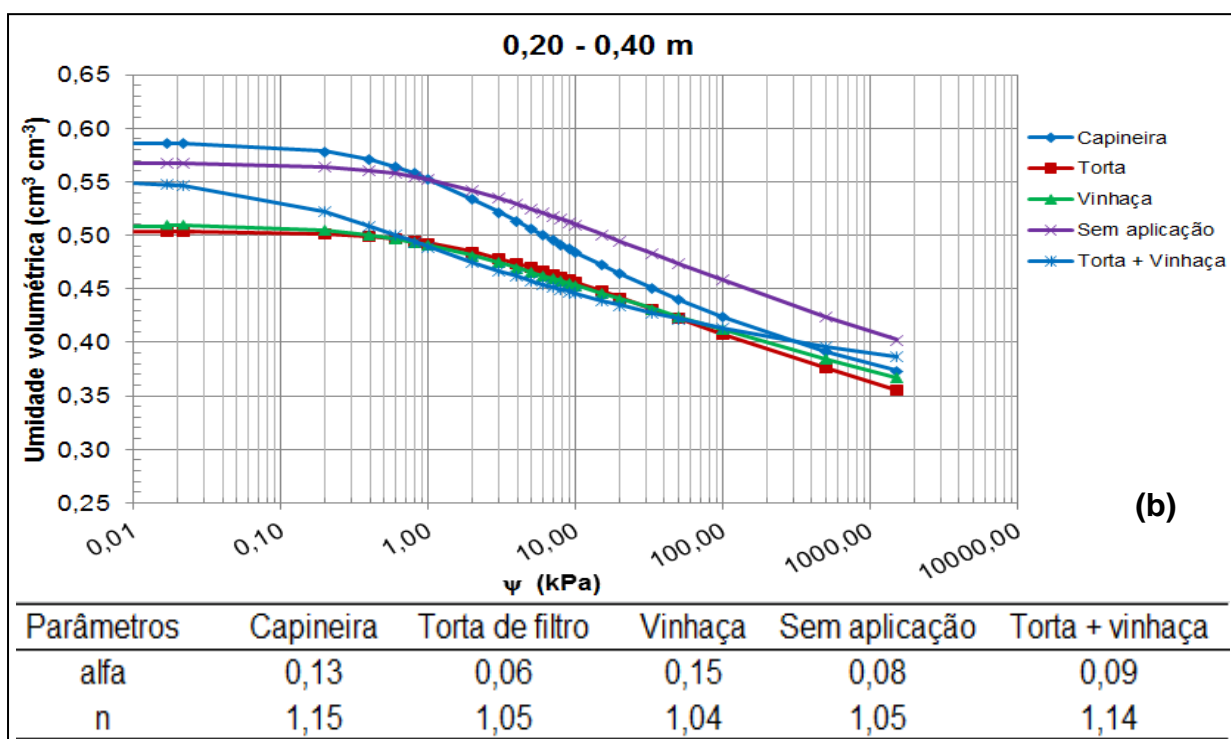
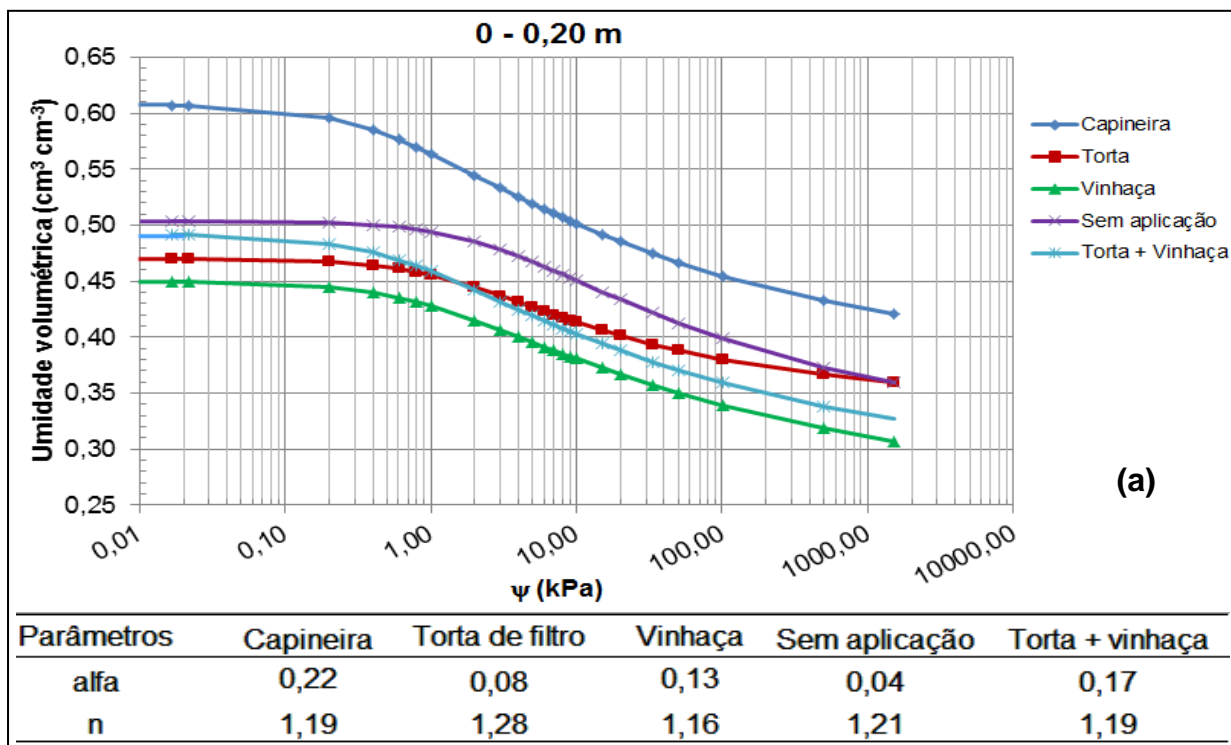


Figura 25 - Curvas características de retenção de água no solo dos sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).

5.5 - Reações de resistência ao cisalhamento direto convencional do Gleissolo sob diferentes manejos

5.5.1 - Cisalhamento direto convencional e envoltórios de resistência

Na figura 26 têm-se as envoltórias de resistência ao cisalhamento de cinco sistemas de manejo com amostras equilibradas em três umidades volumétricas. Para a seleção das envoltórias, foram selecionadas as tensões de cisalhamentos e suas respectivas tensões normais que obtiveram um coeficiente de determinação (R^2) maior que 0,96.

Segundo Pinto (2000), a envoltória de resistência é uma curva até a tensão de précompressão e, uma reta cujo prolongamento passa pela origem acima desta tensão. Ainda segundo o autor, não é prático se trabalhar com envoltórias curvas, então, se costuma substituir o trecho curvo da envoltória por uma reta que a melhor represente. Desse modo, a inclinação da reta no sistema com capineira nativa e com vinhaça na umidade $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, apresentaram menores inclinações correspondendo assim, a menores valores de ângulo de atrito interno nesses dois sistemas, enquanto que os demais sistemas, as retas apresentaram maiores inclinações.

Na análise das envoltórias de ruptura dos círculos de Mohr-Coulomb na figura 26, observa-se que os círculos tangenciam a envoltória de ruptura nos sistemas de manejo com capineira nativa, torta de filtro, vinhaça e sem aplicação na umidade $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Nessas condições atingiu-se em algum local, o plano a resistência ao cisalhamento do solo e, desse modo, ocorrendo as rupturas nas tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

Na umidade a $0,47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ apenas o sistema com aplicação de torta de filtro apresentou os círculos de Mohr tangenciando as envoltórias e, conseqüentemente, rupturas nas três tensões normais citadas anteriormente. Para a umidade $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ não foi possível definir as envoltórias de ruptura simultaneamente para as três tensões normais adotadas nos ensaios, no entanto, para as tensões normais de 100 kPa, nos sistemas de capineira nativa, sem aplicação e torta + vinhaça, as tensões no plano de ruptura foram menores que resistência ao cisalhamento, desse modo não ocorrendo a ruptura.

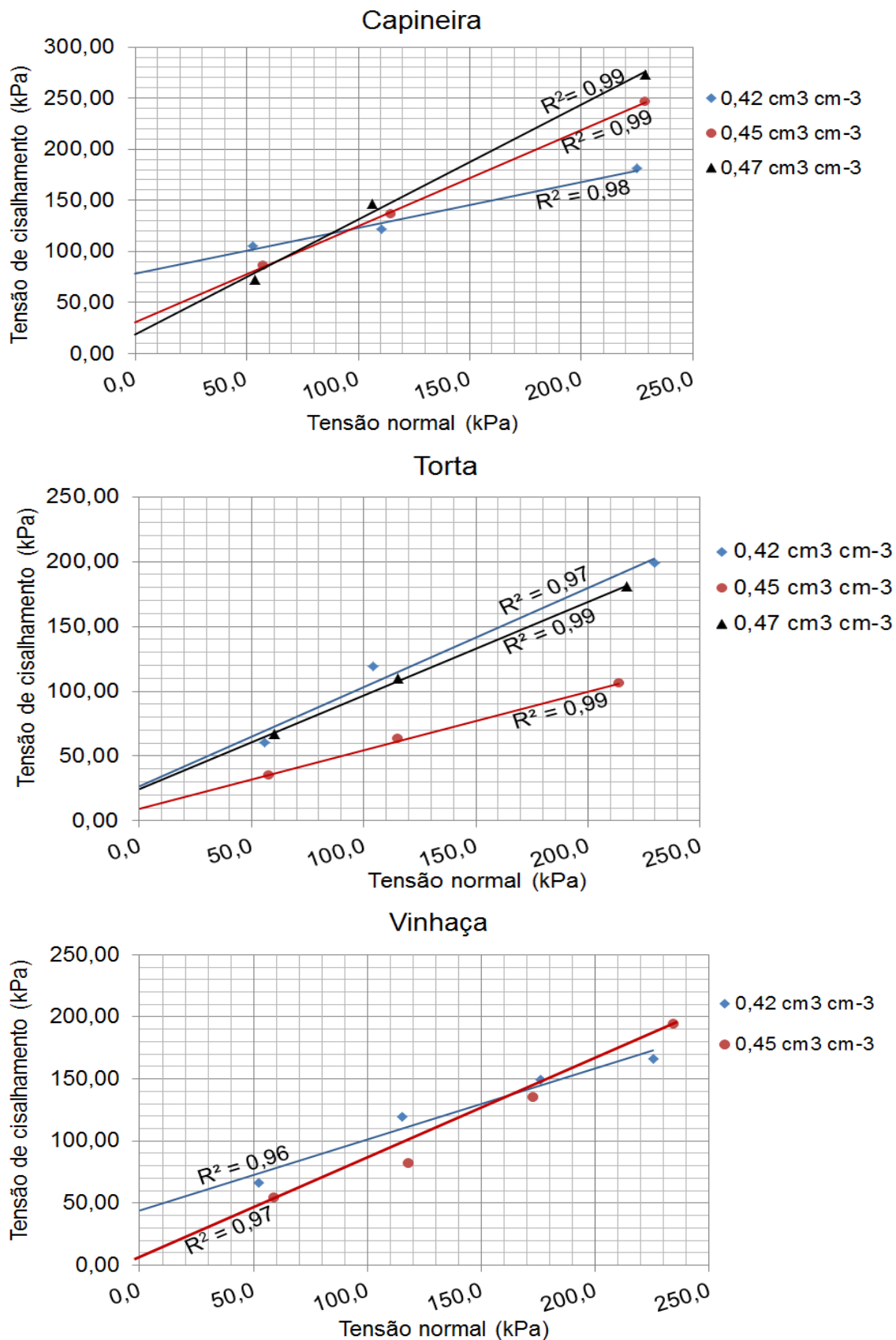


Figura 26 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Gleissolo Háplico submetido a cinco sistemas de manejo com amostras equilibradas em três umidades volumétricas.

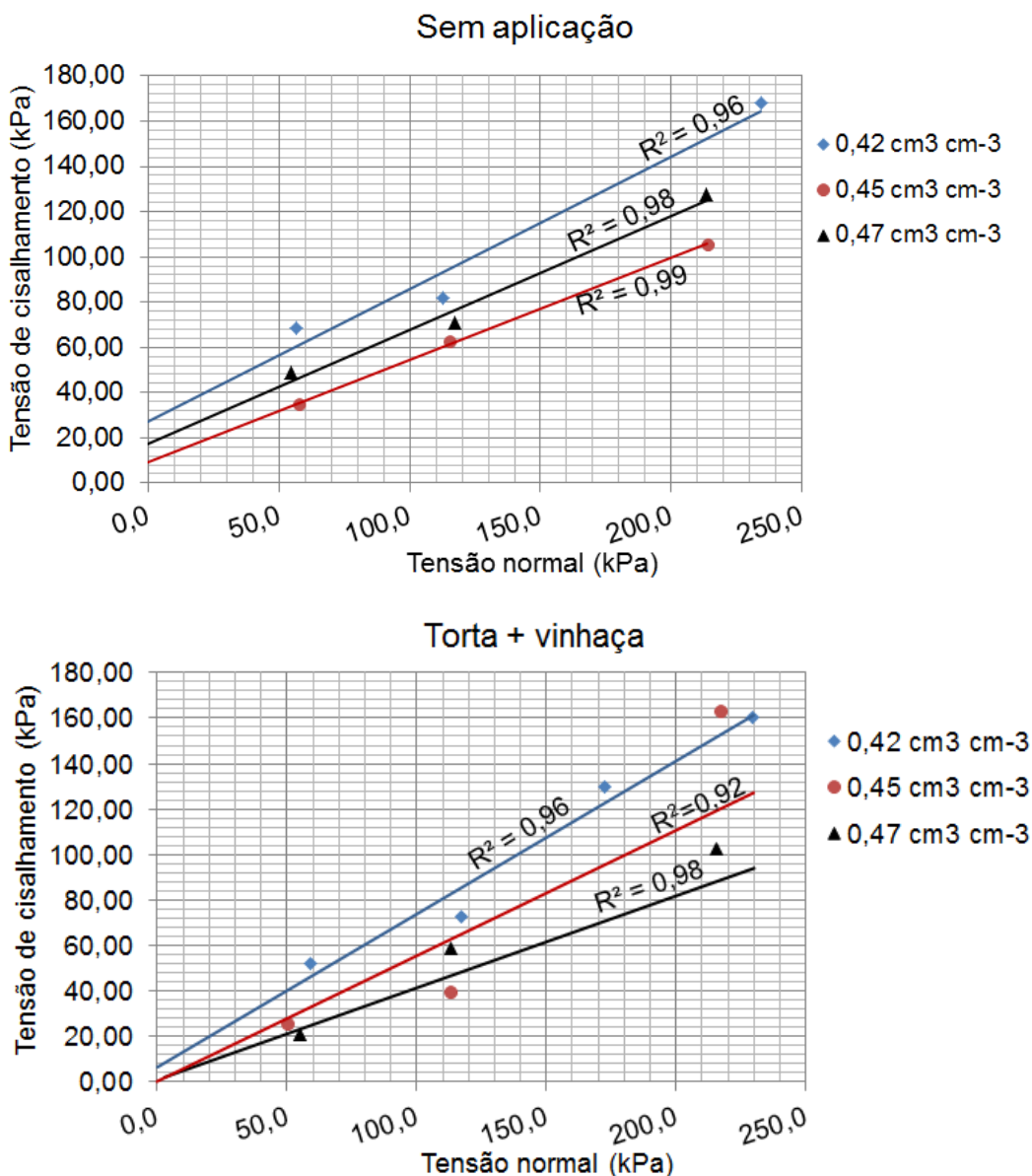


Figura 26 - Cont.

Na tabela 9, observa-se que não houve diferenças significativas nos valores de coesão para as diferentes condições de cultivo da cana-de-açúcar e, esses diferentes cultivos ou manejos da cana, só diferenciam-se da área sob capineira nativa. Ainda na tabela 9, que houve diferenças significativas na coesão em todas as condições de cultivo com cana, para os níveis de umidade do solo em estudo. As umidades próximas da saturação (figura 25) na maioria dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar favoreceram a não diferenciação da coesão do solo nos sistemas de manejo em estudo.

As fibras celulósicas presentes na torta de filtro da cana-de-açúcar possibilitaram a expressividade da coesão nos ensaios de cisalhamento conduzidos em umidades próximas da saturação, em relação ao sistema de manejo com aplicação de vinhaça, o qual a coesão não foi expressiva na umidade a $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Segundo Prabakar & Shidhar (2002), o aumento na coesão da matriz solo-fibra é devido a absorção de água das partículas do solo pelas fibras orgânicas, atuando assim no aumento da coesão entre suas partículas. Arvidsson et al. (2001) e Fredlund & Rahardjo, (1993) comentam que quando ocorre redução de água das partículas do solo, a distância entre elas é reduzida e, assim aumenta as forças de atração entre elas e conseqüentemente a coesão do solo.

O maior valor de coesão determinado foi de 59,45 kPa na umidade $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no sistema com capineira nativa. O que provavelmente deve-se ao maior conteúdo de carbono orgânico total do solo, conferindo assim, maiores coesões nesse sistema em relação às áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Os maiores valores de coesão do solo possibilitaram maiores resistências ao cisalhamento na capineira nativa, uma vez que, aumentos do carbono orgânico nos sistemas de manejo, há uma tendência de aumento na coesão do solo (figura 27). Ekwue, (1990) também constatou que o aumento de carbono orgânico em sistemas de capineira nativa, gerou aumento na resistência ao cisalhamento quando comparado com outros sistemas de manejo.

Havee et al., (2015), constataram em solos franco-argilosos da região Central do Iran, um aumento da resistência ao cisalhamento em sistemas de capineira nativa quando comparadas com cultivos tradicionais. No entanto, os autores observaram que o aumento da resistência ao cisalhamento deu-se provavelmente pela maior densidade de raízes e, Comino & Druetta (2010) também constataram aumento da resistência do solo por raízes de gramíneas em solos areno - siltosos na Itália. Para todas as situações, Waldron (1977) e Wu et al. (1979) consideram que as raízes das plantas contribuem para um aumento na resistência ao cisalhamento do solo, desse modo, essa contribuição deverá ser adicionada a equação Mohr-Coulomb, a qual não foi atribuída neste estudo.

Tabela 9 - Valores médios de coesão de um Gleissolo Háplico em diferentes sistemas de manejo para a profundidade de 0 – 0,20 m

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Sistemas de manejo				
	Capineira	Sem aplicação	Torta de filtro	Torta + vinhaça	Vinhaça
	Coesão (kPa)				
0,42	59,45 Aa	16,50 Ab	13,52 Ab	4,56 Ab	22,00 Ab
0,45	45,82 Aa	4,75 Ab	11,65 Ab	9,50 Ab	0,00
0,47	20,58 Aa	8,50 Ab	14,36 Ab	3,75 Ab	-----
COT (dag kg ⁻¹)	10,47 a	3,35 b	3,13 b	5,94 ab	3,61 b
Ds (g cm ⁻³)	1,01 b	1,36 a	1,39 a	1,31 a	1,49 a

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. COT = carbono orgânico total do solo.

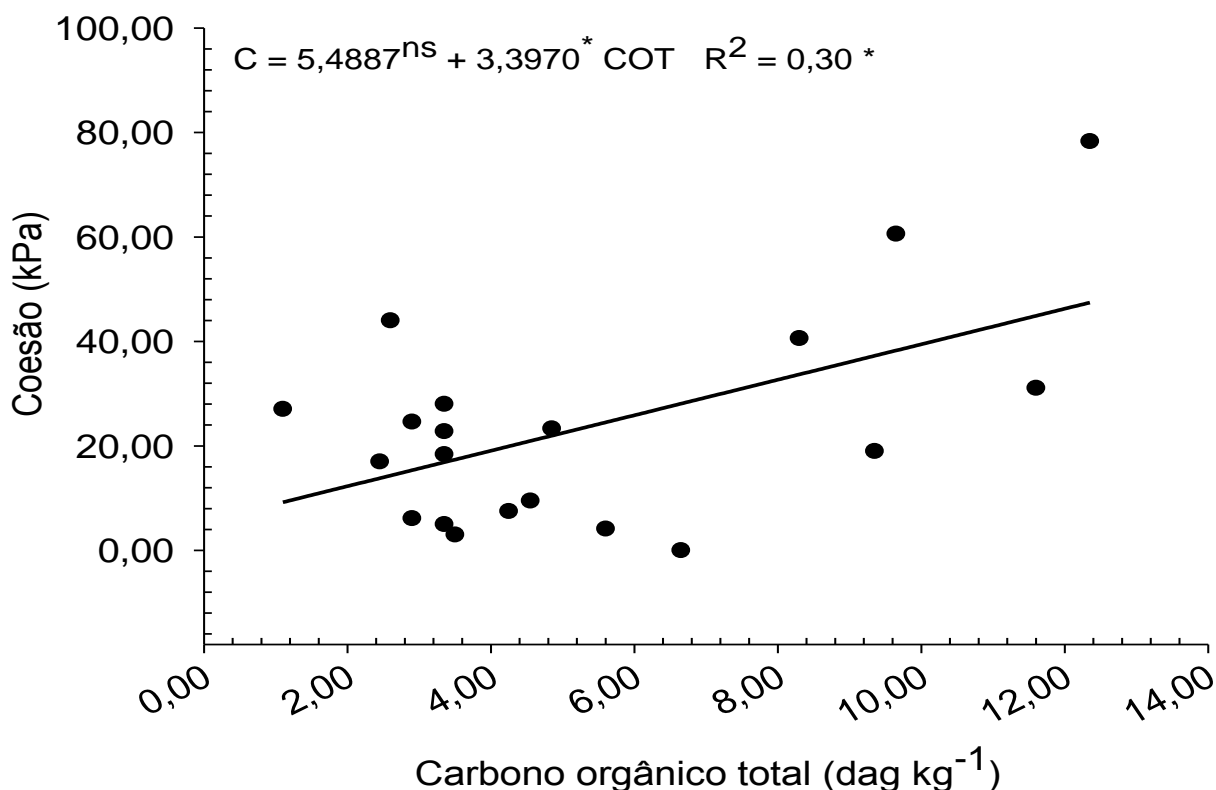


Figura 27 - Coesão de um Gleissolo Háplico em função do carbono orgânico do solo de todos os sistemas de uso estudados.

Na tabela 10, constam os valores do ângulo de atrito interno dos sistemas de manejo em três níveis de umidade volumétrica do solo. Não foram constatadas diferenças significativas no ângulo de atrito entre os sistemas de manejos na mesma umidade e também para as diferentes umidades. No entanto, novamente resalta-se que os níveis de umidade de 0,42, 0,45 e 0,47 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ na maioria dos sistemas de manejo, ficaram muito próximos da saturação, contribuindo assim, para não diferenciação dos ângulos de atrito interno. Valores de referências para ângulo de atrito interno em Gleissolos Háplicos em uso agrícola, ainda são incipientes na literatura, a qual apresenta poucos estudos para outros tipos de solos, como Latossolos (Silva & Carvalho 2007; Silva et al., 2004; Rocha et al., 2002; Secco, 2003), Argissolos (Brandt, 2005; Boeni, 2000), Nitossolos (Braidá, et al., 2007). A faixa de valores para ângulo de atrito no presente Gleissolo foi de de 21,33 a 44,75°.

Tabela 10 - Valores do ângulo de atrito interno de um Gleissolo Háplico em diferentes sistemas de manejo para a profundidade de 0 – 0,20 m

Umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Sistemas de manejo				
	Capineira	Sem aplicação	Torta de filtro	Torta + vinhaça	Vinhaça
	Ângulo de atrito interno (°)				
0,42	24,26 Aa	35,83 Aa	33,46 Aa	34,77 Aa	44,75 Aa
0,45	34,80 Aa	28,98 Aa	21,33 Aa	34,41 Aa	37,21 Aa
0,47	43,03 Aa	31,12 Aa	36,22 Aa	35,45 Aa	-----
COT (dag kg^{-1})	10,47 a	3,35 b	3,13 b	5,94 ab	3,61 b
IP (g g^{-1})	0,18 a	0,21 a	0,20 a	0,22 a	0,23 a

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. COT = carbono orgânico do total solo.

5.5.2 - Tensões de cisalhamento e processos de deformações

Na figura 28, observa-se as tensões de cisalhamento com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa em cada sistema de manejo nos três conteúdos de umidade volumétrica. As tensões de cisalhamento escolhidas foram às mesmas que formaram as envoltórias de resistência ao cisalhamento.

Nos três níveis de umidade, os sistemas de manejo nas três tensões normais aplicadas (50, 100 e 200 kPa), não apresentaram pico de tensão cisalhante

consecutivos de forma definida e, com seu respectivo declínio para o mesmo sistema de manejo. Tal comportamento deve estar relacionada com a baixa permeabilidade do Gleissolo Háplico, constatado pela condutividade hidráulica saturada (tabela 5 e 6) e, conseqüentemente, a dificuldade em dissipar a poropressão no processo de pré-adensamento das amostras desse modo, seria necessário diminuir a velocidade de cisalhamento, uma vez que, a escolha da velocidade cisalhante de $0,125 \text{ mm min}^{-1}$ utilizada no ensaio foi baseada em velocidades em estudos anteriores como os de Braida et al., (2007); Rosa, (2007); Silva & Carvalho, (2007); Silva & Cabeda, (2006); Silva et al., (2004), os quais, são possíveis encontrar velocidades de cisalhamento variando de $0,200$ a $0,330 \text{ mm min}^{-1}$. Como também, Pinto (2009) sugere maiores períodos (1 ou mais de 2 dias) de pressão de confinamento para que os processos da poropressão sejam nulos em solos argilosos. No entanto essa sugestão não seria possível adotar nos ensaios, devido a redução das umidades equilibradas nas tensões.

Observa-se ainda na análise da figura 28, que os sistemas de capineira nativa e os que receberam aplicação de matéria orgânica na forma de vinhaça e torta de filtro, apresentaram maiores resistências ao cisalhamento quando comparado com o sistema “sem aplicação” para as oito condições das nove estabelecidas. Na maioria dos ensaios prevaleceu o processo da compressão conforme a figura 29, a qual observa-se também nas menores tensões normais (50 kPa), que o sistema com capineira nativa apresentou o processo de expansão nos três níveis de umidade em estudo.

O comportamento expansível durante os ensaios de cisalhamento direto está relacionado com as menores tensões normais, as quais aumentam o efeito da expansão no decorrer dos testes. Tal efeito é reduzido quando tensões maiores são impostas à amostra, ocorre assim, a superação da resistência ao cisalhamento imposta pela forma de encaixe das partículas do solo (imbricamento) durante os ensaios de cisalhamento, desse modo reduzindo o processo de expansão.

Segundo Pinto (2000), o aumento de volume do solo caracterizado pela sua expansibilidade, pode ser justificado pela teoria da elasticidade quando ocorrem somente acréscimos de tensões, mesmo a sua aplicação sendo questionável pelo fato do comportamento dos solos normalmente serem anisotrópicos, não

homogêneos e não elástico. No entanto, por não dispor ainda de uma melhor alternativa, como também a teoria tem apresentado uma condição satisfatória das tensões atuantes no solo, fazendo-se então o uso de sua aplicação.

Souza, W. L. S. - Comportamento físico-mecânico de dois solos cultivados com cana-de-açúcar

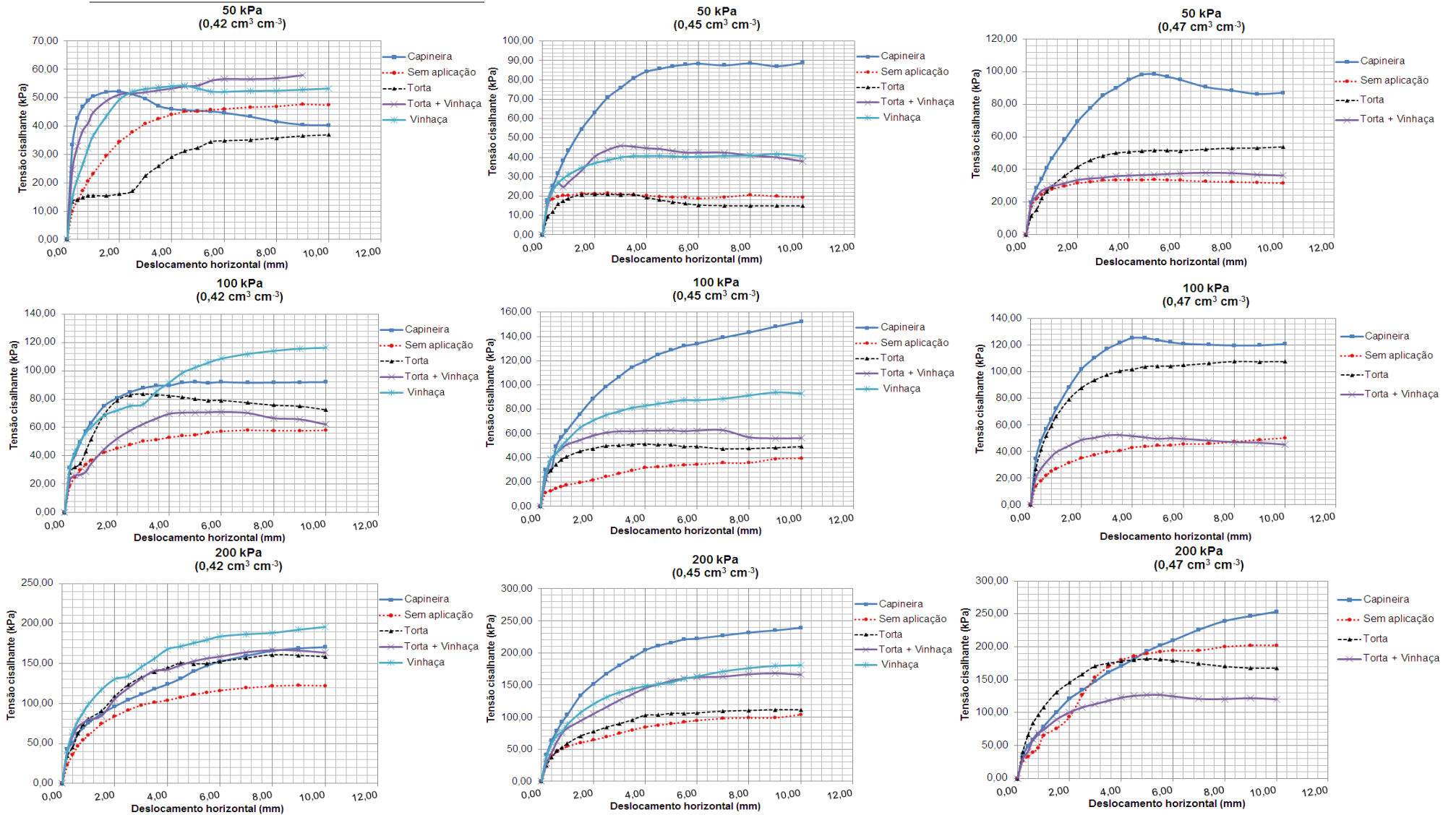


Figura 28 - Tensões cisalhantes e deslocamentos horizontais.

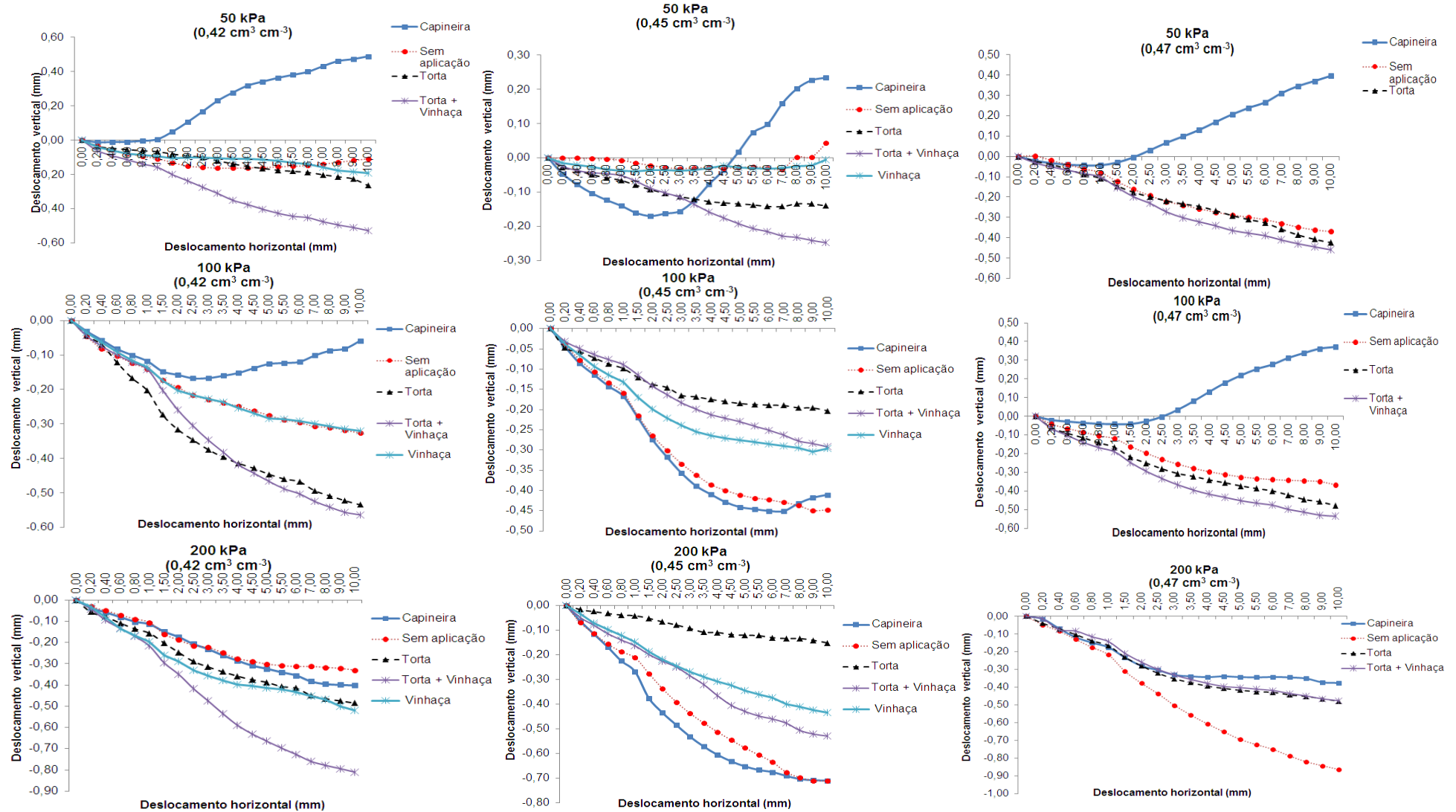


Figura 29 - Processos de deformações horizontais e verticais do Gleissolo Háplico durante os ensaios de cisalhamento direto.

5.6 - Estudo da compressibilidade do Gleissolo Háplico sob os diferentes manejos da cultura da cana de açúcar

5.6.1 - Tensões de précompressão (σ_p) e relações de predição

Na tabela 11, constata-se que a pressão de précompressão não apresentou diferenças significativas entre os sistemas e manejo como também com a redução da umidade volumétrica do solo. Na profundidade 0 – 0,20 m a pressão variou de 48,30 a 22,18 kPa e, na profundidade de 0,20 – 0,40 a variação foi de 59,15 a 23,93 kPa. Em ambas as profundidades, os valores de pressão de précompressão são considerados baixos em todos os sistemas de manejo conforme a classificação estabelecida por Horn & Fleige (2003).

A alta umidade no momento dos ensaios (figura 25) nas amostras do Gleissolo Háplico, aliado à porosidade total composta em pequena parte por poucos macroporos (< 5%) (tabela 5 e 6) foram responsáveis por não haver diferenciação nas pressões de compressão dos sistemas em estudo, onde, a compressão e deformação dependem da expulsão da água do meio poroso (macroporos) o qual, é bastante reduzido nos sistemas de manejo em estudo. Desse modo, a baixa macroporosidade, ocasiona uma saída de água ineficiente durante a aplicação das pressões nas amostras, possibilitando assim, o surgimento de pressões neutras dentro da amostra, as quais se contrapõem a pressão aplicada e, não são capazes de ocasionar deformações significativas no solo. Segundo Braida et al.(2010), quando o solo está em elevadas condições de umidade, as deformações ocorrem somente com a expulsão de água, devido ao surgimento de pressões neutras.

Mentges et al.(2013) avaliando alterações físico-mecânicas em um Gleissolo, também não constataram diferenças significativas nas tensões de précompressão, devido a alta umidade no momento do ensaio (>80%) e, uma baixa macroporosidade (<8,5 %).

Tabela 11 - Valores médios das pressões de précompressão (σ_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas

Umidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Prof. (m)	Sistema				
		Capineira	Torta	Vinhaça	Sem aplicação	Torta + vinhaça
0,43	0-0,20	48,30 Aa	22,93 Aa	23,58 Aa	26,90 Aa	39,28 Aa
0,45		36,60 Aa	31,98 Aa	23,48 Aa	22,18 Aa	30,18 Aa
0,48		30,70 Aa	-----	-----	26,53 Aa	22,55 Aa
0,5		39,40 Aa	-----	-----	26,48 Aa	27,20 Aa
CV (%)		26,11	26,84	30,34	26,06	35,92
Cot (dag kg^{-1})		10,47 a	3,13 b	3,61 b	3,35 b	5,94 ab
<hr/>						
0,43	0,20-0,40	44,37 Aa	50,03 Aa	35,67 Aa	39,30 Aa	59,15 Aa
0,45		39,85 Aa	35,90 Aa	37,40 Aa	39,15 Aa	34,15 Aa
0,48		46,20 Aa	33,25 Aa	39,85 Aa	27,50 Aa	31,58 Aa
0,50		23,93 Aa	36,03 Aa	36,05 Aa	42,03 Aa	51,63 Aa
CV (%)		32,57	26,44	22,9	27,85	26,44
Cot (dag kg^{-1})		9,88 a	2,90 b	3,13 b	2,98 b	2,79 b

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. CV = Coeficiente de variação.

Nas figuras 30 e 31, observam-se que em todas as situações a relação da D_s/D_{si} no sistema de capineira nativa foi a menor em todos os níveis de umidade volumétrica nas duas profundidades selecionadas. Era de se esperar no sistema de capineira nativa, que a menor densidade do solo conferisse menores pressões de précompressão, uma vez que, nas áreas cultivadas, as pressões externas exercidas por máquinas e equipamentos agrícolas, em condições de baixa umidade, fazem com que ocorra um empacotamento mais denso das partículas reduzindo a quantidade de poros (macroporos) e, conseqüentemente promovendo um maior número de pontos de contato entre elas. Desse modo, estes solos agrícolas apresentarão maiores capacidade de suporte de cargas em relação a solos sem cultivo, os quais não foram submetidos à pressões prévias em sua superfície. Diversos estudos constataam uma relação direta no aumento da pressão de précompressão com um aumento na densidade do solo, conforme verificado em Debiase et al.(2008); Saffih-Hdadi et al.(2009); Imhoff et al.(2004); Susuki et al. (2008).

Também observa-se que os sistemas com torta de filtro e vinhaça apresentaram maiores índices de vãos em relação aos demais sistemas sob cultivos agrícolas, conforme consta nas figuras 32 e 33, Segundo Braidá, et al., (2010), nos solos de menor densidade a porosidade do solo seria o fator determinante da resistência à compressão, especialmente porque uma porosidade maior significa um número menor de pontos de contatos entre as partículas minerais e, com isto, mesmo a matéria orgânica aumentando a resistência dos pontos de contato, este efeito fica prejudicado pelo reduzido número de pontos de contato existentes.

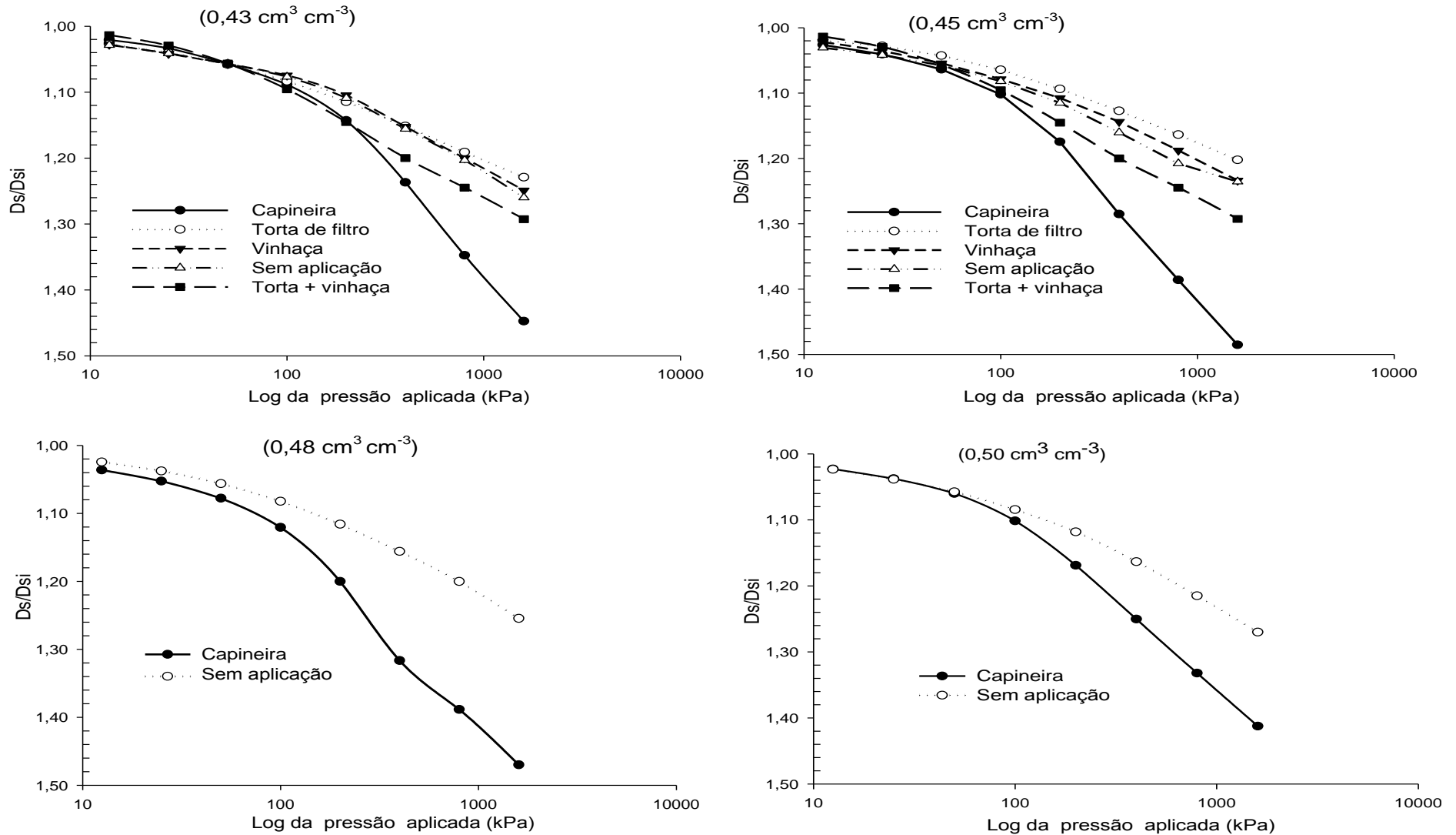


Figura 30 - Densidade do solo dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0 – 0,20 m).

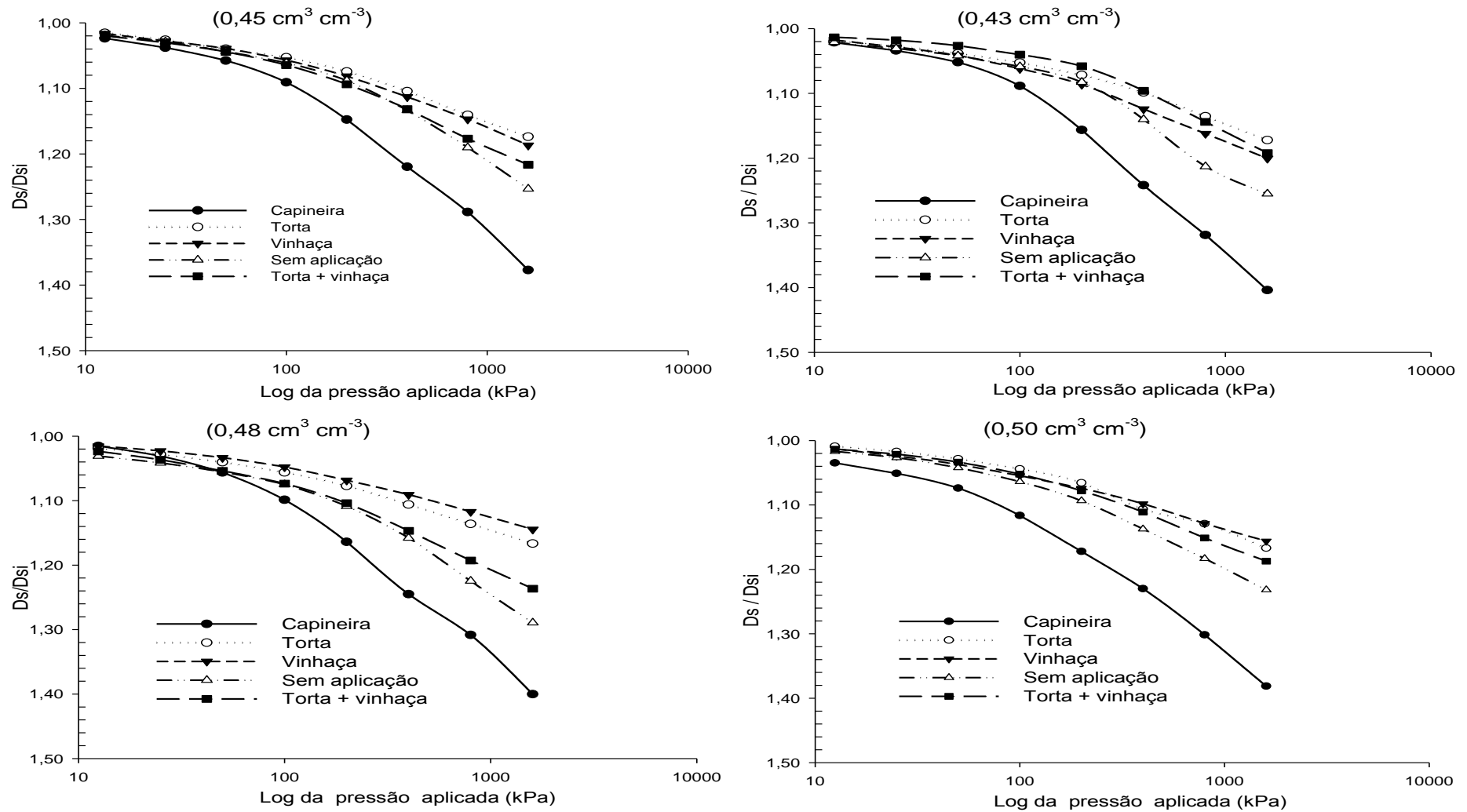


Figura 31 - Densidade do solo dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0,20 – 0,40 m).

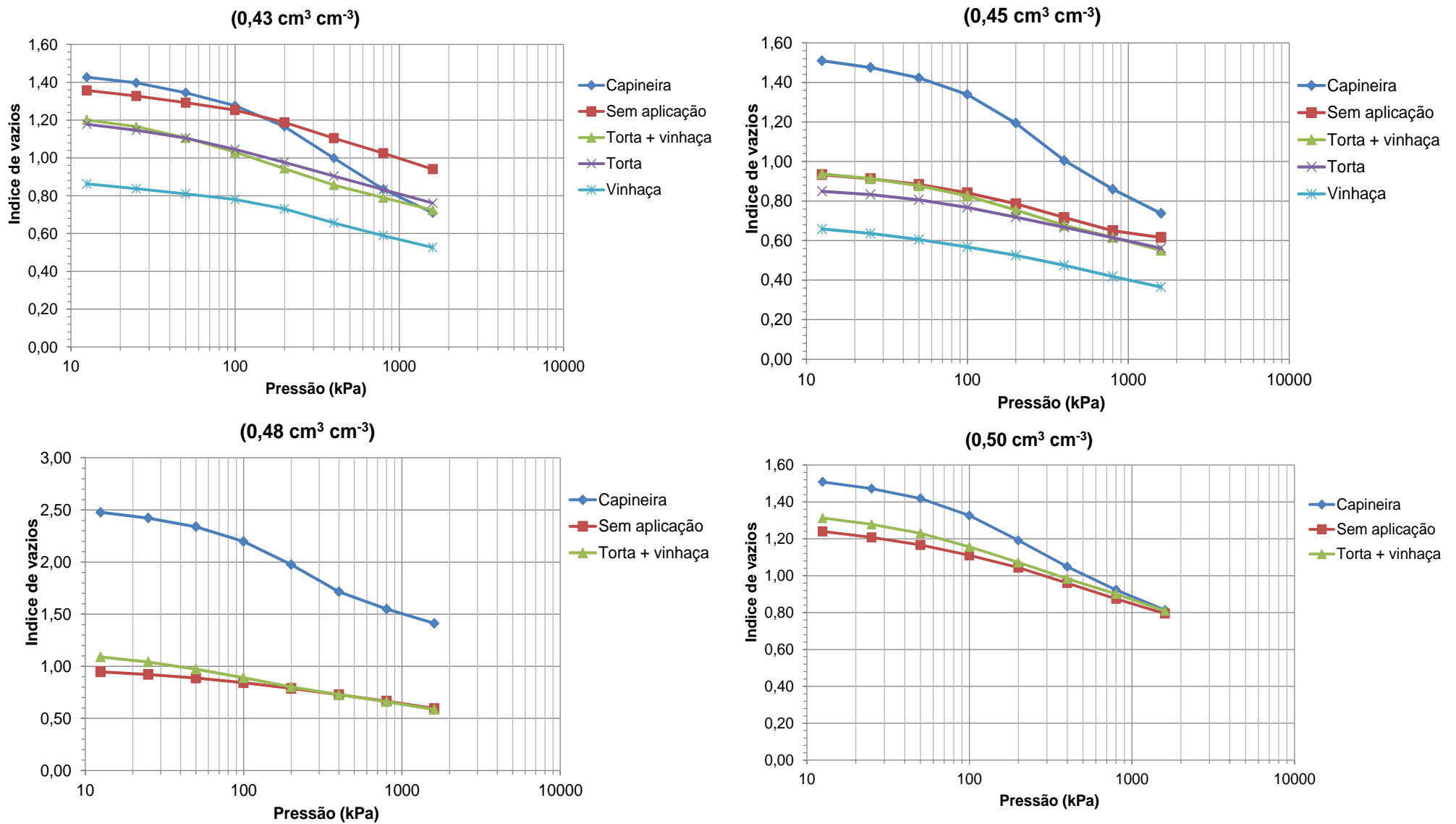


Figura 32 - Índice de vazios dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0 – 0,20 m).]

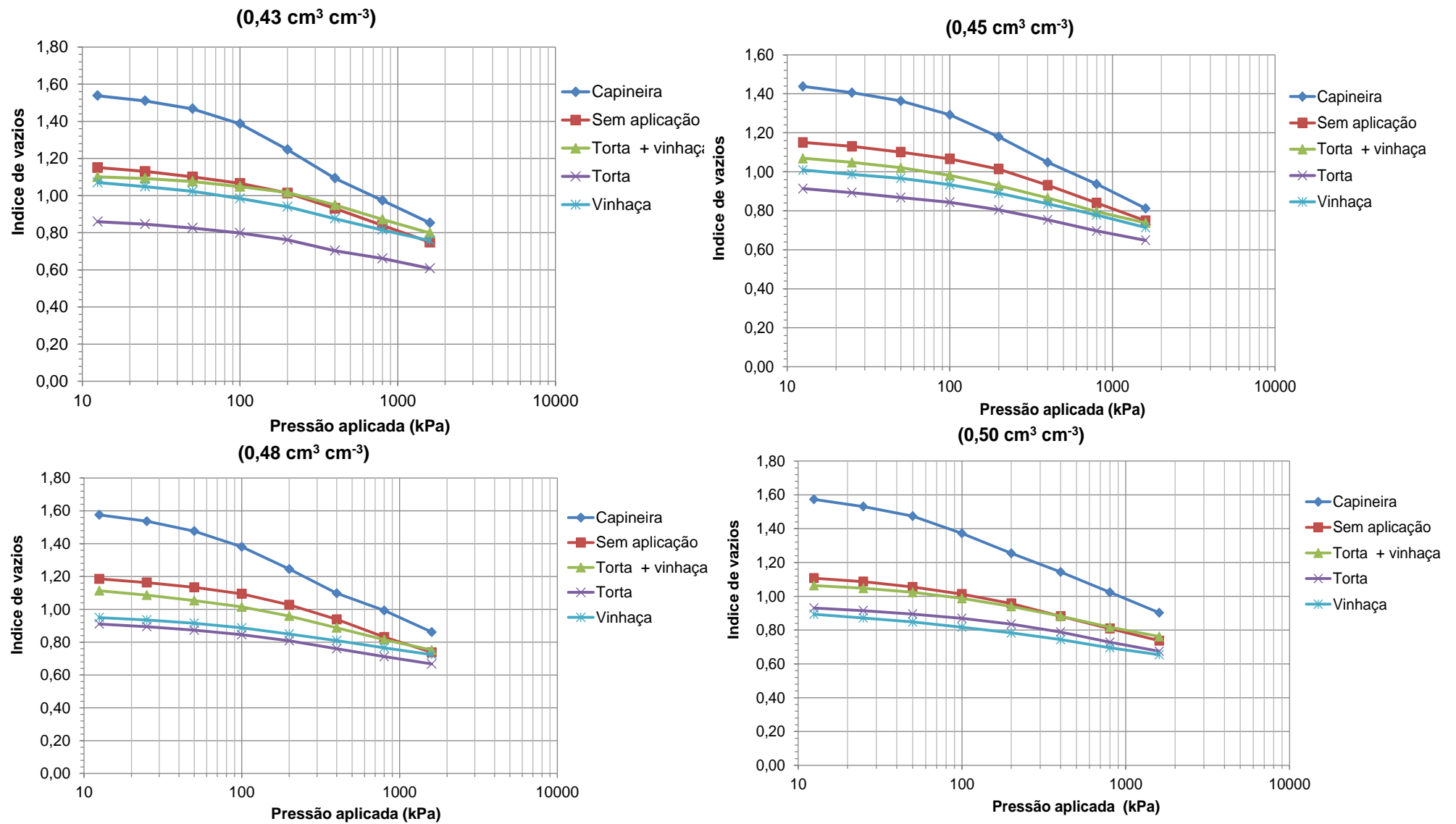


Figura 33 - Índice de vazios dos diferentes sistemas de manejo em função da pressão aplicada nos testes (0,20 – 0,40 m)

5.6.2 - Índice de compressibilidade e sua relação com alguns atributos físicos do solo.

Os resultados obtidos para o índice de compressibilidade (C_c) em função dos sistemas de manejo culturais da cana-de-açúcar e do conteúdo de água, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m estão apresentados na tabela 12. Como indicado por Silva & Cabeda (2006); Holtz & Kovacs (1981), o índice de compressão (C_c), por ser a inclinação da reta de compressão virgem, é usado como um indicador da compressibilidade do solo, sendo um solo tanto mais compressível quanto maior o seu índice de compressão. Assim, na análise da tabela 12, observa-se para o mesmo sistema de manejo que não houve diferenças significativas nas médias do C_c com a redução da umidade do solo nas duas profundidades avaliadas.

Ainda na tabela 12, nota-se na camada de 0 - 0,20 (m) que nas umidades de 0,43 e 0,45 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ o sistema de capineira nativa apresentou diferenças significativas em relação ao sistema com torta de filtro e vinhaça. O índice de compressão nessas duas umidades volumétricas decresceu na seguinte ordem: capineira nativa > torta +vinhaça > sem aplicação> torta > vinhaça. Na camada de 0,20 – 0,40 m, analisando os sistemas de manejo nos quatro níveis de umidade volumétrica, o sistema de capineira nativa apresentou diferenças significativas nas médias dos índices de compressibilidade quando comparado com os sistemas com torta, vinhaça e torta + vinhaça, os quais apresentaram menores C_c .

Observa-se que não foi possível obter um comportamento claro do aumento e, uma diferenciação significativa dos valores do índice de compressão do solo com o aumento da umidade volumétrica em cada sistema de manejo, como observado por Ji et al.(2015); Saffih-Hdaddi, (2009); Vasconcelos, (2009) para diversos tipos de solos, provavelmente devido as características próprias do Gleissolo que apresenta baixa condutividade hidráulica, com isso dificultando a saída de água dos poros, mesmo com aplicação das tensões, nessa situação, a compressibilidade nos sistemas de manejo no gleissolo foi limitada pela condutividade hidráulica.

Observa-se que nas duas profundidades, os sistemas de manejo com aplicação de torta de filtro e vinhaça apresentaram os menores índices de compressibilidades quando comparados como os outros sistemas de manejo. Esse menor índice de compressibilidade foi conferido pelo menor índice de vazios

presentes nesses dois sistemas nas duas profundidades, conforme constatou-se nas figuras 32 e 33, conferindo assim, maiores números de pontos de contato entre as partículas do solo, que dificultou o rearranjo e deslocamento dessas partículas com a aplicação das pressões, resultando assim em menores deformações. Mentges et al.(2013) e Braida et al.(2010), também constataram que solos com baixo índice de vazios não são capazes de ocasionar diferenças significativas na compressibilidade em solos agrícolas e, Silva et al.(2000), comentam que o processo de deformação tem uma relação direta com porosidade.

Tabela 12 - Índice de compressibilidade dos diferentes sistemas de manejo

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Prof. (m)	Sistema				
		Capineira	Torta	Vinhaça	Sem aplicação	Torta + vinhaça
0,43	0-0,20	0,46 Aa	0,24 Ab	0,18 Ab	0,26 Aba	0,28 Aba
0,45		0,49 Aa	0,17 Ab	0,16 Ab	0,18 Aba	0,22 Aba
0,48		0,46 Aa	----	----	0,20 Ab	0,29 Ab
0,50		0,42 Aa	----	----	0,25 Ab	0,28 Ab
CV (%)		27,00	50,90	35,48	26,79	23,27
COT (dag kg ⁻¹)		10,47 a	3,13 b	3,61 b	3,35 b	5,94 ab
0,43	0,20-0,40	0,43 Aa	0,15 Ab	0,20 Ab	0,25 Aba	0,21 Ab
0,45		0,38 Aa	0,16 Ab	0,18 Ab	0,23 Aba	0,21 Ab
0,48		0,44 Aa	0,15 Ab	0,16 Ab	0,25 Aba	0,22 Ab
0,50		0,38 Aa	0,16 Ab	0,15 Ab	0,22 Aba	0,20 Ab
CV (%)		31,37	10,17	27,00	19,52	27,00
COT (dag kg ⁻¹)		9,88 a	2,90 b	3,13 b	2,98 b	2,79 b

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. CV = coeficiente de variação; COT= carbono orgânico do solo.

Observa-se nas figuras 34 e 35, a regressão do índice de compressibilidade (IC) do solo com alguns parâmetros físicos e com carbono orgânico do solo. Observa-se que no Gleissolo submetido aos cinco sistemas de manejo, o índice de compressibilidade apresentou alta correlação com a densidade inicial do solo (34-c e 35-c) e, com o índice inicial de vazios (34-b e 35-b) para as duas profundidades em estudo, com coeficientes de determinação (R²) significativos e superiores a 0,68. Nos sistemas avaliados, observa-se uma tendência de redução do IC com o aumento da densidade do solo, cuja redução está relacionado com o aumento do

contato entre as partículas do solo, como observado por Menteges et al., (2013); Suzuki et al., (2008) e Saffih-Hdadi et al., (2009). No entanto, quando o contato entre as partículas é reduzido por um aumento do índice de vazios no Gleissolo, observa-se na figura (figura 34-b e 35-b) uma tendência do aumento no IC nos sistemas de manejo em estudo, desse modo aumentando a susceptibilidade a deformações impostas por aplicação de cargas na superfície do solo.

Para a umidade volumétrica (34-a e 35-a) e, para o carbono orgânico do solo (34-d e 35-d) nas duas profundidades não foi possível obter bons ajustes em suas relações com o índice de compressibilidade do solo, demonstrando desse modo, que os efeitos da densidade do solo e dos índices de vazios na compressibilidade sobressaem sobre os efeitos da umidade e do carbono orgânico do solo.

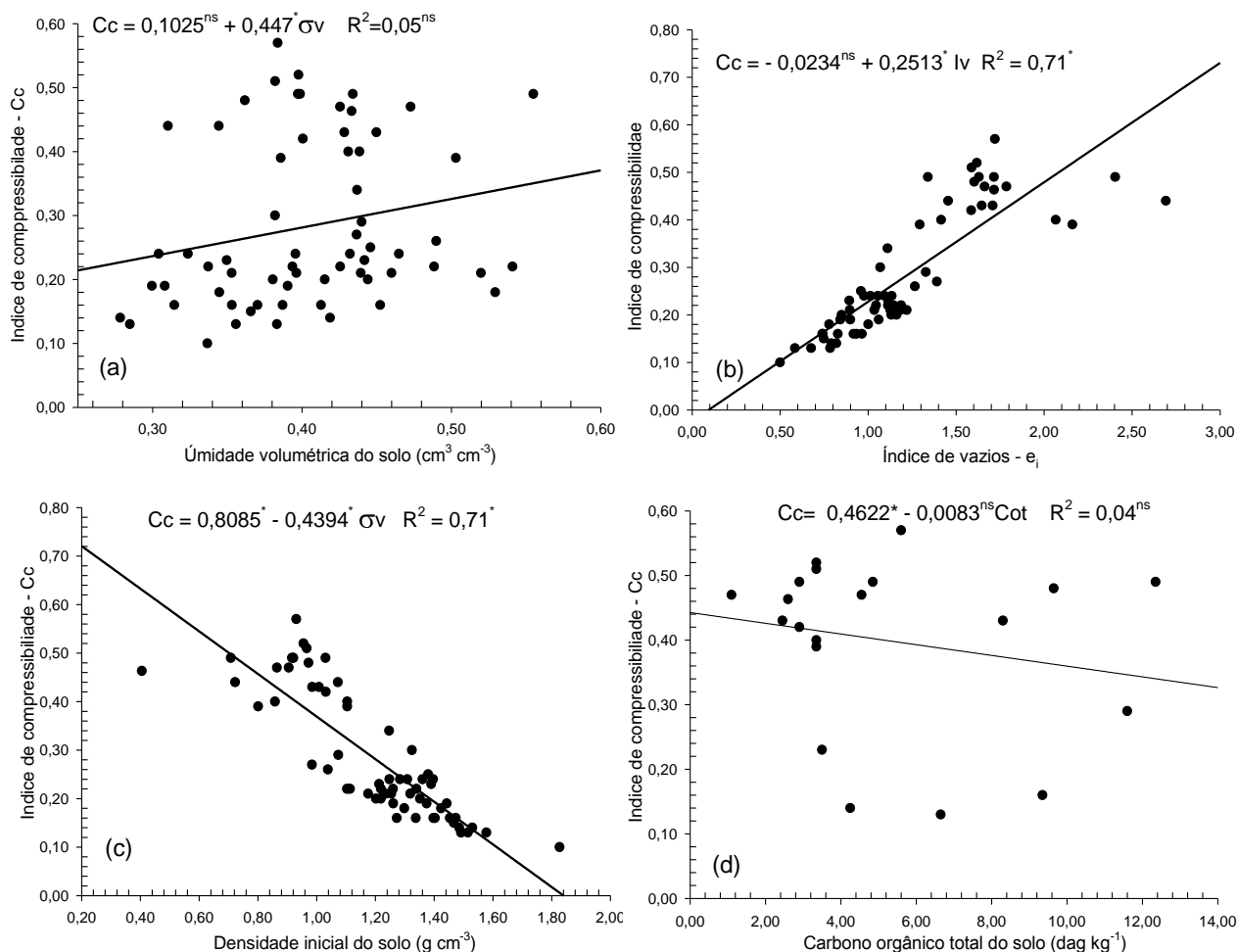


Figura 34- Regressão do índice de compressibilidade com diversos atributos do solo na profundidade de 0-0,20 m.

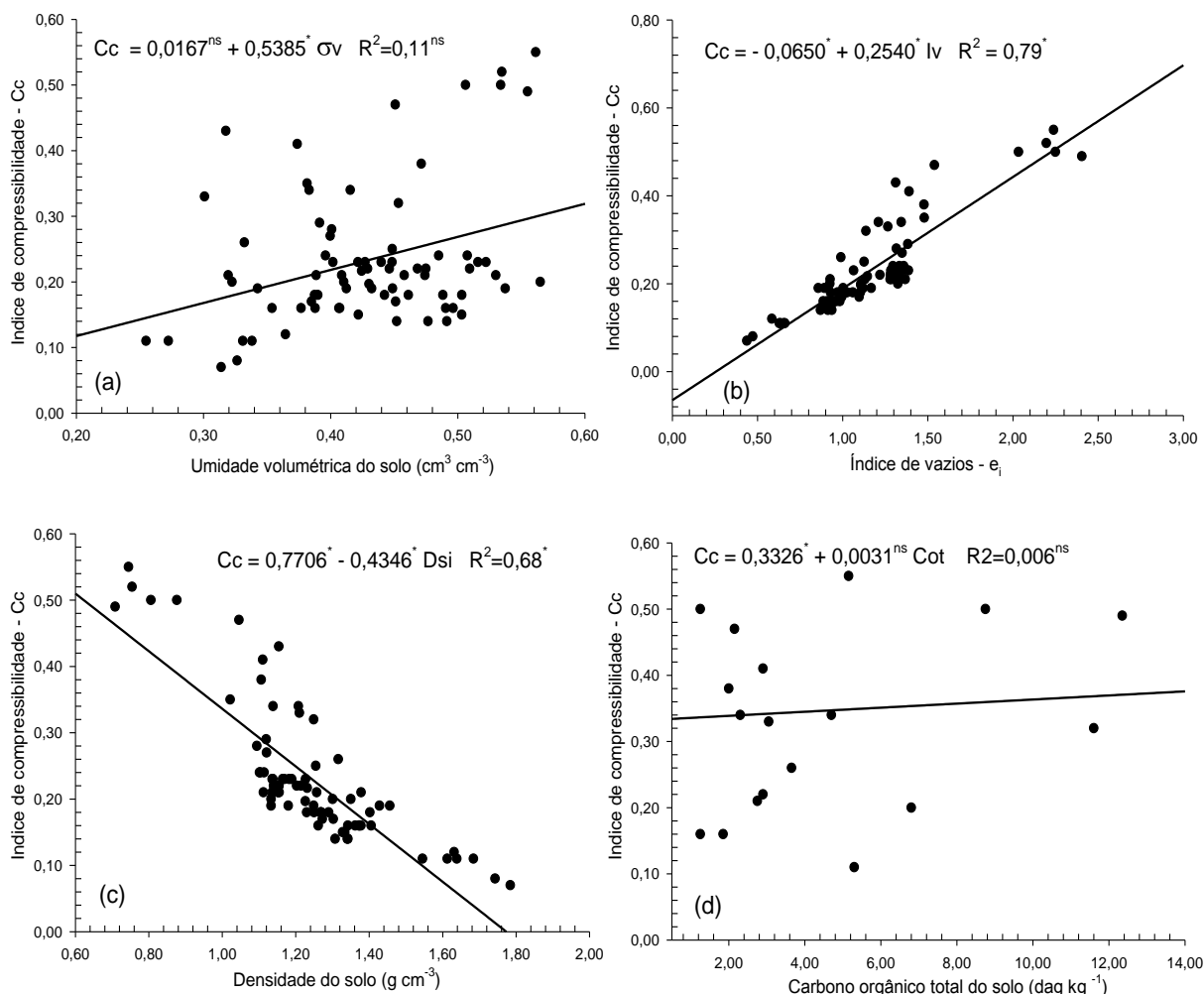


Figura 35 - Regressão do índice de compressibilidade com diversos atributos do solo na profundidade de 0,20-0,40 m.

5.7 - Pressões geradas por veículos agrícolas no solo

Na figura 36 consta-se na profundidade de 0 – 0,20 m as pressões iniciais na superfície do solo geradas pelos rodados dianteiro e traseiro do caminhão que foram respectivamente 655,0 e 790,0 kPa e, para o trator (figura 37) a pressão gerada foi de 210 e 120 kPa, respectivamente, para o rodado dianteiro e traseiro do trator. Todas estas pressões exercidas na superfície do solo são maiores que as pressões de précompressão estabelecidas anteriormente na tabela 6. Nesta situação, a aplicação de pressões maiores que pressão de précompressão poderia ocasionar deformações plásticas (não recuperáveis), prejudicando a estrutura do solo e alterando os seus atributos físicos como reportado por Reichert et al.(2010).

No entanto, Reaves & Cooper (1960), comentam a razão de carga aplicada na superfície do solo, em relação à pressão exercida a 0,25 m de profundidade, é de aproximadamente 8,3:1. Então, na profundidade de 0,25 m houve uma dissipação das pressões exercidas na superfície pelos rodados dianteiro e traseiro do caminhão, de 655 para 74 kPa e 790 para 75,0 kPa, respectivamente, conforme observado na figura 36. Já para os rodados do eixo dianteiro do trator a dissipação foi de 210,0 para 90,0 kPa e o traseiro de 120 para 70 kPa. A dissipação vertical gerada a partir da superfície até a profundidade de 0,25 m pelos rodados dianteiro e traseiro do caminhão foi, respectivamente, foi de 88,7 e 90,50 % e, para o rodado dianteiro e traseiro do trator, essa dissipação foi respectivamente de 57 e 42%.

Observa-se ainda na figura 38, que na profundidade de 0,25 cm as pressões exercidas pelos veículos são maiores do que a pressão de précompressão dos cinco sistemas na menor umidade de ($0,43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

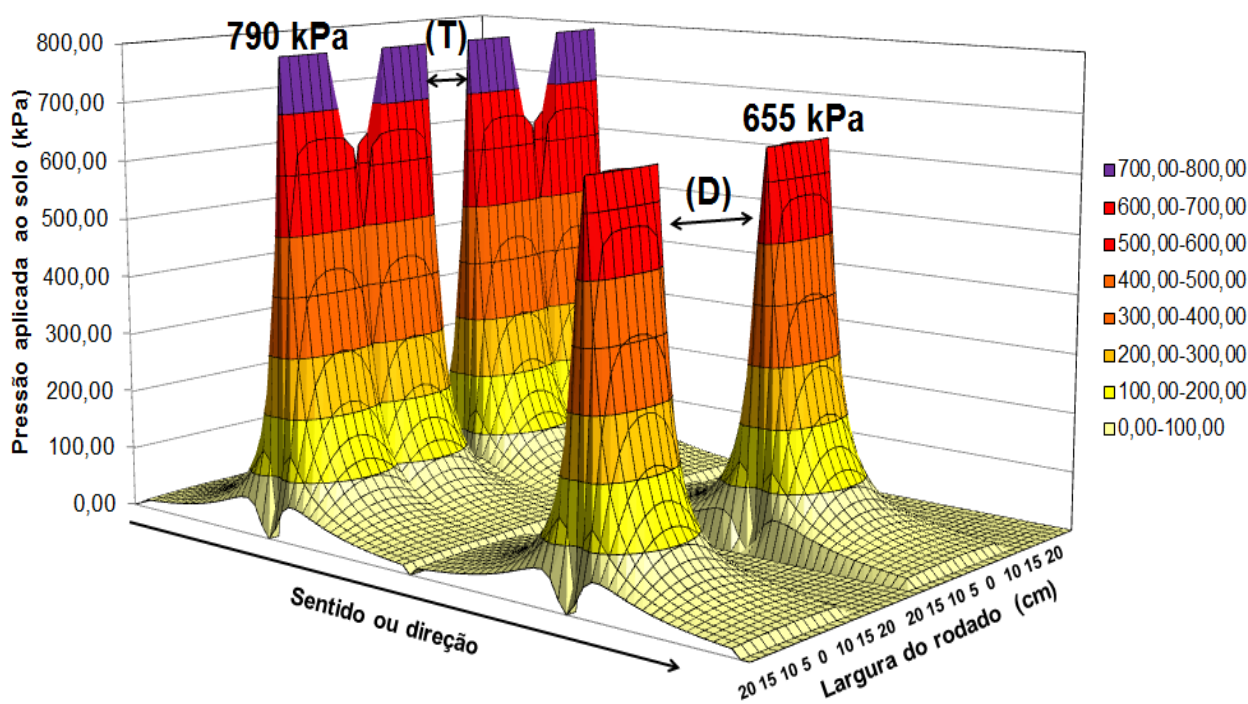


Figura 36 - Pressões do rodado dianteiro (D) e traseiro (T) do caminhão.

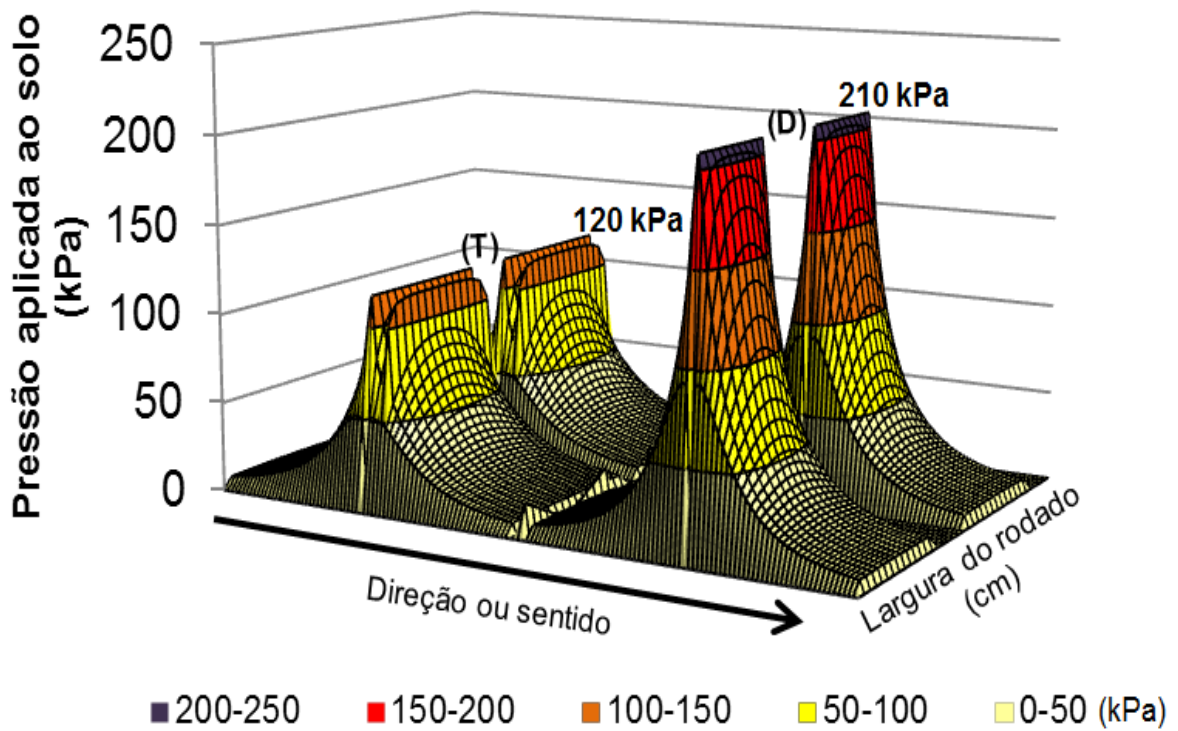


Figura 37- Pressão do Rodado dianteiro (D) e traseiro (T) do trator agrícola.

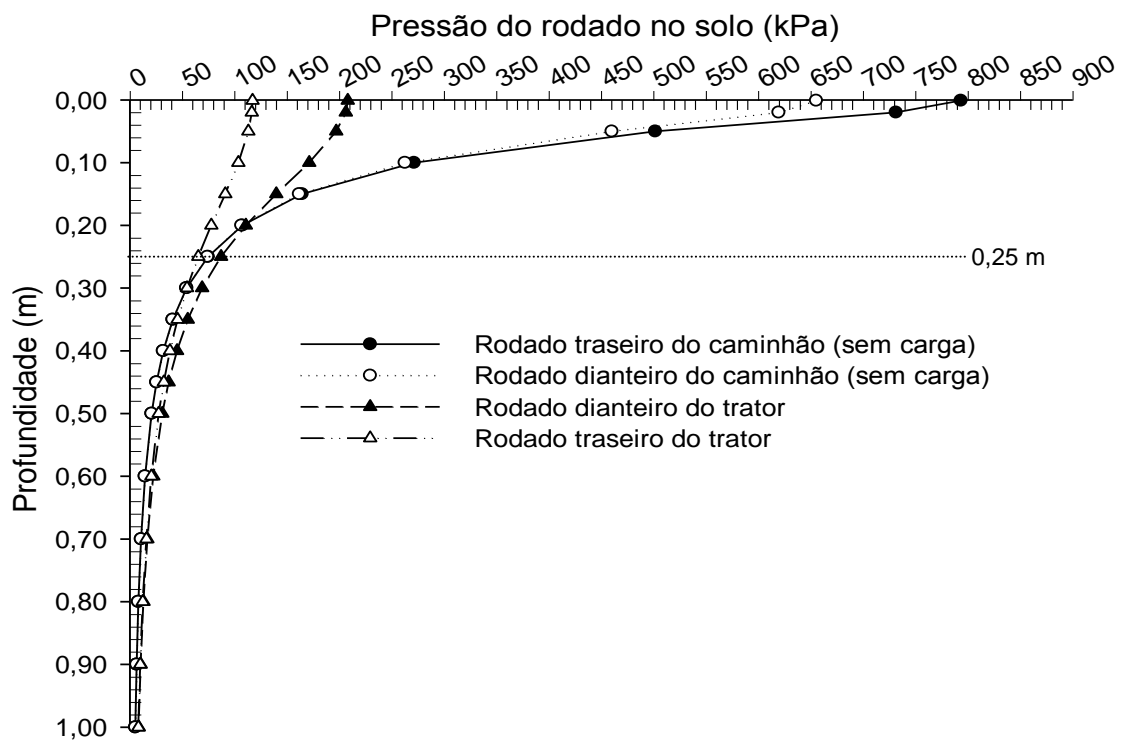


Figura 38 - Pressões geradas pelo rodado de veículos agrícolas no solo.

Na Figura 39 tem-se os bulbos de pressões gerados pelos rodados dos veículos agrícolas, onde observa-se que no trator agrícola as diferenças no tamanho e pressões de insuflagem dos rodados no eixo traseiro e dianteiro geraram bulbos com pressões diferentes. Os maiores bulbos verticais de pressões foram exercidos pelo rodado do eixo dianteiro do trator, devido ao fato do rodado dianteiro ser menor em relação ao traseiro, acarretando assim uma diminuição da área de contato e, conseqüentemente um aumento da pressão de contato com as cargas por rodas dos veículos (2500 kg por roda tabela 3).

Ainda na análise da figura 39, observa-se que o rodado do caminhão com carga (1500 kg por roda, tabela 3) gerou maiores bulbos de pressões no solo quando comparado ao rodado sem carga. A combinação cargas por rodados, pressões de insuflagem, largura dos pneus do trator podem gerar diferentes formas de bulbos de pressões nos solos agrícolas. Diversos estudos também contataram variações das pressões das máquinas no solo devido à diferenças relacionadas ao tipo e insuflagem do rodado e carga sobre o rodado, como os de de Cueto et al. (2013); Keller & Arvidson (2004); Alakukku et al.(2003). As pressões de contato rodado-solo, simuladas pelo Tasc (versão 2.0) neste estudo estão em concordância com as pesquisas sobre transmissão de pressões ao solo de vários pesquisadores conforme Schjønning & Lamandé, (2010); Arvidsson & Keller, (2007); Alakukku et al.(2003).

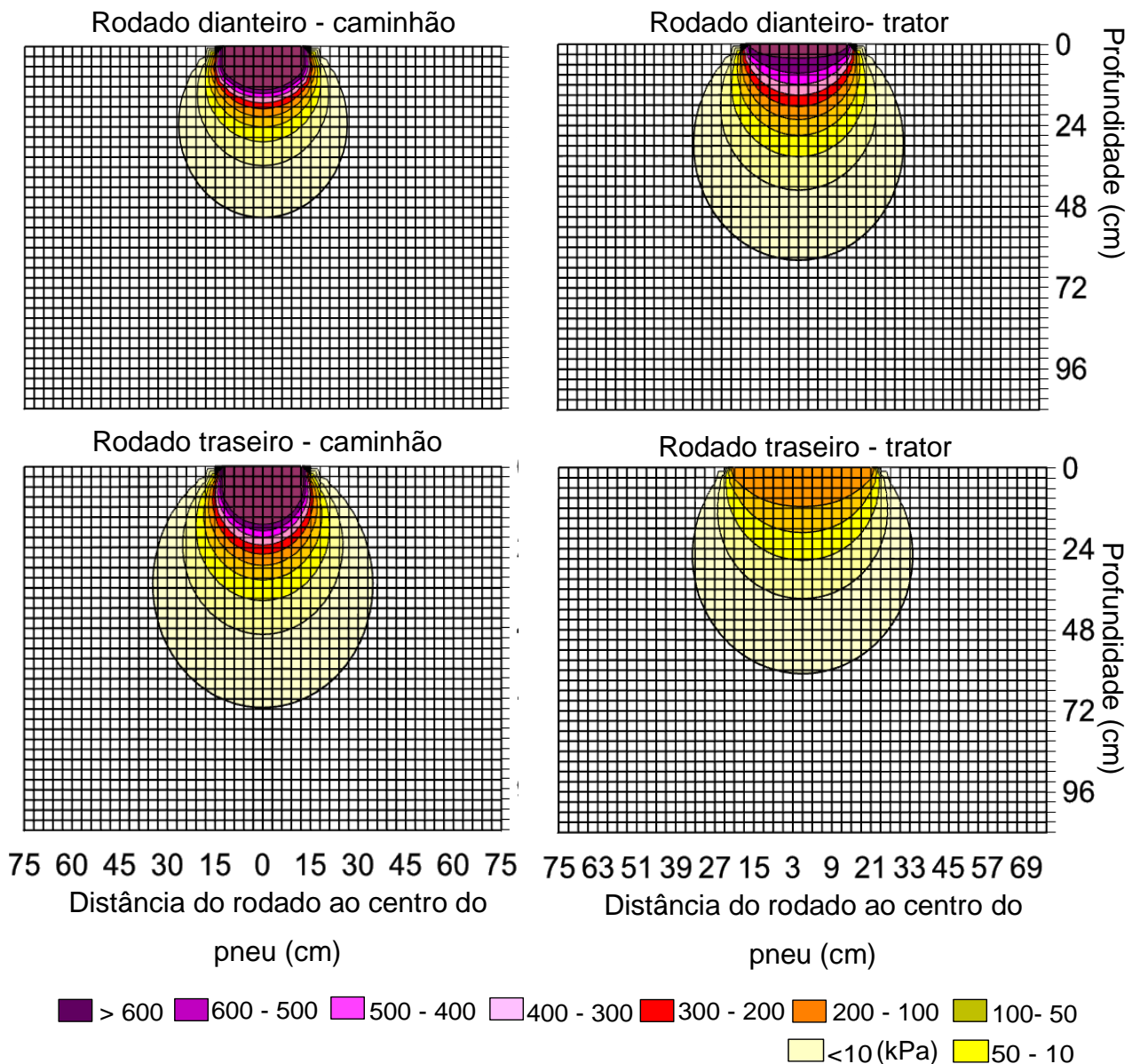


Figura 39 - Bulbo de pressões no solo (kPa) dos rodados das máquinas agrícolas.

5.8 - Curvas de compressão

Estão apresentadas na figura 40, as curvas de compressão para as profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Observa-se que, independentemente do sistema de manejo e/ou profundidade, à medida que a umidade volumétrica aumenta, a densidade do solo aumenta até atingir um valor máximo e, a seguir, diminui por causa da baixa compressibilidade da água. A equação com melhor ajuste para este comportamento foi a equação do segundo grau, com a maioria dos seus coeficientes de determinações (R^2) superiores a 0,98.

Diversos estudos avaliam a resistência do solo a compressão como os resultados apresentados por Jili et al. (2014); Vasconcelos et al. (2012); Barzegar et al. (2000) e, Braida et al. (2006), no entanto, segundo Dias Júnior (2000), as curvas de compressão, obtidas através dos ensaios de compressibilidade para os sistemas de manejo, não ocasiona limitação da estrutura por não destruí-la, como também a economia de tempo uma vez que as amostras estão estruturadas nos anéis de coleta.

Na profundidade de 0-0,20 m (figura 40a), têm-se as curvas de compressão de dois sistemas de manejo para os quatro níveis de umidade. Os sistemas “com aplicação de vinhaça” e “torta de filtro” não estão contemplados na curva de compressão para o Gleissolo, devido às umidades de saturação serem respectivamente de 0,45 e 0,47 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, logo, não podendo serem estabelecidas as umidade de 0,48 e 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para estes sistemas, conforme constata-se na curva de retenção de água do solo (figura 25).

Na figura 40b, observa-se que o sistema com capineira nativa apresentou a menor densidade do solo máxima de compressão e, maior umidade crítica de compressão em relação aos outros sistemas de manejo. Estes resultados refletem provavelmente os maiores teores de matéria orgânica no sistema de capineira nativa. Segundo Camargo & Aleoni (1997), a grande capacidade de retenção de água pela matéria orgânica reduz a quantidade de água entre as partículas minerais do solo, sendo necessários maiores teores de água para que a densidade máxima do solo seja atingida.

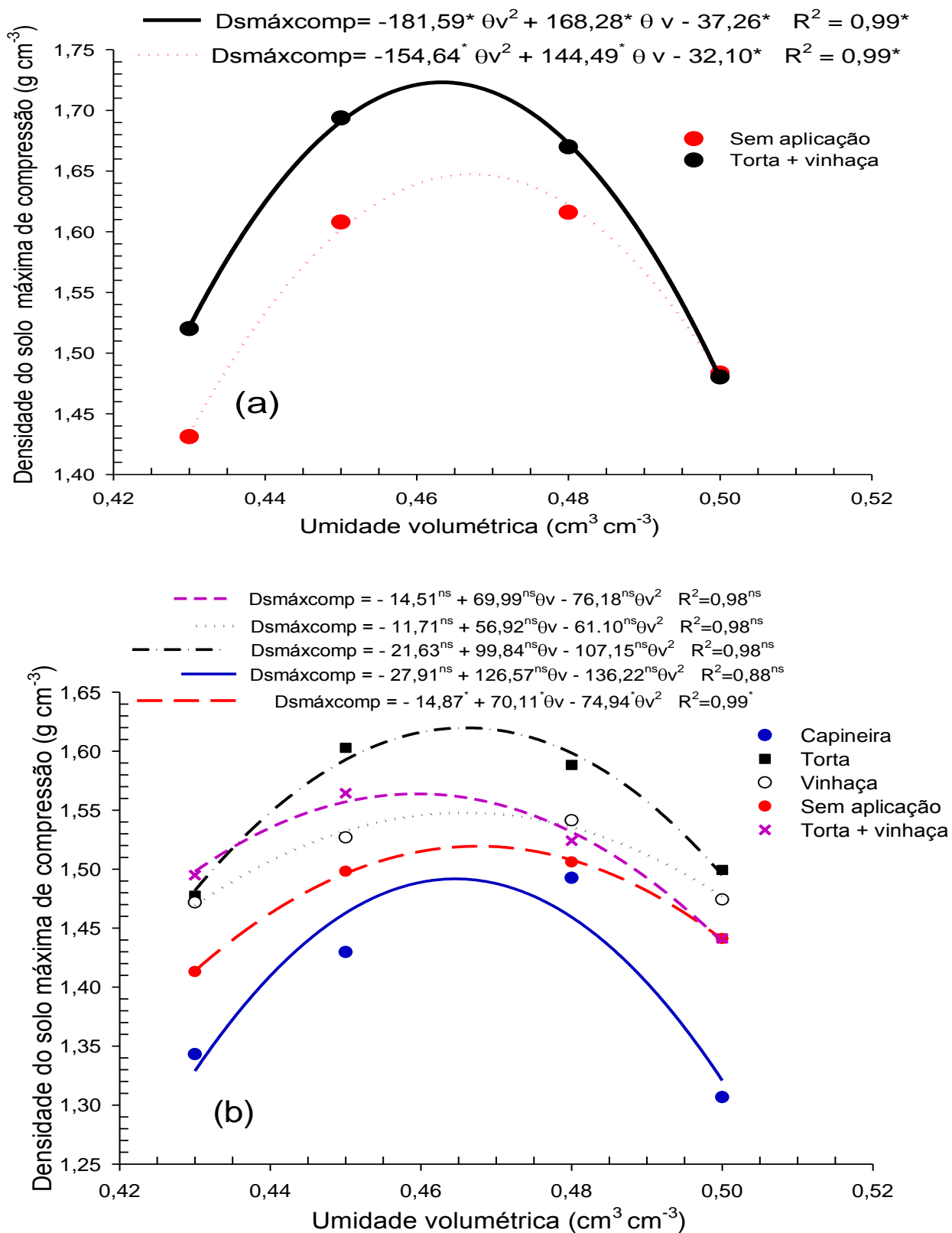


Figura 40 - Densidade do solo máxima de compressão em função da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b).

5.9 - Compactabilidade do Gleissolo Háplico sob os diferentes sistemas de manejo

Na tabela 13 constata-se os graus de compactabilidade para o gleissolo submetido aos cinco sistemas de manejo, obtidos pela relação da densidade do solo. O grau de compactabilidade variou de 82,21 à 75,65 % na camada de 0-0,20 m e 85,69 à 78,19 % m na camada de 0,20-0,40 m. Segundo Carter (1990) quando os valores do grau de compactabilidade estão entre 86 e 90 %, indica a ocorrência de uma grande redução nos macroporos. Com isso, constata-se que a diminuição da macroporosidade presente nos sistemas de manejo é devido a própria origem pedogenética do Gleissolo Háplico, como também, pelo tráfego de máquinas, o qual está favorecendo os processos de compressão.

Linstrom & Voorhess (1994) consideram como limite crítico para o grau de compactação valores acima de 86 %. Logo, no Gleissolo, para as duas camadas, os valores estão abaixo do limite crítico estabelecido, no entanto, Assis (2002) comenta que a avaliação apenas do grau de compactação não é suficiente para caracterizar o processo de compactação do solo, sendo considerado apenas um dos indicadores de prováveis limitações ao desenvolvimento das plantas.

Para os valores de densidade do solo, verifica-se que houve uma variação de 1,49 a 1,01 g cm⁻³, na camada de 0-0,20 m. Os valores de densidade do solo nesta camada correspondem a graus de compactação de 75,72 e 82,42 % respectivamente, para os sistemas de manejo torta + vinhaça e sem aplicação. Conhecendo a pressão de précompressão (tabela 11) para estes sistemas de manejo e a pressão que as máquinas exercem na superfície (figura 36), então, pode-se inferir que os processos de compressões adicionais estão ocorrendo nesses sistemas de cultivo da cana-de-açúcar. O aumento na densidade do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar está relacionado com o tráfego de máquinas na superfície, com isso gerando acúmulos de pressões que o solo possa ter recebido ou continua recebendo.

Na camada de 0,20-0,40 m, todos os sistemas de manejo cultivados com cana-de-açúcar apresentam graus de compactação superiores aos valores da camada superior e, graus de compactação abaixo do limite estabelecido por Linstrom & Voorhess (1994), provavelmente isto se deve a sua origem pedogenética (horizonte Gleis), aliado às pressões exercidas pelo tráfego das máquinas agrícolas

que, a partir de 0,25 m, ainda recebem pressões maiores que a pressão de précompressão, desse modo, pode está ocorrendo acúmulos de pressões adicionais e aumento da densidade do solo.

Tabela 13 - Densidade do solo (D_s), Densidade máxima de compressão ($D_{smáx}$), umidade crítica de compressão (U_{cc}) e grau de compactabilidade do solo obtidos pelos ensaios de compressibilidade, considerando os cinco sistemas de manejo.

Sistemas de Manejos	Camada de 0 - 0,20 m				Camada de 0,20 - 0,40 m			
	D_s	$D_{smáx}$	U_{cc}	GC	D_s	$D_{smáx}$	U_{cc}	GC
	($g\ cm^{-3}$)	($cm^3\ cm^{-3}$)	(%)	(%)	($g\ cm^{-3}$)	($cm^3\ cm^{-3}$)	(%)	(%)
Capineira	1,01 B	-----	-----	-----	1,17 A	1,49	0,47	78,52
Torta + vinhaça	1,31 A	1,73	0,47	75,72	1,32 A	1,57	0,46	84,07
Sem aplicação	1,36 A	1,65	0,47	82,42	1,30 A	1,52	0,47	85,52
Vinhaça	1,49 A	-----	-----	-----	1,23 A	1,55	0,47	79,35
Torta	1,36 A	-----	-----	-----	1,37 A	1,62	0,47	84,56

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

5.10 - Limites de consistência do solo

A tabela 14 apresenta as relações entre o limite de plasticidade (LP), umidade crítica de compressão (U_{cc}) e umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). A tendência da relação U_{cc}/LP para o solo estudado foi superior a 1 (um), para todos os sistemas cultivados com cana, essa relação foi diferente da observada por Ojeniyi & Dexter (1979), que preconizam uma razão entre U_{cc}/LP em torno de 0,90, sugerindo que a umidade crítica de compactação (U_{cc}) seja estimada próxima de 90 % do limite de plasticidade (LP). No entanto, adotando está relação para o cálculo da umidade crítica de compactação ($U_{cc90\%LP}$) nos sistemas de manejo em estudo constata-se que em todos os sistemas de manejo a umidade crítica de compactação ficou abaixo da capacidade

de campo, logo, nesses sistemas, caso as operações agrícolas sejam realizadas no limite inferior próximo a capacidade de campo, estará favorecendo os processos de compressão.

Segundo Vasconcelos (2009), o melhor momento para realizar o preparo periódico do solo é aquele em que a umidade do solo estiver abaixo do limite de plasticidade, pois nesta condição a massa de solo encontra-se friável. A zona de consistência friável constitui a faixa ótima de umidade para mobilização mecânica do solo, pela facilidade de esboroamento quando o solo é submetido às pressões provocadas pelas ferramentas ativas dos implementos agrícolas.

Os limites de liquidez e plasticidade no sistema com aplicação de torta de filtro na profundidade de 0 - 0,20 m não apresentaram diferenças significativas em relação aos outros sistemas cultivados cana-de-açúcar. No entanto, quando comparado com o sistema de capineira nativa, constata-se diferenças significativas com o limite de plasticidade (tabela 14). Já para a camada de 0,20-0,40 m, os limites de liquidez e plasticidades dos sistemas de cultivo com torta de filtro e vinhaça apresentaram diferenças significativas com o sistema de capineira nativa.

Os maiores conteúdos de carbono orgânico que ocorrem no sistema com capineira nativa nas duas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m com 10,47 e 9,88 dag kg⁻¹ respectivamente pode ter ocasionado um aumento nos dois limites na camada de 0,20-0,40 m, uma vez que, o efeito da matéria orgânica do solo é aumentar a quantidade de água necessária para saturar a argila e tornar o solo plástico, conseqüentemente, os limites de plasticidade e liquidez aumentam, sem ocorrer um aumento no índice de plasticidade. Com isso, a matéria orgânica ocasiona um deslocamento superior do limite de liquidez e plasticidade do solo, devido a um aumento na umidade do solo com a adição de matéria orgânica. Outro fator aliado ao maior conteúdo de carbono orgânico no solo corresponde a maior quantidade de argila no sistema com capineira nativa (570 g kg⁻¹) em relação aos sistemas com aplicação de torta e com aplicação de vinhaça, pois, outros estudos (Mentges, 2010), realizados em gleissolos constataram influência do aumento no conteúdo de argila nos limites de liquidez e plasticidade do solo.

Tabela 14 - Limite de plasticidade (LP), umidade crítica de compactação correspondente a 90% do limite de plasticidade ($UCC_{(90\%LP)}$), umidade crítica de compressão (Ucc^*) pelo teste de compressibilidade, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) considerando os sistemas de manejo e profundidades.

Sistemas de Manejos	Camada de 0 - 0,20 m							Camada de 0,20 - 0,40 m						
	LL	LP	$UCC_{(90\%LP)}$	Ucc^*	θ_{cc}	θ_{pmp}	Ucc/LP	LL	LP	$UCC_{(90\%LP)}$	Ucc^*	θ_{cc}	θ_{pmp}	Ucc/LP
	(g g ⁻¹)			(cm ³ cm ⁻³)			(adm)	(g g ⁻¹)			(cm ³ cm ⁻³)			(adm)
Capineira	0,67 A	0,49 A	0,45 A	-----	0,47 A	0,43 A		0,63 A	0,46 A	0,41 A	0,47	0,45 A	0,39 A	1,02
Torta + vinhaça	0,56 A	0,33 AB	0,30 AB	0,47	0,38 AB	0,33 B	1,39	0,65 A	0,34 B	0,30 AB	0,46	0,46 A	0,39 A	1,36
Sem aplicação	0,55 A	0,34 AB	0,30 AB	0,47	0,42 AB	0,36 AB	1,40	0,66 A	0,40 A	0,36 AB	0,47	0,48 A	0,39 A	1,17
Vinhaça	0,51 A	0,31 B	0,28 B	-----	0,36 B	0,39 AB	-----	0,50 B	0,28 B	0,25 B	0,47	0,43 A	0,35 A	1,65
Torta	0,50 A	0,29 B	0,26 B	-----	0,39 AB	0,36 AB	-----	0,54 B	0,33 B	0,30 AB	0,47	0,43 A	0,35 A	1,40

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

5.11 - Resistência do solo à penetração de raízes

Na tabela 15, constam os valores de resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) do gleissolo sob diferentes sistemas de manejo, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Observa-se que nas duas profundidades em estudo, não houve diferenças significativas para a mesma umidade volumétrica nos diferentes sistemas de manejo. No entanto, quando analisa-se o sistema de manejo nas diferentes umidades, na profundidade de 0-0,20 m, constata-se que os sistemas com “capineira nativa”, “torta de filtro”, “vinhaça” e “sem aplicação”, apresentaram respectivamente valores de RPL de 2,45, 2,55, 2,59 e 2,54 MPa. Desse modo, estes sistemas apresentam resistência à penetração de raízes, conforme o valores estabelecidos por Lapen et al. (2004), em um gleissolo com 420 g kg⁻¹ de argila, na cultura do milho nas condições do intervalo hídrico ótimo. Segundo os autores, os efeitos da compactação se manifestam na resistência mecânica do solo à penetração somente para valores acima de 2 MPa, o qual, tem sido considerados limitantes ao crescimento de raízes.

Ainda na análise da tabela 15, observa-se que, com aumento da umidade volumétrica na profundidade de 0 - 0,20 m, os sistemas de manejo com capineira nativa, vinhaça, sem aplicação e torta + vinhaça começaram a apresentar valores de RPL inferiores a 2 MPa com diferenças significativas entre a maior e menor umidade volumétrica demonstrando assim, a diminuição RP com aumento da umidade do solo. Já para a profundidade de 0,20-0,40 m, a resistência à penetração não diferiu significativamente entre o maior e menor nível de umidade do solo, devido ao alto grau de umidade nas amostras durante os testes, mesmo a profundidade apresentando alto grau compactação.

Tabela 15 - Resistência mecânica à penetração em laboratório (MPa) em diferentes umidades volumétrica do solo nos diferentes sistemas de manejo

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Profundidade (m)	Sistemas de manejo				
		Capineira	Torta	Vinhaça	Sem aplicação	Torta + vinhaça
0,43	0 - 0,20	2,45 Aa	2,55 Aa	2,59 Aa	2,54 Aa	1,96 Aa
0,45		1,30 ABa	3,46 Aa	1,10 Ba	1,92 ABa	1,75 Aa
0,48		1,99 ABa	-----	-----	1,30 ABa	1,21 Aa
0,50		0,81 Ba	-----	-----	1,13 Ba	1,34 Aa
Cv (%)		36,22	18,96	28,45	14,77	33,18
COT (dag kg ⁻¹)		10,47 a	3,13 b	3,61 b	3,35 b	5,94 ab
0,43	0,20 - 0,40	1,05 Aa	1,04 Aa	1,78 Aa	4,83 Aa	1,95 Aa
0,45		1,13 Aa	1,77 Aa	2,18 Aa	3,38 Aa	1,36 Aa
0,48		1,15 Aa	1,84 Aa	1,66 Aa	2,90 Aa	1,52 Aa
0,50		1,39 Aa	1,61 Aa	1,57 Aa	2,41 Aa	1,45 Aa
Cv (%)		56,87	28,41	73,29	11,12	21,61
COT (dag kg ⁻¹)		9,88 a	2,90 b	3,13 b	2,98 b	2,79 b

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

6- CONCLUSÕES

- ✓ As variáveis, índice de compressibilidade e carbono orgânico do solo na camada de 0- 0,20 m e, para a camada de 0,20 – 0,40 (m), as variáveis areia e macroporosidade são responsáveis pela maior variação que ocorre na tensão de précompressão nos diferentes sistemas de manejo;
- ✓ A resistência do solo ao cisalhamento foi menor no sistema sem aplicação de qualquer forma de matéria orgânica;
- ✓ No decorrer de todos os ensaios de cisalhamento direto, prevaleceu em grande parte o processo de compressão;
- ✓ O maior aporte de carbono orgânico do solo no sistema de capineira nativa possibilitou maiores valores de coesão em relação aos sistemas sob cultivo com cana-de-açúcar;
- ✓ O ângulo de atrito não foi influenciado pelos sistemas de manejo em função dos elevados níveis de umidade volumétrica do solo;
- ✓ A pressão de précompressão não apresentou diferenças significativas em relação aos diferentes sistemas de manejo por conta do alto conteúdo de umidade usado nos testes;
- ✓ As pressões exercidas pelas máquinas agrícolas na profundidade de 0 -0,20 (m) são maiores do que a pressão de précompressão para o nível umidade, no entanto, o alto grau de saturação dos sistemas de manejos possibilitou o sugimento de poro-pressões, as quais não permitiram a transferência das cargas geradas pelas máquinas;
- ✓ O maior aporte de matéria orgânica no sistema com capineira nativa possibilitou a redução da densidade máxima de compressibilidade do solo dos diferentes sistemas de manejo, decrescendo na seguinte ordem para a camada de 0,20 – 0,40 (m): Torta de filtro > torta + vinhaça > vinhaça > sem aplicação > capineira nativa;
- ✓ A maioria dos sistemas de manejo, exceto torta+vinhaça, apresentaram valores de resistência a penetração superiores a 2 Mpa na menor umidade volumétrica na profundidade de 0 – 0,20 (m);
- ✓ Na condição de menor umidade no Gleissolo Háplico, as pressões geradas pelos maquinários agrícolas superiores pressão de précompressão, o grau de compactabilidade e à resistência à penetração de raízes podem caracterizar o

processo de compressão por meio da redução de volume e aumento da densidade do solo, em todos os sistemas de manejo.

REFERÊNCIAS

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C., SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**. v.73, p.145-160, 2003.

ALONSO, E.E.; GENS, A.; HIGHT, D.W. General Report - Special Problem Soils. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, IX 9º, 1987, Dublin. **Anais**. Proceedings. Dublin; 1987. v.3, p.1087–1146, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **(ASTM D-3080)**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 1998. 6p.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tire inflation pressure. **Soil & Tillage Research**, v.96, p.284-291, 2007.

ASSIS, R. L. **Avaliação dos atributos físicos e da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa**. 2002. 141 f. (Tese de Doutorado). Universidade do estado de São PauloUnesp, Botucatu, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)). **NBR 12007/90 - MB 3336/90**: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.

BERZEGAR, A. R; ASOODAR, M.A; ANSARI, M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil & Tillage Research**, v.57, p.167-172. 2000.

BLANCO-CANQUI, H; LAL, R; OWENS, L.B; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C; Strength properties and organic carbon of soils in the north Appalachian region. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p. 663–673, 2005.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99f. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

BRAIDA, J. A; REICHERT, J. M; VEIGA, M; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

BRAIDA, J.A. **matéria Matéria orgânicos e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 126f. Tese (doutorado em Concentração Processos Físico e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

BRAIDA, J.A; REICHERT, J.M; REINERT, D.J; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.131–139, 2010.

BRAIDA, J.A; REICHERT, J.M; SOARES, J.M.D; REINERT, D.J. Resistência inter e intra agregados em ensaios de cisalhamento direto em um Nitossolo vermelho distófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.379-386, 2007.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 89f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. 1997. 132f. Tese de doutorado - Escola superior Superior de agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine loamy sands. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.

CAVALIERI, K. M. V; ARVIDSSON, J; SILVA A. P; KELLER, T. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. **Soil & Tillage Research**, v.98, p.17-26, 2008.

COMINO, E.; DRUETTA, A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment. **Soil & Tillage Research**,. v.106, p.194-201, 2010.

COSTA, Y.D; CINTRA, J.C; ZORNBERG, J.G. Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a Lateritic soil deposit. **Geotechnical Testing Journal**, v.26, n.262, p.1-9, 2003.

CRUSE, R.M; BERGHOFER, B.E; MIZE, C.W; GHAFARZADEH, M. Water drop impact angle and soybean protein amendment effects on soil detachment. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1474–1478, 2000.

CUETO, O.G. et al. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.99, p.146–152, 2013.

DEBIASI, H; LEVIEN, R; TREIN, C.R; CONTE, O; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2629-2637,2008.

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

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F; VITOR HUGO,A.V; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do solo**. Sociedade Brasileira em ciência do solo. Viçosa-MG. 2000.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. PhD Thesis - East Lansing, Michigan State University.

EKWUE, E.I. Organic-matter effects on soil strength properties. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.289–297,1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises química de solos, plantas e fertilizantes**. 2^o edição. Rio de Janeiro, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2^a . ed. Revisada e. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FLORES, J. P. C; ANGHINONI, I; CASSOL, C. L; CARVALHO, P. C. F; LEITE, J. G. D. B; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema de plantio direto em integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.771-780, 2007.

FREDLUND, D.G. RAHRDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley and Sons. INC. New York. 1993. 510p.

GAGGERO, M.R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GANTZER, C.J; BUYANOVSKY, G.A; ALBERTS, E.E; REMLEY, P.A. Effects of soybean and corn residue decomposition on soil strength and splash detachment. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.202–207,1987.

GREGORY, A. S; WHALLEY, W. R; WATTS, C. W; BIRD, N. R. A; HALLETT, P. D; WHITMORE, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, v.89, p.45-57, 2006.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p. 5-10, 1987.

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

HAIR JR., J.F; ANDERSON, R.E; TATHAM, R.L; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. Tradução de A. S. Sant' Anna e A. Cloves Neto, 5^a ed. Porto Alegre-RS. Bookman, 2006. 593 p.

HÅKANSSON, I.; REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axial load-extend, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, 29, p.277–304, 1994.

HAVEE, S; MOSADDEGHI, M.R; AYOUBI, S. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. **Geoderma**, v. 237-238, p.137–148, 2015.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981, 733p.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, v.3, p.89–99, 2003.

HORN, R.; TAUBNER, H; WUTTKE, M; BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. **Soil & Tillage Research**, v. 30, p.187–216, 1994.

IMHOFF, S. **Indicadores da qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelho**. 2002. 94f. (Tese de doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP.

IMHOFF, S; SILVA,A.P; FALLOW,D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.17-24, 2004.

JI, A; ZHANG, Y; YU, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil & Tillage Research**, v.145, p.216-223, 2015.

JILI, Q; LI, B. WEI,T; LI, C; LIU, B. Effects of rice-husk ash on soil consistency and compactibility. **Revista Catena**, v.122, p.54–60, 20104.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4^a. ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, p.816, 1998, p.816.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. **In: Sumner, Handbook of Soil Science**. CRC Press, New York, p.229–269, 1999.

KAY, B.D; DA SILVA, A.P; BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**,. v. 77, p.655–667, 1997.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.85-95, 2004.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: **KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, n.9, p. 425-442, 1986.

KNAPEN, A; POESEN, J; GOVERS, G.; GYSSELS, G; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. **Earth-Science Reviews**, v.80, 2007, p.75-109, 2007.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v23, p.773-782, 1999b.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.773-782, 1999b.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR. M.S. Efeito do manejo da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.497-506, 1999a.

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

LAL, R; SHURKLA, M. K. **Principles of soil physics**. Marcel Dekker, New York. 2004. 699p.

LAMBE, T. WL; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**, SI version. Massachusetts Institute of Technology: John Wiley & Sons, 1979. 553 p.

LAMBE, T.W. **Soil testing for engineers**. John Wiley, New York, 1951. 165p.

LAPEN, D.R; TOPP, G.C; GREGORICH, E.G; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LI, X; UM, Y; CHENG, Y; LIU, X; NIAN, H. Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability. **Acta Physiol Plant**, v.35, p.1113-1119, 2013.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004b. 60f. Tese (Doutorado em solos) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP.

LIMA, C.L.R; SILVA, A.P; IMHOFF, S; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não-irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.945-951, 2004.

LIMA, C.L.R; SILVA, A.P; IMHOFF, S; LIMA, H.V; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

LINSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. In: **SOANE, B.D; VAN OUWERKERK, C.** Soil compaction in crop production. London: Elsevier, 1994, p. 265-286,1994.

LOZANO, N; ROLIM, M.M; OLIVEIRA, V.S; TAVARES, U.E; PEDROSA, E.M.R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil & Tillage Research**, v.129, p.61–68, 2013.

MACEDO, V. R. M; SILVA, A. J. N; CABEDA, M. S.V. Influência de tensões compressivas na pressão de pré-compactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.8, p.856–862, 2010.

MCBRIDE, R.A. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated, structured soils. **Soil & Tillage Research**, v.13, p.383-397, 1989.

MENTEGES, M.I. **Implicações do uso do solo nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um Argissolo vermelho-amarelo e de um gleissolo Háptico**. 2010. 107f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

MENTGES, M.I; REICHERT, J.M; GUBIANI, P.I; REINERT, D.J; XAVIER, A. alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.221-231, 2013.

MORDHOSRT, A; ZIMMERMANN, I; PETH, S; HORN, R. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem. **Soil & Tillage Research**. v. 125, p.3-13, 2012.

MOSADDEGHI, M.R; HEMMAT, A; HAJABBASI, M.A; ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil & Tillage Research**, v.70, p.53–64, 2003.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v12, n.3, p.513-522, 1976.

NOBREGA, M.D. **Análise discriminante usando o software SPSS**. 2010. 53f. Tese (Doutorado em estatística) - Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa.

OHU, O.J; RAGHAVAN, G.S.V; MCKYES, E; MEHUYS, G. Shear strength prediction of compacted soils with varying added organic matter contents. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.29, p.351–355, 1986.

OJENIYI, S.O.; DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostrutured produced by tillage. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 22, p. 339-343, 1979.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3ª ed. 2007. 391p.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, bresistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo amarelo cultivado com cana-

de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Solo Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos, São Paulo, 2000. 247p.

PIRES, B.S. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 2012. 113f. Tese de doutorado - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Saeafs, 1996. 446p.

RACHMAN, A; ANDERSON, S.H; GANTZER, C.J; THOMPSON, A.L; Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility. **Soil Science Society of America Journal**,. v.67, p.637-644, 2003.

RAHARDJO,H; LEONG,E.C. Soil water characteristic curves and flex boundary problems. **Geotechnical** (Special Publication)New York: Asce, n 68, . p.88-112, 1997.

REAVES, C.A.; COOPER, A.W. Stress distribution in soil under tractor roads. **Journal of Agricultural Engineering Society**,v. 41, p.20-31, 1960.

REICHERT, J. M; REINERT, D.J; SUZUKI, L.E.A.S; HORN, R. Mecânica do solo (cap. II). IN: **VAN LIER, Q. J. Física do Solo**. Sociedade Brasileira Ciência do Solo. UFV. 2010. 298p.

REINERT, D. J. et al. Compress - software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade de solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Ribeirão Preto. **Anais**. Ribeirão Preto, 2003. CD – ROOM.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H; TOPP, C. **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madson: Soil Science Society of America, 2002. Pt. 4: Physical methods, p.809-812, 2002.

ROCHA,W.W; DIAS JÚNIOR, M.S; LIMA, J.M; MIRANDA, E.V; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Solo Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.26, p.297-303, 2002.

SAFFIH-HDADI, K; DÉFOSSEZ, P; RICHARD, G; CUI, Y. J; TANG, A. M; CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface

layers as a function of water content and bulk density. **Soil & Tillage Research**, v.105, p.96-103, 2009.

SALIRE, E.V; HAMMEL, J.E; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsolis under short - duration loading. **Soil & Tillage Research**, v.31, p.235-248, 1994.

SAS Institute. **SAS User's Guide: Statistics Software**. 1996.

SCHJØNNING, P; LAMANDÉ, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. **Soil & Tillage Research**, v.108, p.77-82, 2010.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto** 2003. 128f p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

SEMMELE, H.; HORN, R. Mögchkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckverpflanzung im Boden. Hinblick auf die Ableitung von Bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. In: **Bodenverdichtung**. Darmstadt, KTBL, p.61-92. 1995.

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

SILVA, A.J.N.; CARVALHO, F.G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Solo Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.853-862, 2007.

SILVA, R.B; DIAS JÚNIOR, M.S; SANTOS, F.L; FRANZ, C.A.B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.165-173, 2004.

SILVA, V.R; REINERT, D. J; REICHERT, J. M; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002b.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo vermelho-escuro e de um Podzólico vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.239-249, 2000.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, V. C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. 660p.

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**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.963-973, 2008.

SWEENEY, D. W; KIRKHAM, M. B; SISSON, J. B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, v.98, p.637-643, 2006.

THIYAKKANDI, S.; ANNEX, S. Effect of Organic Content on Geotechnical Properties of Kuttanad Clay. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.16, p.1653-1663, 2011.

TO, J.; KAY, B.D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 126, 2005, p.261–27, 2005.

VAN GENUCHTEN. A closed-form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unisaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VASCONCELOS, R. F. B; CANTALICE, J. R. B; MOURA, G. B. A; ROLIM, M. M; MONTENEGRO, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.525-536, 2012.

VASCONCELOS, R.F. B. **Comportamento mecânico de um Latossolo amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo culturais da**

cana-de-açúcar. 2009. 138f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

VEIGA, M; HORN, R; REINERT, D.J; REICHERT. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

WALDRON, L.J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified, soil. **Soil Science Society of America Journal**,v.41, p.843–849, 1977.

WIERMANN, C; WERNER, D; HORN, R; ROSTEK, J; WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil & Tillage Research** v.53, p.1117-128, 2000.

WU, T.H; MCKINNELL, W.P; SWANSTON, D.N. Strength of tree roots and landslides on Prince Of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v.16, p.19–33, 1979.

CAPÍTULO – II

COMPORTAMENTO FÍSICO - MECÂNICO DE UM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA DE AÇÚCAR SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

RESUMO

Os diferentes sistemas de manejo usados de forma contínua ao longo do tempo geram em mudanças na composição e arranjo dos constituintes do solo, as quais exercem influencia no seu comportamento mecânico. Desse modo, sendo refletidos na sua compressibilidade e cisalhamento. A aplicação de resíduos vegetais na superfície do solo em diferentes sistemas de manejo são capazes de dissipar parte da energia compressiva imposta na superfície por máquinas e implementos agrícolas durante as práticas agrícolas. O presente estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros da compressibilidade e do cisalhamento de um Argissolo Vermelho Amarelo cultivado com cana cana-de-açúcar na redução da energia compressiva e no aumento da resistência ao cisalhamento. Os sistemas de manejo foram adotados na unidade sucroenergética à mais de 25 anos, correspondem à aplicação de vinhaça e torta de filtro, ambos sendo comparados entre si e, com o solo de mata nativa. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado em amostras estruturadas coletadas nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, as quais foram submetidas à aplicação de cargas nos seguintes estágios de pressão: 12,50; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa em três níveis de umidade volumétrica. Para os ensaios de cisalhamento direto, as amostras foram coletadas nas profundidades de 0-0,20 m e, submetidas ao ensaio de cisalhamento direto também com aplicação de três níveis de umidade e nas tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa. A coesão do solo variou de 61,21 à 2,06 kPa com a mata nativa apresentando as maiores coesões e resistência ao cisalhamento. A aplicação de torta de filtro aumentou a resistência ao cisalhamento em relação a sistema com aplicação de vinhaça. A aplicação torta de filtro e vinhaça possibilitou a dissipação da pressão de précompressão (σ_p) as quais diferiram significativamente pelo teste Tukey ($p < 0,05$) em relação ao solo de mata. Os maiores índices de compressibilidade foram constatados no mata com valores variando de 0,43 – 0,33. A densidade do solo sobrepôs ao efeito da umidade e, influenciou significativamente o índice de compressão nos sistemas de manejo em estudo.

Palavras-chaves: compressibilidade, cisalhamento, coesão, ângulo de atrito interno.

ABSTRACT

Different management systems used through ongoing way can provide changes in the soil composition and arrangement that influence on its mechanical behavior, being reflected on soil compressibility and shear. The use of organic wastes on soil surface, the organic wastes narrow down part of energy exerted on soil surface. This study aims to assess the compressibility and shear resistance related to Ultisol cultivated with sugar cane. The following management systems have been used at sugarcane power plant over 25 years: application of vinasse and filter cake (sugarcane by product). Both were compared with the soil under native forest conditions. The uniaxial trial was carried out in undisturbed samples at 0-0.20 and 0-0.40 m depth. Loads were applied under different pressures – 12.50, 25, 50, 100, 200, 400, 800, and 1600 kPa – as well as three volumetric moisture levels. The trial of direct shear was carried out at 0.20 m depth, under the same moisture levels and following the vertical tensions of 50, 100, 150 and 200 kPa. The soil cohesion ranged from 61.21 to 2.06 kPa and the native forest showed the highest values related to cohesion and shear resistance. The use of “filter cake” increased the shear in comparison to vinasse application system. Both uses increased the dissipation of precompression which differ statistically by Tukey test ($p < 0.05$). The highest compressibility indices were observed under forest condition with values ranging from 0.43 to 0.33. In comparison with moisture the effect linked to bulk density was more pronounced and influenced statistically the compressibility indice in the studied management systems.

Keywords: compressibility, shear, cohesion, internal friction angle.

1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As características de resistência e deformação dos solos insaturados são complexas devido ao seu comportamento ser influenciado por mudanças durante os ciclos de umedecimento e secagem, cargas e descargas sobre a sua superfície em relação ao tempo conforme comentam Murray & Sivakumar (2010).

Considerando uma massa de solo, não saturada, sendo submetida a carga externa, no seu interior se desenvolverão pressões nas fases sólida, líquida e gasosa. A distribuição das pressões encontra-se esquematicamente representada na figura 1.

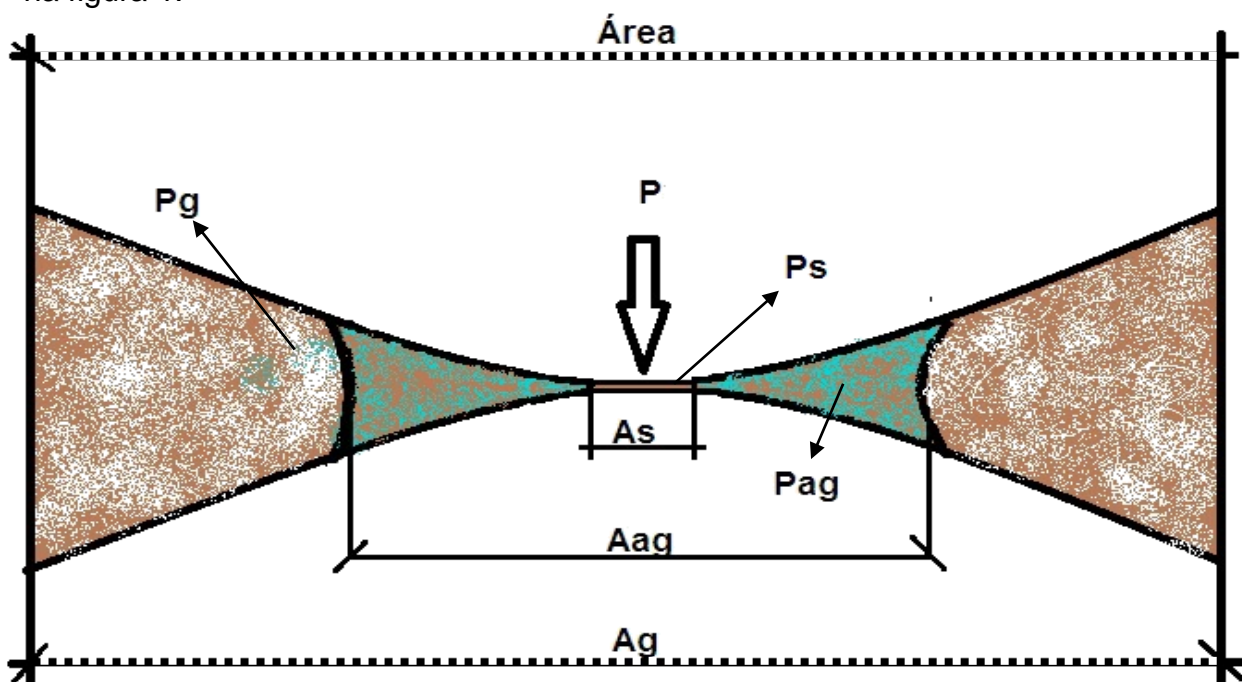


Figura 1 - Distribuição das tensões nas fases sólida, líquida e gasosa em solo não saturado quando submetido a carga normal. Fonte: Caputo (2000) modificada.

Considerando duas partículas sólidas em contato sobre uma superfície de área A_s e P a força (carga) total normal ao plano de contato, na condição de equilíbrio, tem-se:

$$P = P_s + P_{ag} + P_g \quad (1)$$

Então, admitindo-se que P seja a força resultante total normal ao plano de contato entre duas partículas do solo, a partir das indicações da Figura 1 é possível deduzir que:

$$P = (P_s \cdot A_s) + (P_{ag} \cdot A_{ag}) + (P_g \cdot A_g) \quad (2)$$

Assim, dividindo a equação (2) pela área total (A), temos:

$$\frac{P}{A} = P_s \cdot \frac{A_s}{A} + P_{ag} \cdot \frac{A_{ag}}{A} + P_g \cdot \frac{A_g}{A} \quad (3)$$

em que: P = força total normal no ponto de contato; P_s= força atuante sobre a fase sólida ; P_{ag}= força atuante sobre a fase líquida P_g= força atuante sobre a fase gasosa; A = área total; A_{ag}= área da fase líquida; A_s= área da fase sólida; A_g= área da fase gasosa.

Assumindo-se que a relação P/A = σ, A_s/A = a e A_{ag} / A = X, pode-se reescrever a equação (3) como:

$$\sigma = a \cdot P_s + (1 - a) \cdot P_g - \chi \cdot (P_g - P_{ag}) \quad (4)$$

Considerando que “a” é muito pequeno, portanto (1-a) → 1; e que, ao contrário, P_s é muito elevada, então fazendo-se a P_s = σ' (pressão efetiva), podemos reescrever a equação (4), obtendo-se:

$$\sigma' = \sigma - P_g + \chi \cdot (P_g - P_{ag}) \quad (5)$$

em que: σ'= pressão efetiva no ponto de contato; σ= pressão normal no plano de contato; P_g= pressão atuante sobre o ar e X= coeficiente de resistência proporcional ao grau de saturação do solo, sendo igual a um para o solo saturado e igual a zero para o solo seco, e P_{ag}= pressão atuante no menisco de água.

A equação (5) representa o princípio das pressões efetivas, proposto por Terzaghi (1936) e generalizado, para solos não saturados por Bishop (1959). Para os solos não saturados, Tower & Childs (1972) e Tower (1983) demonstraram que a tensão ou pressão efetiva (σ') pode ser determinada pela expressão (6).

$$\sigma' = - \chi \cdot (\psi m) \quad (6)$$

em que: Ψ_m é a sucção matricial do solo, e “ χ ” é o parâmetro de resistência definido acima.

Mosaddeghi et al. (2003), utilizando a equação (6), concluíram que o aumento da resistência do solo, definida pela tensão de précompressão e, devido à sucção matricial do solo, pode ser explicada em termos de tensão efetiva (σ'). Caputo (2000) enfatiza que todos os efeitos mensuráveis de variações nos solos, como compressão, distorção e resistência ao cisalhamento são devido às variações nas tensões efetivas. Segundo Braida (2004) quando a tensão efetiva, resultante da aplicação de carga normal sobre a superfície do solo, supera a resistência ao cisalhamento nos pontos de contato entre as partículas, os processos de compressão e deformação tornam-se eminentes.

1.1 - Compressibilidade de solos agrícolas

Os diferentes sistemas de manejo do solo usados de forma contínua ao longo do tempo geram mudanças na composição e arranjo dos constituintes do solo, principalmente nos atributos da densidade do solo, porosidade, umidade e carbono orgânico do solo, os quais exercem influência no comportamento compressivo de solos agrícolas, sendo refletido assim na sua compressão (Reinert, 1998; Wu et al. 1995; Gupta et al.1989).

A compressibilidade do solo refere-se à redução do seu volume por unidade de energia compressiva. Segundo Mosaddeghi et al. (2007), a mudança de volume pode ser expressa pelo índice de vazios ou pela densidade do solo. O termo compressibilidade abrange duas definições bastante importantes e amplamente utilizadas na mecânica de solos, as quais são os processos de consolidação e compactação.

Segundo Gupta & Allmaras (1987), a consolidação refere-se à compressão em solos saturados, enquanto que a compactação à solos não saturados. Dias Júnior (2000) ainda chama atenção para processo do adensamento que corresponde à saída de água dos poros na condição de solos não saturados e que ambos os processos de compactação e adensamento são devidos ao manejo

inadequado do solo. Entretanto, quando a redução de volume ocorre naturalmente, o mesmo também é denominado de adensamento.

O entendimento do processo de compressão envolve a avaliação da curva de compressão uniaxial. Conforme Dias Júnior & Pierce (1996) a curva de compressão do solo tem sido utilizada para simular as reduções de volume deste, representada graficamente pela relação entre o algoritmo da tensão aplicada e algum parâmetro relacionado com o arranjo de partículas e/ou agregados, como por exemplo, o índice de vazios ou a densidade do solo.

Entretanto, a curva de compressão do solo (Figura 2), tem sido usada como base comum para modelar a suscetibilidade do solo à compactação. Quando o solo não foi submetido a nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear (figura 2a). Porém, quando o solo já passou por pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, a variação das pressões atuando sobre o solo determinará a formação de duas regiões distintas na curva de compressão: a curva de compressão secundária e a reta de compressão virgem (Dias Júnior & Pierce, 1996).

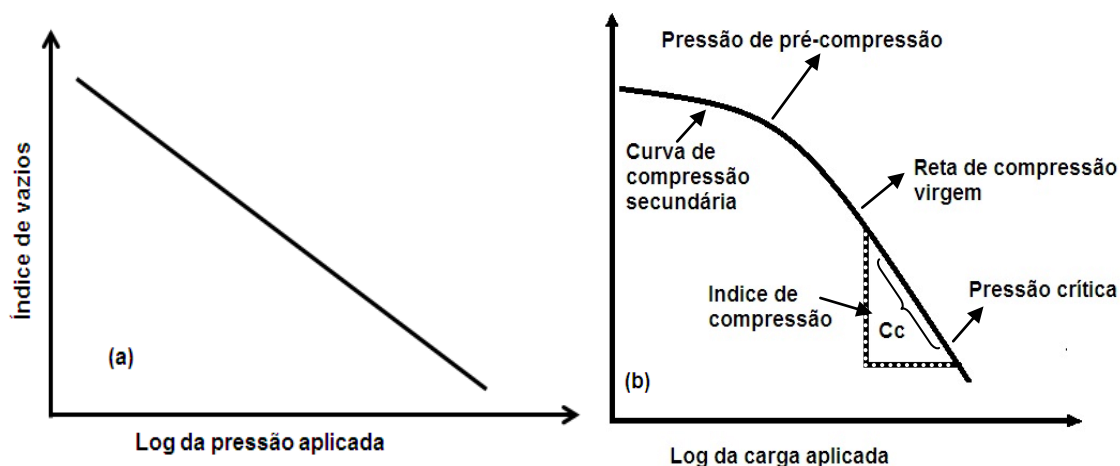


Figura 2 - Curva de compressão do solo quando o mesmo não foi submetido a pressão prévia (a) e quando o solo já passou por compressão prévia (b). fonte: Reichert et al. (2010).

A pressão de précompressão divide a curva de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária); e uma de deformações plásticas e não recuperáveis (reta de compressão virgem). O declive da reta de compressão virgem denomina-se

índice de compressão (C_c), o qual pode ser usado como uma medida da suscetibilidade do solo à compactação (Smith et al. 1997).

Portanto, na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão previamente aplicada ao solo deve ser evitada para que não ocorra compactação adicional (Silva et al. 2001; Kondo & Dias Júnior, 1999; Dias Júnior, 2000).

A curva de compressão do solo tem importância para a determinação de parâmetros de compressibilidade que evitem a aplicação de pressões excessivas nos solos agrícolas (Dias Júnior & Pierce, 1996). Esta curva é representada graficamente pela relação entre algum parâmetro da estrutura do solo, mais frequentemente, o índice de vazios ou a densidade do solo, com o logaritmo da carga aplicada. A partir dela, obtém-se a pressão de précompressão (σ_p), que é um parâmetro da capacidade de suporte de cargas pelo solo, e o índice de compressão (C_c), que é indicativo da susceptibilidade do solo à compactação (Lima, 2004b; Silva, 2002b; Holtz & Kovacs, 1981).

Os solos de áreas cultivadas com cana-de-açúcar são submetidos, na maioria das vezes, à pressões excessivas em condições de teor de água que favorecem o processo de degradação física, resultando em compactações adicionais (Pacheco e Cantalice, 2011). Segundo Tsegaye & Hill (1998), a pressão exercida na superfície do solo pelo tráfego de máquinas, normalmente, aumenta a densidade do solo e diminui a porosidade total, sobretudo a macroporosidade, sendo mais grave quando as operações de preparo do solo e tráfego de máquinas são realizadas aplicando-se pressões superiores à capacidade de suporte de carga, para um dado teor de umidade do solo (Dias Júnior & Pierce, 1996; Dias Júnior, 2000).

A aplicação de resíduos vegetais na superfície do solo absorve parte da energia compactante produzida pelo trânsito de máquinas e de animais. Assim, durante a compressão, os resíduos vegetais deformam-se, dissipando a energia e não havendo transmissão total desta energia para o solo. Desse modo, a transmissão total de energia só irá ocorrer depois que o resíduo não for mais eficiente para absorver toda energia compressiva, quando ocorre sua total deformação (Braidá, 2004). Ainda segundo o autor, a deformação rápida dos resíduos, durante a aplicação de uma carga sobre o solo, poderá resultar em

aumento da área de contato carga/solo, podendo contribuir ainda mais para redução da pressão resultante sobre o solo.

A matéria orgânica tem uma grande importância no comportamento físico do solo, principalmente quando ele é submetido a carga externa. O solo apresenta redução da sua densidade e do grau de compactação quando o teor de matéria orgânica é aumentado. Mosaddeghi et al. (2000), estudando a adição de esterco ao solo, observaram uma redução no efeito do tráfego e da umidade sobre a densidade do solo e sua resistência à penetração, aumentando o intervalo de umidade que o solo pode suportar com a aplicação de carga externa e, dessa forma, reduzindo o risco de compactação irreversível.

Carpenedo (1994), comparando os sistemas de manejo adotado em um Argissolo Vermelho-amarelo com preparo convencional e semeadura direta nas culturas de aveia e milho, constatou valores mais elevados da pressão de précompressão nos solos sob semeadura direta. Segundo o autor, a grande adição de resíduos e os maiores teores de matéria orgânica do solo, associado à ausência de revolvimento neste sistema, melhoraram a estrutura do solo, conferindo a este uma maior resistência às pressões externas, principalmente à baixos teores de água.

O excesso de umidade no solo também é responsável por dissipar parte da pressão aplicada sobre o solo e com isto ocorrendo uma redução da pressão aplicada no solo, mas ocasionando sua deformação (Kondo & Dias Júnior, 1999). Pinto (2000), também comenta que, se a tensão total for aumentada com igual aumento da pressão da água, as partículas serão comprimidas, porque a pressão da água atua em todas as direções no solo. No entanto, como as partículas são consideradas incompressíveis para o nível de tensão comum e as deformações dos solos são resultantes do deslocamento relativo das partículas, devido às tensões efetivas, logo poderá concluir que não irão ocorrer deformações com o aumento da pressão da água.

1.2 - Resistência ao cisalhamento de solos agrícolas

A resistência de um solo ao cisalhamento é definida como a resistência interna por área que o solo pode oferecer para resistir à rupturas e à deslizamentos ao longo de um plano. Se a tensão cisalhante em um corpo de solo excede

determinado valor crítico de resistência, o solo se rompe. Dependendo das condições de suporte do solo e da carga, essa falha pode causar um deslizamento ou colapso na estrutura (Reichert et al., 2010).

Segundo Terzaghi (1936), a resistência ao cisalhamento dependerá da tensão normal efetiva que atuará no plano considerado e do ângulo de atrito interno do material em estudo. Segundo Pinto (2000), todos os efeitos mensuráveis originários de variações de tensões, tais como compressão, distorção e mudança na resistência ao cisalhamento, são devidas exclusivamente às variações das tensões efetivas. A representação gráfica das forças atuantes em um corpo durante o teste de cisalhamento direto pode ser vista na figura 3:

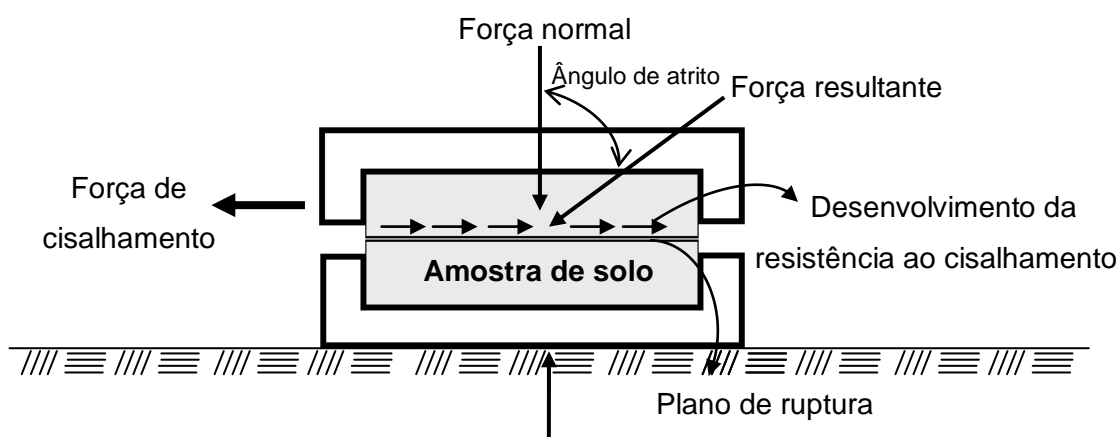


Figura 3 - Representação das forças atuantes no teste de cisalhamento direto Lambe (1951); Mckyes (1989). Modificada.

A resistência do solo ao cisalhamento pode ser expressa pela da equação de Coulomb:

$$\tau = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (7)$$

em que: C = coesão entre as partículas do solo (kPa); σ_n = tensão normal efetiva (kPa); θ = ângulo de atrito interno (graus).

Essa equação define a envoltória de resistência, que corresponde a linha limite de resistência do solo, ou seja, qualquer pressão cisalhante que esteja acima dessa linha promoverá a ruptura do solo (Rocha, 2003).

O ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças, tangencial e normal, é denominado de ângulo de atrito ϕ , sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que haja deslizamento. A resistência por atrito entre as partículas do solo depende do coeficiente de atrito e , pode ser definida como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano, em outro paralelamente a este. Esta força também é proporcional à força normal ao plano.

O incremento da densidade do solo aumenta a fricção entre as partículas sólidas e a coesão no solo, que atuam como principais mecanismos para o aumento da resistência mecânica do solo (Vepraskas 1984). A densidade do solo altera o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, que está diretamente relacionado com o número de pontos de contato entre estas. Para um mesmo material, o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade do solo e, conseqüentemente, maior quantidade de pontos de contato entre as partículas sólidas do solo.

O desenvolvimento da coesão entre as partículas do solo também é fortemente influenciada pelo teor de água do solo. O aumento da coesão com a redução da umidade do solo tem sido verificado por alguns autores como McKyes et al. (1994) e Boeni (2000). De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), a diminuição da umidade reduz a distância entre as partículas, havendo um conseqüente aumento da atração entre elas, resultando assim, num acréscimo da coesão do solo, como verificado por Arvidsson et al. (2001), um aumento da coesão do solo de textura média, 87 para 154 kPa, quando diminuiu-se o teor de água no solo de 0,17 para 0,11 kg kg^{-1} , evidencia o grande efeito da umidade na coesão do solo.

A resistência ao cisalhamento, associada à resistência à penetração das raízes nos solos, constitui a propriedade mecânica do solo que afeta grandemente o crescimento do sistema radicular das plantas e o comportamento eficiente das ferramentas agrícolas (Secco, 2003; Voorhees et al., 1978). A partir do ensaio de cisalhamento direto, pode ser determinado o potencial de tração do solo a partir da adaptação da equação de Coloumb (7) feita por Micklethwaite (1944) obtendo-se à equação (8):

$$P = A \cdot C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (8)$$

em que: P = potencial de tração (kPa); C = coesão do solo; A = área de contato rodado-solo; σ = tensão normal efetiva (kPa); θ = ângulo de atrito interno (graus).

No Brasil e principalmente no Nordeste, poucos trabalhos foram realizados utilizando ensaios de cisalhamento para estudar a coesão de solos na agricultura e muito menos a sua aplicabilidade em campo após os resultados dos estudos. Tal fato deve-se provavelmente a grande variabilidade mineralógica dos solos influenciada por fatores climáticos, antrópicos e edáficos, tornando assim difícil estabelecer valores únicos de cisalhamento para esses solos submetidos à diferentes sistemas de manejo (Silva & Carvalho, 2007; Rosa, 2007; Silva & Cabeda, 2005).

Diante do exposto, a pesquisa foi baseada nas hipóteses citadas no item 2 a seguir.

2 - HIPÓTESES

- A adição de matéria orgânica no solo, proveniente da aplicação de vinhaça e da torta de filtro, produzidas no processo de industrialização da cana-de-açúcar, exercem influência nos parâmetros da compressibilidade do solo, nos diferentes sistemas adotados no cultivo da cana-de-açúcar, pelo efeito de dissipação de energia;
- Espera-se que a aplicação de matéria orgânica no Argissolo, na forma de vinhaça e torta de filtro promovam menores valores de pressão de précompressão, quando comparados com solo de mata nativa;
- A coesão do solo, como parâmetro da resistência ao cisalhamento direto aumentará com a aplicação da torta de filtro em relação à vinhaça, desde que o solo esteja não saturado;
- O ângulo de atrito entre as partículas, não apresentará redução com aplicação da matéria orgânica, desde que o solo esteja não saturado;

Diante do exposto, as hipóteses serão testadas por meio dos seguintes objetivos:

3 - OBJETIVO GERAL

Avaliar a compressibilidade e a tensão de cisalhamento de um Argissolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, submetidos a três sistemas de manejo do solo.

3.1 - Objetivos específicos

- Determinar a tensão de précompressão (σ_p), o índice de compressão do solo (C_c) e a tensão de cisalhamento (τ) dos horizontes A_p e subjacentes, submetidos aos sistemas de manejos adotados na cultura da cana-de-açúcar em comparação com área de mata nativa, como também:
- Avaliar o histórico de pressões armazenadas nos solos e sua relação com os diferentes sistemas de manejos adotados na cultura da cana-de-açúcar;
- Investigar as relações existentes das tensões de précompressão (σ_p), índice de compressão do solo (C_c) e a tensão de cisalhamento (τ) do horizonte A_p dos diferentes sistemas de manejo com as propriedades físicas e com o carbono orgânico do solo;
- Investigar as relações existentes entre os sistemas de manejo do solo com os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto do solo.

4 - MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na unidade sucroenergética da Usina Trapiche localizada no município de Sirinhaém, à 80 km do Recife – PE. Foram selecionadas duas áreas cultivadas com cana-de-açúcar em Argissolo Vermelho-Amarelo, um dos três solos de maior incidência na região (ver capítulo I, Figura 2). Os dois sistemas de manejo distintos foram: torta de filtro e vinhaça. Estes sistemas de manejo foram comparados com a área de mata, os quais estavam todos situados na posição de encosta de morro, conforme localização apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Coordenadas geográficas das áreas selecionadas para o estudo

Sistemas de manejo	Localização (GPS)
Torta de filtro	S 08° 31' 02.30" / O 035° 05' 38.40"
Vinhaça	S 08° 31' 55.30" / O 035° 05' 34.60"
Mata nativa	S 08° 32' 59.90" / O 035° 08' 56.40"

4.1 - Histórico de cultivo das áreas selecionadas

As áreas possuem um histórico de cultivo com mais de 50 anos nas áreas de encostas de morro. A aplicação de vinhaça e torta de filtro nas áreas da unidade sucroenergética é de aproximadamente 25 anos, principalmente nas encostas de morro. No sistema de manejo que ocorre a aplicação de vinhaça, conforme o tipo de solo, é estabelecido um tempo de irrigação de 0,50 – 2 horas por ponto de aspersão em lâminas variando de 40-45 mm para socarias. A irrigação com vinhaça geralmente é realizada a partir do segundo corte da cultura nas áreas próximas aos canais de vinhaça. No sistema de manejo com torta de filtro, aplica-se em média 40 ton ha⁻¹ de torta em área total durante o plantio. Os rendimentos agrícolas das últimas safras das áreas selecionadas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Rendimento agrícola das áreas cultivadas com cana-de-açúcar

Safras (ano)	Torta de filtro	Vinhaça
	Ton ha ⁻¹	
2004/2005	64,61	61,47
2005/2006	56,34	70,04
2006/2007	56,25	97,17
2007/2008	63,63	80,00
2008/2009	66,06	61,23
2009/2010	63,07	38,81
2010/2011	65,10	-----
2011/2012	-----	80,20
2012/2013	60,00	50,00
2013/2014	-----	82,60
Média	61,88	69,06

Nas encostas com menores declives, o plantio ocorre com uso de tratores acoplados à implementos agrícolas (arado, sulcadores, subsoladores e grade niveladora) que são utilizados conforme as condições físicas do solo e/ ou cronograma agrícola. No entanto, no período de colheita, a cana é retirada dessas encostas por carregadeiras e tratores (figura 4), os quais são os responsáveis pela retirada de toda a cana-de-açúcar cortada manualmente.



Figura 4 - Carregamento de cana nas áreas de encostas (a), com detalhes para o relevo em “Mar de Morros” (b).

4.2 - Determinação das pressões das máquinas no solo

Os veículos considerados neste trabalho fazem parte da frota da Usina e normalmente são introduzidos nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar para realização das tarefas durante a colheita e o plantio. No período de colheita, nas áreas mais declivosas, faz-se uso das bels (veículo com baixo centro de gravidade que suportam inclinações de até 39°) e tratores (BH-180) para o “embolamento” da cana cortada para áreas próximas das estradas. Posteriormente, com auxílio da carregadeira, a cana é colocada nos caminhões e reboques.

No plantio, os tratores são usados no preparo periódico do solo, como também na abertura de sulcos para plantio da cana. Foram levantadas as características dos veículos usados na colheita e preparo periódico do solo, consistindo: (a) quatro carregadeiras com rodado simples e pneus da Goodyear nos eixos dianteiro (18.4 - 34) e traseiro (14.9 - 26) com insuflagem de 180 kPa em ambos rodados e, 75% de água de lastro; (b) Cinco tratores (Valtra BH 180) usados no plantio, preparo periódico do solo e embolamento de cana. O rodado simples no eixo dianteiro do trator é constituído por pneus Goodyear 18.4-26 com uma insuflagem de 179 kPa e rodado traseiro simples também da Goodyear 24.5 - 32 com 165 kPa de insuflagem, ambos possuem 75% de água de lastro.

Estas informações foram plotadas com a média para cada veículo no software Tasc versão 2.0, com inserção de outras informações, como profundidade de

avaliação, granulometria do solo, condição de dureza do solo conforme o teste de resistência à penetração, bitola dos veículos, entre outras. Desse modo, obtendo-se as pressões exercidas no solo pelo rodado veículos. Um resumo das características dos veículos pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios de carga sobre os rodados e inflação dos pneus

Veículos	Rodados		Carga por rodado (kg)		Pressão de insuflagem (kPa)	
	Dianteiro	Traseiros	Dianteiro	Traseiros	Dianteiro	Traseiros
Carregadeira	Simple	Simple	2255	2255	180	180
Tratores	Simple	Simple	2500	2500	179	165

4.3 - Definição do número de amostras

As amostras foram coletadas em duas profundidades, na camada de 0- 0,20 e 0,20 – 0,40 m. Nos dois sistemas de manejo e na área de mata. A quantidade de amostras para os tipos de ensaios e/ou análises foram coletadas conforme a Tabela 4 e, serão detalhados mais detalhadas adiante.

Tabela 4 - Resumo do número de amostras coletadas no realizados no Argissolo Amarelo nos dois sistemas de manejo e na mata

Análises / ensaios	Descrição	Estado da amostra	Quantidade
Física	Atributos físicos	Não-estruturada	30
	Curva de retenção	Estruturada	30
Mecânica	Compressibilidade	Estruturada	90
	Cisalhamento direto	Estruturada	108
Químicos	Carbono orgânico	Não-estruturada	30

4. 4 - Atributos físicos com amostras não estruturadas

A coleta das amostras não estruturadas para os ensaios de física do solo ocorreu nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, sendo coletadas cinco repetições em cada profundidade no mesmo sistema de manejo, totalizando 30

amostras não-estruturadas para os três sistemas de manejo em estudo (mata, torta e vinhaça). Os ensaios/análises com estas amostras são apresentados a seguir:

4.4.1 – Limite de plasticidade

O limite de plasticidade (LP) foi determinado por meio da moldagem do solo em cima de uma plataforma de vidro áspero até ficar na forma de um bastão com rachaduras, ocorrendo a saída de água do bastão para a plataforma. Desse modo, formam-se pequenos cilindros de dimensões padronizadas, conforme norma da ABNT (1984 b), onde o LP corresponde a umidade gravimétrica contida nos cilindros moldados.

4.4.2 – Limite de liquidez

O limite de liquidez foi determinado por meio do aparelho de Casa Grande, conforme a norma da ABNT (1984 a), a qual estabelece como o limite de liquidez, a umidade gravimétrica necessária para fechar uma fissura na massa do solo da concha em 25 batidas.

4.4.3 – Índice de plasticidade

O índice de plasticidade foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, constituindo uma indicação da plasticidade do solo.

4.4.4 – Estabilidade de agregados via úmida

A estabilidade de agregados via úmida foi realizada pelo método de peneiramento com um aparelho de oscilação vertical do tipo Yooder, proposto por Kemper & Rosenau (1986), com modificações. O aparelho tipo Yooder utilizado é composto por três recipientes cilíndricos (ver capítulo I, figura 4a), inserindo-se um conjunto de cinco jogos de peneiras em cada recipiente (3,35 - 2,00 - 0,5 - 0,25 - 0,125 mm).

Coletou-se aleatoriamente amostras com 50 g de agregados de vários tamanhos os quais, foram umedecidos em papel filtro por capilaridade, durante 24 horas, evitando-se assim o aprisionamento de ar dentro dos agregados. Depois da saturação, as amostras foram transferidas para o conjunto de peneiras, sendo

depositadas cuidadosamente na peneira superior, com 3,35 mm de malha (ver capítulo I, figura 4b). As amostras ficaram submetidas ao peneiramento via úmida com 25 oscilações verticais por minuto, durante um período de 10 mim.

Após o peneiramento por 10 minutos (ver capítulo I - figura 4c), os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para latas de alumínio, com auxílio de jatos fracos d'água, dirigidos ao fundo das peneiras, sendo esse material seco em estufa (105°C) por 24 h, com sua posterior pesagem para determinação da distribuição da classe de agregados estáveis em água.

Os pesos obtidos foram usados nas equações do diâmetro médio ponderado (8) e do diâmetro médio geométrico (9) ambas propostas por Kemper & Rosenau (1986) conforme apresentadas a seguir:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i \quad (8)$$

em que: DMP = diâmetro médio ponderado (mm); x_i = diâmetro médio das classes (mm); w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n wp \times \log x_i}{\sum_{i=1}^n wp} \quad (9)$$

em que: DMG = diâmetro médio geométrico (mm); wp = peso dos agregados de cada classe (g); x_i = diâmetro médio das classes.

4.4.5 – Estabilidade de agregados via seca

A estabilidade de agregados via seca foi realizada com um agitador eletromagnético, fabricante ViaTeste, equipado com um conjunto de peneiras com os seguintes diâmetros de abertura de malha: 3,35; 1,70; 0,850; 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075; 0,053 mm e uma fechada (ver capítulo I, figura 5), a uma intensidade de 90 vibrações por segundo, durante 10 minutos. Foram coletados aleatoriamente 300 gramas de agregados secos ao ar, posteriormente colocou-se no agitador para proceder ao ensaio. Após o término, realizou-se a pesagem da fração de agregados retidos em cada classe de peneiras do agitador e, com estes pesos,

determinou-se o DMP e o DMG, conforme as equações 8 e 9 de Kemper & Rosenau (1986).

4.4.6 – Densidade de partículas

A densidade de partículas sólidas do solo (D_p) foi realizada pela determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo 20 g de terra fina seca em estufa (< 2 mm), de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

4.4.7 – Análise granulométrica

A determinação da distribuição das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) para caracterização do solo estudado (Tabela 5), foi realizada conforme metodologia sugerida por Almeida (2008). Nessa, a fração argila do solo, foi dispersa quimicamente pelo uso da solução de hexametáfosfato de sódio e, fisicamente por agitação lenta, no agitador tipo Wagner por 16 h.

Após a agitação, o material foi passado em peneira de 0,053 mm, coletando-se as frações argila e silte em proveta de 1L, até o volume de 940 mL, posteriormente, agitando-se manualmente com uma haste. Após 24 h de repouso, o material em suspensão (argila total) teve sua densidade medida pelo uso do densímetro de Bouyoucos (152 H). Procedendo-se a leitura também da prova em branco (apenas dispersante + água). O material retido na peneira, após secagem em estufa a 105°C por 24 h, foi pesado e calculado como areia total. O silte foi obtido pela diferença entre as frações [% silte = 100 – (% areia + % argila)].

Da mesma forma, foram determinadas as quantidades de argila dispersa em água (ADA), sendo calculados os índices de floculação (IF) a partir da relação entre os teores de argila total e argila dispersa em água.

4.5 - Atributos físicos com amostras estruturadas

A coleta de amostras de solo para as determinações da curva de retenção de água no solo (CCRAS), densidade do solo, porosidade (total, macro, meso, micro, criptoporosidade), capacidade de campo e ponto de murcha permanente, em laboratório, foi realizada nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. sendo

coletadas em cada profundidade, cinco repetições em cada sistema de manejo, totalizando 30 amostras para todos os sistemas de manejo.

A coleta foi realizada com uso de um amostrador de solos tipo Uhland com anéis volumétricos de dimensões de 5,0 cm de altura (h) x 5,0 cm de diâmetro interno (\varnothing_i).

Após a introdução do amostrador no solo (ver capítulo I, figura 6a) e sua retirada, marcou-se o sentido da coleta no anel (ver capítulo I, figura 6b), e procedeu a retirada do cilindro com auxílio de uma faca (ver capítulo I, figura 6c) deixando um excesso de solo no anel para ser retirado no laboratório (toalete) (ver capítulo I, figura 6d).

4.5.1 – Porosidade total

A porosidade total foi determinada pelo método da saturação. Neste, os anéis volumétricos contendo solo saturado foram pesados, obtendo-se volume de poros. Este peso foi utilizado nos cálculos da umidade volumétrica de saturação (θ_{saturada}), assumindo-se que a densidade da água é igual a 1 g cm⁻³, então, por definição, pode ser considerada como a porosidade total da amostra (Pt), conforme equação (10).

$$P_{(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})} = \frac{M_{su \text{ saturação}} - M_{ss \text{ } 105^\circ \text{C}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{saturação}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{Poros}}}{V_{t \text{ solo}}} = \theta_{\text{Saturação}} \quad (10)$$

em que, P = porosidade total (cm³ cm⁻³); M_{su} = massa de solo úmido na saturação (g); M_{ss} = massa de solo seco à 105°C (g); V_{saturação} = volume da água na saturação (cm³); V_{anel} = volume total do anel (cm³); V_{solo} = volume total do solo (cm³); V_{poros} = volume de poros (cm³) e, θ = umidade volumétrica na saturação (cm³ cm⁻³).

4.5.2 – Determinação da distribuição do tamanho de poros do solo

Para determinar a distribuição de tamanho de poros do solo (macro, meso e microporos) utilizou-se a classificação por diâmetro (\varnothing) de poros proposta por Prevedello (1996), ficando definidos como macroporos aqueles poros que drenam água à tensão de 0,10 mca ($d > 300 \mu\text{m}$), mesoporos aqueles que drenam água

entre as tensões de 0,10 e 0,60 mca ($50 \mu\text{ m} < d < 300 \mu\text{ m}$) e, microporos aqueles que drenam água à tensão $> 0,60 \text{ mca}$ ($d < 0,50 \mu\text{ m}$).

Desse modo, a macroporosidade foi determinada nos conjuntos anel-amostra de solos submetidos a uma tensão de 1kPa. Após equilibrada a tensão, os conjuntos anel-amostra foram pesados, adotando-se para propósitos práticos 1 g cm^{-3} como sendo a densidade da água. Desse modo, determinado-se o volume de água extraído dos macroporos, calculado-se a macroporosidade, conforme equação (11), expressa em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

$$\text{Macroporosidade (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su(\text{Saturado})} - M_{su(\psi 10 \text{ cca})}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{w \text{ extraído - até } \psi 10 \text{ cca}}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{macroporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (11)$$

em que, $M_{su(\text{Saturado})}$ = Massa de solo úmido na saturação (g); $M_{su(\psi 10 \text{ cca})}$ = Massa de solo úmido na tensão de 10 cca (g); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w \text{ extraído-até-}\psi 10 \text{ cca}}$ = volume de água extraído até a tensão de 10 cca (cm^3); $V_{\text{macroporos}}$ = volume de macroporos (cm^3); V_{solo} = volume do solo (cm^3).

A mesoporosidade foi determinada nos anéis conjuntos anel-amostra de solos submetidos a uma tensão de 6kPa. Após equilibrada a tensão, obteve-se os pesos do conjunto anel-amostra, determinando assim, o volume de água extraído dos mesoporos e calculado a mesoporosidade, conforme equação (12), expressa em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

$$\text{Mesoporosidade (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su(\psi 10 \text{ cca})} - M_{su(\psi 60 \text{ cca})}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{w(\psi 10 \text{ cca} - 60 \text{ cca})}}{V_{t \text{ anel}}} = \frac{V_{\text{mesoporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (12)$$

em que, $M_{su(\psi 10 \text{ cca})}$ = massa de solo úmido na tensão de 10 cca (g); $M_{su(\psi 60 \text{ cca})}$ = massa de solo úmido na tensão de 60 cca (g); $V_{t \text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w(\psi 10-60 \text{ cca})}$ = volume de água extraído entre as tensões de 10 e 60 cca (cm^3); $V_{\text{mesoporos}}$ = volume de mesoporos (cm^3); V_{solo} = volume de solo (cm^3).

A microporosidade foi determinada pela diferença entre o peso da amostra de solo à 60 cca (6 kPa) e o peso da amostra a 15000 cca (1500 kPa), conforme a equação (13).

$$\text{Microporosidade (cm}^3\text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su}(\psi_{60\text{ cca}}) - M_{su}(\psi_{15000\text{ cca}})}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{w(\psi_{60-15000\text{ cca}})}}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{\text{microporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (13)$$

em que, $M_{su}(\psi_{60\text{ cca}})$ = massa de solo úmido na tensão de 60 cca (g); $M_{su}(\psi_{15000\text{ cca}})$ = massa de solo úmido na tensão de 15000 cca (g); $V_{t\text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w(\psi_{60-15000\text{ cca}})}$ = volume de água extraído da tensão de 60 à 1500 cca; $V_{\text{microporos}}$ = volume de microporos (cm^3); V = volume de solo (cm^3);

A criptoporosidade foi determinada e classificada numericamente, equivalendo à unidade volumétrica no ponto de murcha permanente, a qual é a diferença entre o peso da amostra equilibrada em 15000 cca (1500 kPa) e amostra seca em estufa, conforme a equação (14).

$$\text{Criptoporosidade (cm}^3\text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_{su}(\psi_{15000\text{ cca}}) - PM_{ss_{105^\circ\text{C}}}}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{w_{\psi_{15000\text{ cca}}}}}{V_{t\text{ anel}}} = \frac{V_{\text{criptoporos}}}{V_{\text{Solo}}} \quad (14)$$

em que, $M_{su}(\psi_{15000\text{ cca}})$ = Massa de solo úmido na tensão de 15000 cca (g); $M_{ss_{105^\circ\text{C}}}$ = massa de solo seco à 105°C (g); $V_{t\text{ anel}}$ = volume total do anel (cm^3); $V_{w_{\psi_{15000\text{ cca}}}}$ = volume de água retida na tensão de 15000 cca (cm^3); $V_{\text{criptoporos}}$ = volume de criptoporos (cm^3); V_{solo} = volume de solo (cm^3).

4.6.4 – Determinação da curva característica de retenção de água do solo (CCRAS)

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas em cada sistema de manejo utilizando quatro repetições para cada profundidade (0 - 0,20 e 0,20-0,40 m), totalizando 8 amostras. Para construção da curva foram determinadas as seguintes tensões de 1; 3; 6; 10; 33; 100; 300; 500; 1000 e 1500 kPa. As amostras foram colocadas para saturar por 48 horas e, posteriormente transferidas para mesa de tensão (ver capítulo I, figura 8a e b) para determinação da umidade volumétrica nas menores tensões de 1; 3; 6 e 10 kPa.

Terminada as etapas da mesa de tensão, as amostras foram colocadas na câmara de Richards de baixa pressão (ver capítulo I, figura 9a), para determinar as

umidades nas tensões de 33; 100; 300 e 500 kPa e, finalizando na câmara de Richards para altas tensões (ver capítulo I, figura 9b) de 1.000 e 1.500 kPa.

Os dados obtidos da curva de retenção de água no solo foram ajustados pela equação (15), proposta por Van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \times \psi)^n\right]^m} \quad (15)$$

m que, $\theta =$ é a umidade volumétrica do solo $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; $\theta_r =$ é a umidade residual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); $\theta_s =$ umidade de saturação; $\alpha =$ é um parâmetro de dimensionamento, inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros (cm^{-1}); Ψ é a tensão de drenagem desejada (kPa) e, n e m são parâmetros empíricos. Para o cálculo do valor de m, foi utilizada a expressão proposta por Mualem (1976), ($m = 1 - 1/n$).

4.6.5 – Ensaio de compressibilidade do solo

Para o ensaio de compressibilidade, foi realizada a coleta em cada sistema de manejo, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Foram coletadas em cada profundidade, cinco repetições para serem usadas em cada nível umidade (0,42; 0,36; e 0,32 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), totalizando 90 amostras para os três sistemas de manejo.

Para os ensaios de compressibilidade foi necessário que os anéis apresentassem uma relação de diâmetro interno (\varnothing_i) e altura (h) entre 2,50 e 3,0 cm conforme preconiza a norma da ABNT-MB 3336/90. Com base nesta norma, foi realizada uma adaptação no amostrador de Uhland, alterando-se as dimensões do cachimbo, para que fossem acoplados os anéis confeccionados com dimensões de $\varnothing_i = 7,30$ cm e $h = 2,60$, cuja relação \varnothing_i / h correspondesse a 2,80 (ver capítulo I, figura 11).

Após a retirada, todas as amostras foram envolvidas em plástico filme e posteriormente em plástico-bolha (ver capítulo I, figura 13). As amostras foram colocadas dentro de caixas de isopor protegidas internamente com espuma, para serem transportadas até o Laboratório de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE, para proceder aos ensaios. Todo esse processo foi realizado para reduzir ao máximo os impactos mecânicos advindos do transporte para o laboratório.

No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo do anel volumétrico e, colocadas para saturar por 72 horas. Após decorrido o tempo, as amostras foram submetidas às tensões equivalentes as umidades pré-estabelecidas anteriormente, conforme as tensões a serem aplicadas, algumas as amostras eram colocadas na mesa de tensão ou nas câmaras de Richards, sendo retirada após o cessamento da drenagem nas suas respectivas tensões equilibradas.

Após a retirada da mesa de tensão ou das câmaras de Richards, as amostras foram pesadas e, colocadas numa prensa de adensamento, adaptada anteriormente para ser usada conforme a dimensão dos anéis cilíndricos para compressibilidade (ver capítulo I, figura 14).

O ensaio foi realizado numa prensa de adensamento com capacidade de carga de 1000 kgf, consistindo na aplicação das pressões de 12,50; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa estabelecidas pela norma ABNT-MB 3336/90. As leituras de deformação vertical foram medidas pelo relógio microcomparador. As pressões eram aplicadas de maneira crescente por uma alavanca manual (ver capítulo I, figura 14a), permanecendo por 30 segundos em cada estágio de pressão.

Os estágios de pressões eram estabelecidos por meio da deformação do anel dinamométrico em mm, a qual correspondia à pressão aplicada na amostra (ver capítulo I, figura 15b). Ao mesmo tempo, no estágio inicial de cada pressão, era medida a deformação vertical na amostra por meio de um extensômetro comparador de deformação. No final do ensaio, as amostras foram levadas a estufa a 105° C, por 24 h, para determinação da umidade volumétrica após o ensaio, tendo-se desse modo, os a umidades volumétricas antes e após os ensaios.

Os dados obtidos da deformação vertical, medida no relógio microcomparador após a aplicação de cada uma das cargas verticais, alimentaram o programa computacional “Compress” (Reinert et al., 2003), que calcula e fornece a partir do deslocamento registrado, a curva de compressão, a tensão de précompressão (σ'_p) e o índice de compressão (C_c).

Na determinação da tensão de précompressão (σ'_p) utilizou-se o método gráfico de Pacheco Silva. Conforme ilustrado no capítulo I, a figura 16 representa a curva de compressão e o processo gráfico para determinação da tensão de précompressão pelo referido método.

No método de Pacheco Silva (ver capítulo I, figura 16), prolonga-se uma reta tangenciando a reta virgem (tracejado verde) e traça-se uma reta até perpendicular a reta virgem, na horizontal correspondente ao índice de vazios inicial (e^0) da amostra (tracejado vermelho). Do ponto de interseção das duas retas, baixa-se uma vertical até a curva de compressão e , deste ponto (tracejado preto), traça-se outra reta horizontal de encontro à reta que tangencia a reta virgem. A interseção desta horizontal com o prolongamento da reta virgem (círculo em vermelho) é considerada a tensão de pré-compactação.

O índice de vazios em cada estágio de pressão foi calculado conforme a norma da ABNT 12007/90, onde estabelece as seguintes equações:

$$e_i = \left[\left(\frac{D_p}{D_s} \right) - 1 \right] \quad (16)$$

em que: e_i = índice de vazios inicial (adm); D_s = densidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); D_p = densidade de partículas ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Adicionando o resultado da equação 16, na equação 17, tem-se a altura de sólido dada pela equação abaixo:

$$H_s = \frac{H_i}{1 + e_i} \quad (17)$$

em que: H_s = altura do sólido do corpo de prova (cm); H_i = altura inicial do corpo de prova (cm); e_i = índice de vazios inicial (adm).

Com os valores da altura de sólidos do corpo de prova procedeu-se o cálculo para o índice de vazios no final de cada estágio de pressão, adicionando o resultado da equação 17 na equação 18 a seguir.

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (18)$$

em que: e = índice de vazios no final do estágio de pressão (adm); H_s = altura de sólidos do corpo de prova (cm); H = altura do sólido do corpo de prova no final de cada estágio de pressão (cm).

O índice de compressão (C_c) é a inclinação da reta virgem de compressão (Holtz & Kovacs, 1981), determinado pela relação:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_{p2} - \log \sigma_{p1}} \quad (20)$$

em que C_c = índice de compressão (adm); e_1 = índice de vazios inicial (adm); e_2 = índice de vazios final (adm); σ_1 = pressão aplicada no estágio inicial; σ_2 = pressão aplicada no estágio final.

4.6.6 – Ensaio de cisalhamento direto

Para o ensaio de cisalhamento, a coleta em cada sistema de manejo, ocorreu na profundidade de 0-0,20 (m) em três repetições para serem usadas em cada tensão normal (50, 100; 150 e 200 kPa) para os níveis de umidade estabelecidos (0,42; 0,36 e 0,32 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), totalizando 108 amostras para os três sistemas de manejo.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado conforme a norma ASTM D-3080/98, conduzido em um aparelho de cisalhamento direto com 12 velocidades cisalhantes (1,25; 0,625; 0,25; 0,125; 0,05, 0,025; 0,01; 0,005; 0,002; 0,001; 0,0004; 0,0002 mm min^{-1}) e com capacidade de tensão normal de até 8 kgf cm^{-2} , podendo ser adicionado até 8 kgf cm^{-2} , (ver capítulo I, figura 17).

A velocidade de cisalhamento utilizada nas amostras foi de 0,125 mm m^{-1} , em três estágios de tensões normais de 50; 100 e 200 kPa. Com estes três estágios, foi possível determinar um valor de coesão e o de ângulo atrito interno.

As amostras foram coletadas no campo por meio de uma caixa retangular de aço inox, confeccionada nas dimensões de 0,06 (l) x 0,06 (c) x 0,043 (h) m. As amostras foram introduzidas no solo por meio de pressão (ver capítulo I, figura 19-a), para não gerar nenhum tipo de abalo físico e conseqüentemente danificar a estrutura. Após a retirada das amostras, elas foram cobertas com plástico-bolha e condicionadas em caixas de isopor. No laboratório, foi retirado o excesso de solo (ver capítulo I, figura 19-c) e colocadas para saturar por 48 horas. Posteriormente, conforme as tensões a serem aplicadas nas amostras, utilizou-se a mesa de tensão,

e/ou câmara de Richards, onde foram retiradas após cessar a drenagem (ver capítulo I, figura 18).

Após a drenagem de água e estabelecido o equilíbrio do potencial aplicado, as amostras eram retiradas individualmente para realizar alguns ajustes finais antes de proceder aos ensaios, como por exemplo, a remoção 1,0 cm de solo da caixa de coleta com auxílio de um bastão de madeira (ver capítulo I, figura 19-d) para coincidir com a altura da caixa de cisalhamento (3,3 cm). Com a amostra já ajustada (ver capítulo I, figura 19-e), esta foi colocada na caixa de cisalhamento com o auxílio do bastão (ver capítulo I, figura 19-h), ficando pronta para realizar o ensaio de cisalhamento (ver capítulo I, figura 19-m).

A modalidade do ensaio foi caracterizada pela aplicação simultânea inicial das tensões: normal constante (s_n) e cortante (T), sendo esta última aumentada gradativamente até a ruptura do corpo de prova. A força horizontal provocou o deslocamento com velocidade constante na metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade foi registrada por leitura no relógio comparador do anel dinamométrico (ver capítulo I, figura 20-a). As leituras no anel dinamométrico (figura 20-a) e no relógio comparador de deformação vertical (ver capítulo I, figura 20-c) foram realizadas conforme as deformações horizontais medidas pelo relógio comparador de deslocamento horizontal (ver capítulo I, figura 20-b) em intervalos de 0-10 mm. Assim, foi determinado para cada tensão normal (s_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (T), necessária para provocar a deformação contínua do solo até a ruptura do corpo de prova (LAMBE, 1951).

Com o término do ensaio, foram obtidos os dados para preencher os requisitos das equações (21) e (22).

$$\sigma = \frac{N}{a} \quad (21)$$

em que: σ = Tensão normal; N = Força normal aplicada no corpo de prova; a = área da secção transversal da amostra;

$$\tau = \frac{T}{a} \quad (22)$$

em que: τ = tensão de cisalhamento; T= força aplicada no corpo de prova (kPa); a= área da secção transversal da amostra;

O ângulo de atrito interno e o valor de coesão foram determinados com o valor da tensão de cisalhamento em cada tensão normal no final do ensaio, plotando-se um gráfico com a relação tensão cisalhante x tensão normal, onde se obteve os valores de coesão pelo intercepto da equação da reta formado no gráfico e, o ângulo de atrito interno obtido pela inclinação da reta, como também, a formação das de envoltórias de Mor-Coulomb (ver capítulo I, figura 21).

4.6 - Caracterização física do solo

As análises de caracterização física e de carbono orgânico do solo, nos diferentes sistemas de manejo, foi realizada no Laboratório de Física do Solo e no de Química do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, cujos resultados estão na tabela 5, para a profundidade de 0-0,20 m, e na tabela 6, para a profundidade de 0,20-0,40 m.

A análise de carbono orgânico do solo seguiu a metodologia adotada pela EMBRAPA (2009), cujo princípio do método é a oxidação do carbono orgânico do solo pelo dicromato de potássio e titulação com o sulfato ferroso amoniacal.

Tabela 5 - Caracterização física e carbono orgânico total do Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de manejo na profundidades de 0 – 0,20 (m)

Variáveis	Unidades	Profundidade de 0 - 0,20 m														
		Sistemas														
		Vinhaça					Torta					Mata				
		Médias	Máx	Min	DP	CV	Médias	Máx	Min	DP	CV	Médias	Máx	Min	DP	CV
Argila	(g kg ⁻¹)	369,00	394,00	334,00	30,00	8,13	324,00	354,00	294,00	25,82	7,97	480,67	494,00	474,00	11,55	2,40
Areia	(g kg ⁻¹)	618,45	647,40	592,20	30,17	4,88	608,20	673,80	552,60	49,85	8,20	444,67	456,00	424,00	17,93	4,03
Silte	(g kg ⁻¹)	12,55	18,60	4,40	5,92	47,21	67,80	93,40	32,20	27,51	40,58	74,67	102,00	52,00	25,32	33,92
Arg. disp. em água	(g kg ⁻¹)	329,00	354,00	294,00	30,00	9,12	259,00	274,00	234,00	19,15	7,39	367,33	374,00	354,00	11,50	3,14
Grau de flocculação	(%)	10,90	11,98	10,15	0,90	8,27	19,92	23,95	12,47	5,01	25,14	23,51	28,34	21,10	4,18	17,79
Dens. do solo	(g cm ⁻³)	1,73	2,04	1,54	0,22	12,62	1,58	1,76	1,45	13,00	8,90	1,17	1,25	1,08	0,08	7,14
Dens.de part.	(g cm ⁻³)	2,48	2,56	2,41	0,08	3,26	2,50	2,63	2,41	0,09	3,75	2,51	2,56	2,47	0,05	1,93
Macroporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,02	0,03	0,02	0,01	25,41	0,06	0,07	0,03	0,02	35,17	0,08	0,17	0,03	0,08	101,93
Mesoporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,04	0,05	0,03	0,01	27,79	0,06	0,07	0,04	0,01	25,67	0,06	0,06	0,05	0,01	10,80
Microporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,13	0,13	0,12	0,01	4,70	0,11	0,13	0,10	0,01	11,45	0,10	0,11	0,09	0,01	8,89
Criptorosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,17	0,19	0,15	0,02	9,87	0,20	0,23	0,18	0,02	11,07	0,32	0,35	0,28	0,04	11,20
Porosidade total	(cm ³ cm ⁻³)	0,36	0,40	0,33	0,03	7,74	0,43	0,45	0,45	0,03	5,90	0,55	0,60	0,53	6,94	6,94
Ind. de plasticidade	(g g ⁻¹)	0,11	0,12	0,10	0,01	11,14	0,10	0,17	0,02	0,06	60,50	0,20	0,21	0,19	0,01	4,73
Limite de liquidez	(g g ⁻¹)	0,28	0,31	0,25	0,02	8,82	0,35	0,40	0,30	0,04	12,41	0,55	0,56	0,54	0,01	1,60
Limite de Plasticidade	(g g ⁻¹)	0,17	0,19	0,16	0,02	9,34	0,25	0,34	0,18	0,08	32,40	0,35	0,35	0,35	0,01	0,55
DMP úmido	(g)	2,21	2,27	2,16	0,05	2,11	2,39	2,66	1,96	0,32	13,52	2,75	2,91	2,53	0,20	7,25
DMG seco	(g)	1,34	1,51	1,24	0,12	8,92	1,41	1,49	1,35	0,07	4,73	1,54	1,57	1,49	0,04	2,72
DMG úmido	(g)	1,37	1,48	1,32	0,07	5,39	1,35	1,45	1,27	0,08	5,61	1,42	1,49	1,35	0,07	4,77
DMP seco	(g)	2,38	2,82	2,10	0,31	13,07	2,64	2,83	2,48	0,16	6,16	2,97	3,05	2,84	0,11	3,84
θ _{vcc}	(cm ³ cm ⁻³)	0,24	0,28	0,22	0,02	9,36	0,27	0,30	0,26	0,02	7,80	0,40	0,41	0,40	0,01	1,85
θ _{vpmp}	(cm ³ cm ⁻³)	0,17	0,19	0,15	0,02	9,87	0,20	0,23	0,18	0,02	11,07	0,32	0,35	0,28	0,04	11,20
U (coleta)	(g g ⁻¹)	0,16	0,17	0,15	0,01	5,62	0,17	0,20	0,20	0,02	13,00	0,29	0,31	0,28	6,18	6,18
UCC(90% LP)	(g g ⁻¹)	0,15	0,17	0,14	0,01	9,34	0,22	0,31	0,31	0,07	32,40	0,31	0,32	0,31	0,55	0,55
Carb. org. total do solo	(dag kg ⁻¹)	10,42	12,00	9,23	1,16	11,17	13,23	14,46	10,77	1,74	13,16	24,21	27,69	21,54	3,16	13,05

Max= valor máximo; Min = valor mínimo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

UCC(0,90*LP) = umidade crítica de compactação correspondente a 90% do limite de plasticidade.

Tabela 6 - Caracterização física e carbono orgânico total do Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de manejo na profundidade de 0,20 – 0,40 (m)

Variáveis		Profundidade de 0,20 - 0,40 m														
		Vinhaça					Sistemas de manejo					Mata				
		Médias	Máx	Min	DP	Cv	Médias	Máx	Min	DP	Cv	Médias	Máx	Min	DP	Cv
Argila	(g kg ⁻¹)	474,00	494,00	434,00	28,28	5,97	454,00	474,00	414,40	28,28	6,23	507,33	534,00	474,00	30,55	6,02
Areia	(g kg ⁻¹)	513,55	548,40	491,00	26,41	5,14	474,75	490,20	438,00	24,41	5,14	428,53	447,80	408,00	19,93	4,65
Silte	(g kg ⁻¹)	12,45	17,60	6,40	4,76	38,25	71,25	103,00	38,60	29,33	41,16	64,13	118,00	36,20	46,66	72,76
Arg. disp. em água	(g kg ⁻¹)	439,00	454,00	414,00	19,15	4,36	379,00	394,00	374,00	0,10	2,64	360,67	374,00	334,00	23,09	6,40
Grau de flocculação	(%)	7,31	8,44	4,61	1,81	24,74	16,16	21,10	4,83	7,73	47,83	28,60	37,45	21,10	8,26	28,89
Dens. do solo	(g cm ⁻³)	1,61	1,69	1,53	0,08	4,86	1,61	1,63	1,60	0,01	0,75	1,36	1,47	1,27	0,10	7,39
Dens.de part.	(g cm ⁻³)	2,58	2,67	2,50	0,08	3,07	2,55	2,60	2,50	0,04	1,64	2,49	2,50	2,47	0,02	0,72
Macroporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,01	0,02	0,00	0,01	87,32	0,03	0,04	0,01	0,02	46,41	0,04	0,06	0,01	0,03	63,08
Mesoporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,03	0,05	0,02	0,02	58,49	0,04	0,05	0,04	0,01	12,41	0,05	0,08	0,02	0,03	60,75
Microporosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,10	0,10	0,01	0,00	3,22	0,09	0,10	0,07	0,01	15,04	0,09	0,12	0,07	0,03	28,17
Criptorosidade	(cm ³ cm ⁻³)	0,25	0,26	0,24	0,01	4,58	0,27	0,29	0,26	0,01	5,04	0,34	0,36	0,33	0,01	4,31
Porosidade total	(cm ³ cm ⁻³)	0,39	0,43	0,36	0,03	8,34	0,43	0,44	0,42	0,01	2,08	0,53	0,57	0,47	0,05	9,39
Ind. de plasticidade	(g g ⁻¹)	0,15	0,17	0,12	0,02	13,94	0,17	0,19	0,16	0,01	8,25	0,13	0,22	0,02	0,10	77,13
Limite de liquidez	(g g ⁻¹)	0,35	0,37	0,33	0,03	7,37	0,45	0,46	0,43	0,01	2,85	0,50	0,57	0,37	0,12	23,10
Limite de Plasticidade	(g g ⁻¹)	0,20	0,21	0,19	0,01	4,38	0,28	0,30	0,26	0,02	6,67	0,37	0,41	0,34	0,04	9,56
DMG úmido	(g)	1,37	1,46	1,27	0,09	6,33	1,32	1,46	1,18	0,11	8,63	1,38	1,45	1,32	0,07	4,74
DMG seco	(g)	1,48	1,55	1,40	0,07	4,90	1,48	1,51	1,44	0,03	2,12	1,36	1,40	1,31	0,04	3,29
DMP úmido	(g)	1,88	1,93	1,83	0,05	2,46	2,49	2,76	2,32	0,21	8,51	2,74	2,81	2,65	0,08	3,01
DMP seco	(g)	2,83	3,00	2,60	0,18	6,32	2,81	2,88	2,70	0,08	2,90	2,45	2,55	2,31	0,13	5,13
θvcc	(cm ³ cm ⁻³)	0,32	0,33	0,30	0,01	3,64	0,33	0,34	0,32	0,01	3,36	0,40	0,42	0,38	0,02	5,52
θvpmp	(cm ³ cm ⁻³)	0,25	0,26	0,24	0,01	4,58	0,27	0,29	0,26	0,01	5,04	0,34	0,36	0,33	0,01	4,31
U (coleta)	(g g ⁻¹)	0,20	0,20	0,19	0,01	4,05	0,21	0,22	0,20	0,01	2,92	0,27	0,27	0,26	0,01	3,36
Ucritcomp.(90% LP)	(g g ⁻¹)	0,18	0,19	0,17	0,01	4,38	0,25	0,27	0,23	0,02	6,67	0,33	0,37	0,31	0,03	9,56
Carb. org. total do solo	(dag kg ⁻¹)	8,18	10,15	6,77	1,48	18,10	9,15	10,77	6,46	1,90	20,79	25,23	27,38	23,69	1,92	7,62

Max= valor máximo; Min = valor mínimo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

UCC(0,90*LP) = umidade crítica de compactação correspondente a 90% do limite de plasticidade.

4.7- Análises estatísticas

A estatística multivariada compreende um conjunto de técnicas que analisam simultaneamente uma gama de variáveis que caracterizam os objetos ou indivíduos de uma amostra (Hair et al., 2013). Desse modo, para analisar de maneira conjunta um grande número de variáveis e dar a elas um significado objetivo, a análise multivariada apresenta certas vantagens em relação a univariada (Johnson & Wichern, 1998). Algumas das técnicas usadas análise multivariada de dados compreende técnicas de avaliação da interdependência como análise de componentes principais (ACP), agrupamentos (AG), fatorial (AF), entre outras (Niel, 2002).

A técnica para análise de componentes principais procura explicar a estrutura de variâncias-covariâncias por meio de combinações lineares das variáveis originais, cujo objetivo é reduzir os dados e colocá-los numa forma mais adequada para análise por meio de suas tendências para facilitar assim a interpretação (Johnson & Wichern, 1998).

A análise de agrupamento é realizada com base na similaridade e dissimilaridade agrupando objetos (variáveis) conforme as suas características, verificando se um indivíduo “A” é mais semelhante com “B” do que com “C” (Ferreira, 1998).

Os dados também foram submetidos à verificação e constatação da distribuição normal e homecedasticidade, premissas da análise de variância. Posteriormente foi realizada a análise de variância (ANOVA) com as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade por meio do programa estatístico SAS, versão *student 2.0*. Foram também realizadas análises de correlação e regressão desenvolvidas entre atributos físicos e mecânicos dos solos e manejos estudados.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Análise multivariada do comportamento físico-mecânico de um Argissolo sob diferentes manejos da cana-de-açúcar

5.1.1 - Análise de componentes principais (ACP)

Na tabela 7 observa-se inicialmente que foram formados dois grupos de variáveis nas três componentes: um grupo com peso dos autovalores, maiores que maior que 0,70; e outro com peso menor que 0,70. Logo, as variáveis do grupo com menores peso dos autovalores nas componentes principais devem ser descartada conforme o critério de Kaiser (autovalor < 0,70), por apresentarem baixo peso de contribuição nas pressões de précompressão.

Após uma segunda análise de ACP, com as variáveis que permanecerem nas componentes, observa-se que apenas duas componentes, C1 e C2 possuem autovalor maior que 1. Logo, estas componentes devem ser selecionados para análise com a componente 1, agrupando o maior número de variáveis e, a componente C2 agrupando as variáveis de densidade de partículas e mesoporosidade. A C1 e a C2 possuem uma variância acumulada de 84,85%, indicando que as variáveis presentes nessas duas componentes estão exercendo grande peso de contribuição nas pressões de précompressão dos sistemas de manejo na profundidade de 0-0,20 m.

Pode-se destacar ainda que, após o critério de eliminação, a componente 1 engloba o conjunto de variáveis mais importantes no estudo, uma vez que, a C1 apresenta o maior autovalor (12,73) e possui representação de 74,91% de variância total da influência dessas variáveis na pressão de précompressão.

Tabela 7 - Análises de componentes principais das variáveis físicas e carbono orgânico do solo na profundidade 0 – 0,20 m.***** Variáveis eliminadas.* Variável em estudo

Variáveis	Componentes principais					
	Antes da eliminação			Após da eliminação		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Umidade volumétrica	0,00	0,09	0,05	*****	*****	*****
Densidade do solo	0,93	0,10	-0,09	0,94	0,19	-0,11
Índice compressão	-0,91	-0,10	0,08	-0,92	-0,18	0,11
Densid. De partículas	-0,15	-0,83	0,42	-0,15	-0,78	-0,55
Umidade de campo	-0,97	0,09	-0,12	-0,96	0,09	0,18
Argila	-0,87	-0,14	-0,39	-0,87	0,11	0,08
Areia	0,97	-0,02	0,15	0,97	-0,11	0,00
Silte	-0,66	0,37	0,48	*****	0,37	*****
Argila. Disp. em água	-0,65	-0,15	-0,65	*****	*****	*****
Limite de liquidez	-0,99	0,06	0,04	-0,99	0,02	0,03
Limite de plasticidade	-0,89	0,31	0,09	-0,89	0,19	0,02
Carbono orgânico do solo	-0,92	0,07	0,06	-0,93	-0,09	0,29
DMP seco	-0,86	0,16	-0,03	-0,86	0,23	-0,17
DMG seco	-0,85	0,18	-0,14	-0,85	0,32	-0,17
DMP úmido	-0,85	-0,22	0,00	-0,86	-0,04	-0,35
DMG umido	-0,46	-0,64	0,02	*****	*****	*****
Macroporosidade	-0,46	0,59	0,37	*****	*****	*****
Mesoporosidade	-0,08	-0,19	0,78	-0,10	-0,86	0,38
Microporosidade	0,84	0,02	-0,31	0,82	0,11	0,23
Criptoporosidade	-0,96	-0,13	0,00	-0,97	-0,09	-0,01
Capacidade de campo	-0,98	-0,02	-0,03	-0,98	-0,03	0,10
Ponto de Murcha permanente	-0,96	-0,13	0,00	-0,97	-0,09	-0,01
*Pressão de pré-compressão	0,76	-0,01	0,16	0,76	-0,04	-0,22
Autovalor	13,97	1,94	1,90	12,73	1,69	0,84
Autovalor Acumulado	13,97	15,90	17,80	12,73	14,42	15,26
Variância total (%)	63,49	8,81	8,63	74,91	9,91	4,95
Acumulado (%)	63,49	72,29	80,92	74,91	84,82	89,78

Na tabela 8, constatou-se que antes da eliminação foram formados dois grupos de variáveis nas três componentes principais, as quais possuem autovalores maiores que 1. A componente 1 (C1), possui um maior número de variáveis com os pesos dos autovalores maiores que 0,70. Após a eliminação das variáveis com autovalores menores que 0,70, observa-se o segundo teste da ACP com os resultados das variáveis que permanecerem nas componentes após eliminação, nota-se apenas a formação de duas componentes, C1 e C2 com autovalores maiores que 1. Neste caso, a C1 é a mais importante, porque apresenta o maior autovalor (11,26).

As variáveis presentes na C1 são: umidade volumétrica, densidade do solo e de partículas, umidade de campo/coleta, argila dispersa em água, limite de liquidez, carbono orgânico total do solo, diâmetro médio geométrico seco, diâmetro médio

ponderado úmido e seco, criptoporosidade, umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. A C2 apresenta um autovalor de 2,09, sendo representada pelo diâmetro médio geométrico úmido e microporosidade.

As C1 e C2 possuem uma variância acumulada de 83,44%, indicando que as variáveis presentes nas duas componente estão exercendo grande peso de contribuição na pressão de précompressão.

Tabela 8 - Análises de componentes principais das variáveis físicas e carbono orgânico do solo na profundidade 0,20 – 0,40 m. ***** Variáveis eliminada

Variáveis	Componentes principais					
	Antes da eliminação			Após da eliminação		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Umidade volumétrica	-0,12	-0,07	-0,07	0,92	-0,20	0,08
Densidade do solo	0,91	0,27	0,02	-0,92	0,20	-0,09
Índice compressão	-0,92	-0,23	0,08	0,72	0,19	0,36
Densid. De partículas	0,73	-0,18	-0,14	-0,98	-0,02	0,03
Umidade de campo	-0,97	-0,07	-0,17	0,88	0,04	-0,25
Argila	-0,57	-0,44	-0,56	*****	*****	*****
Areia	0,89	-0,06	-0,08	0,88	0,04	-0,25
Silte	-0,45	0,47	0,60	*****	*****	*****
Argila. Disp. em água	0,74	-0,30	0,06	0,73	0,27	-0,53
Limite de liquidez	-0,70	0,46	-0,41	-0,94	-0,23	0,22
Limite de plasticidade	-0,94	0,18	-0,15	*****	*****	*****
Carbono orgânico do solo	-0,94	-0,22	-0,06	-0,95	0,14	-0,06
DMP seco	0,87	0,33	-0,15	0,88	-0,30	0,24
DMG seco	0,81	0,42	-0,13	0,83	-0,39	0,24
DMP úmido	-0,85	0,40	0,17	-0,82	-0,33	0,35
DMG umido	-0,11	-0,72	0,35	-0,13	0,83	0,29
Macroporosidade	-0,65	0,32	0,57	*****	*****	*****
Mesoporosidade	-0,52	0,01	0,63	*****	*****	*****
Microporosidade	0,21	-0,77	0,35	0,17	0,88	0,21
Criptoporosidade	-0,96	-0,01	-0,20	-0,97	-0,10	-0,11
Capacidade de campo	-0,94	-0,14	-0,17	-0,96	0,04	-0,05
Ponto de Murcha permanente	-0,96	-0,01	-0,20	-0,97	-0,10	-0,11
*Pressão de pré-compressão	-0,08	0,06	-0,02	-0,09	0,00	0,39
Autovalor	12,90	2,63	2,10	11,26	2,09	0,93
Autovalor Acumulado	12,90	15,53	17,62	11,26	13,35	14,28
Variância total (%)	58,62	11,96	9,53	70,34	13,09	5,79
Acumulado (%)	58,62	70,58	80,11	70,34	83,44	89,22

O outro aspecto da ACP é realizar a sobreposição das componentes 1 e 2, formando uma nuvem de variáveis por meio de correlações. Desse modo, é possível identificar visualmente quais das variáveis selecionadas, após eliminação, estão mais relacionadas com as pressões de précompressão do solo nos sistemas de manejos em estudo.

Na figura 5, observa-se que as variáveis estão muito próximas da linha do círculo unitário, indicando uma forte correlação com a pressão de précompressão.

Na profundidade de 0-0,20 m (figura 5-a), a variável da fração areia está situada no quadrante II; e assim, pode-se inferir que a pressão de précompressão está fortemente correlacionada com a granulometria da fração areia na profundidade em estudo, pois está situada no mesmo quadrante, quando comparadas com as outras variáveis que estão nos quadrantes opostos I, III e IV.

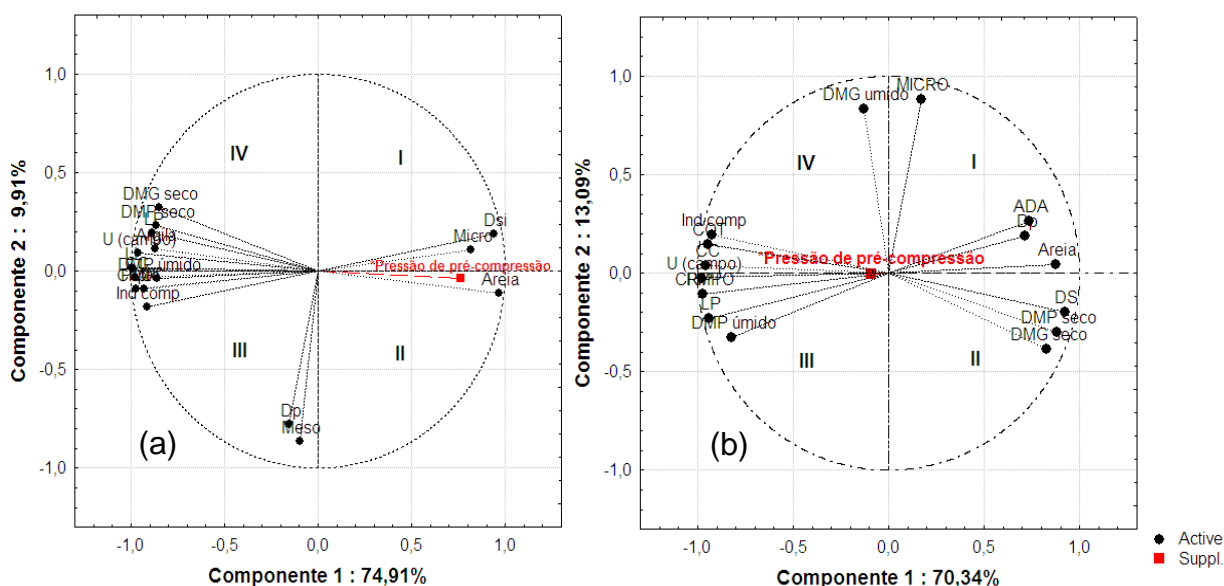


Figura 5 - Gráfico da distribuição das variáveis no círculo de correlações nas profundidades de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b).

Na profundidade de 0,20 – 0,40 m (figura 5-b) constata-se que a pressão de précompressão está situada no centro dos quadrantes III e IV, indicando uma maior correlação com as variáveis situadas nesses quadrantes, as quais são: o índice de compressibilidade, carbono orgânico total do solo, umidade campo (coleta), limite de plasticidade, criptoporosidade, umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

5.1.2 - Análise de agrupamentos principais

Na figura 6, foram formados três grupos de indivíduos com características homogêneas dentro dos grupos e heterogêneas fora. Na profundidade de 0-0,20 m (figura 6a) a mata nativa formou o grupo “G1”, isolado em relação aos sistemas de manejo, os quais apresentaram nos grupos “G2” e “G3” indivíduos com sistemas de

manejo diferenciados, refletindo provavelmente maiores perturbações ou modificações nos atributos físicos do solo em função das práticas agrícolas adotadas. Na profundidade 0,20 – 0,40 m (figura 6b), os sistemas de manejo com mata, vinhaça e torta de filtro formaram grupos com indivíduos homogêneos dentro de cada grupo.

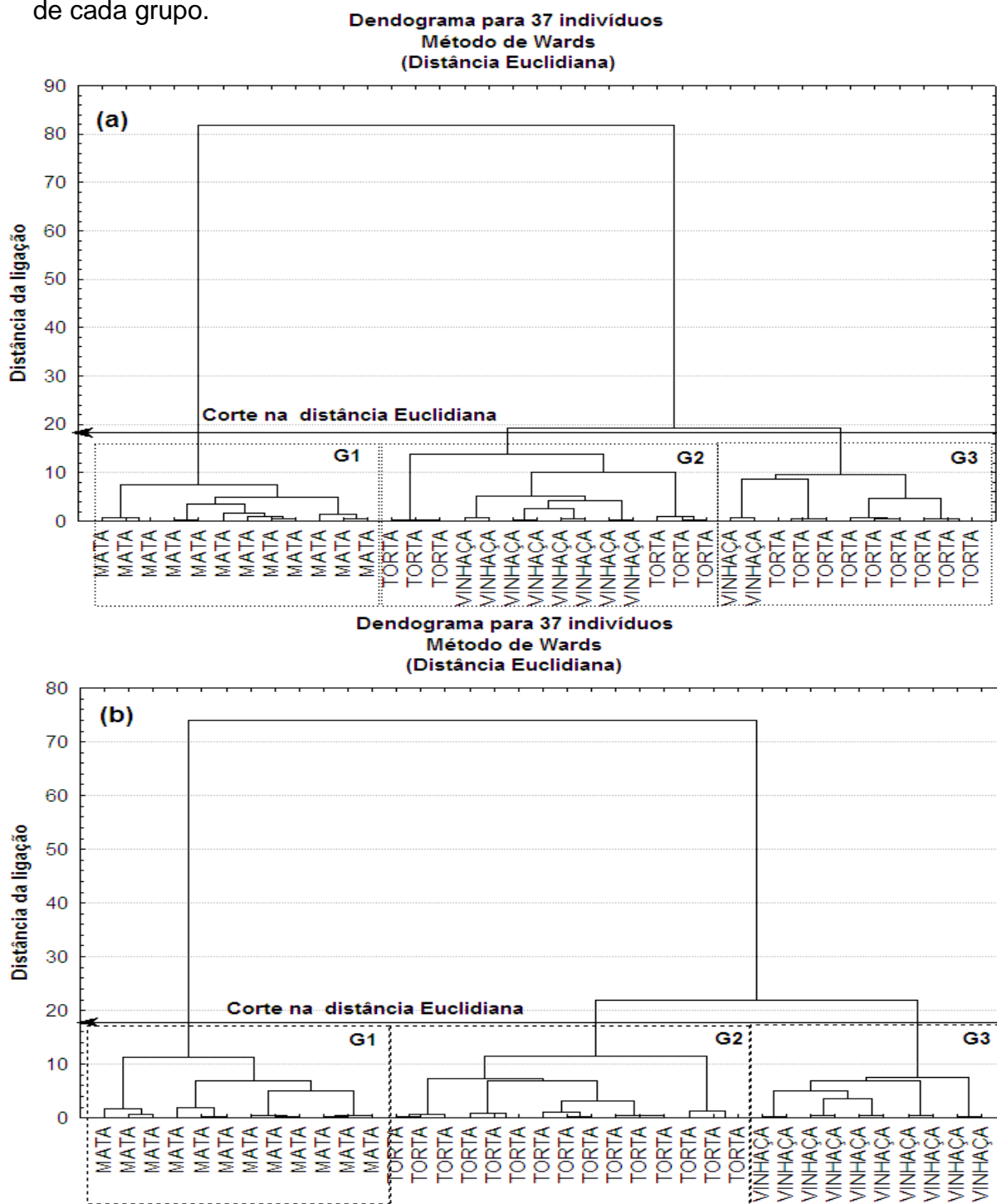


Figura 6 - Dendogramas representando os grupos formados pelos sistemas de manejo nas profundidades de 0 – 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).

5.1.3. - Análise discriminante

Na figura 7 tem-se a validação dos grupos formados na análise de agrupamento pela análise discriminante. Observa-se que nas figuras 7(a) e 7(b), que todos os indivíduos foram agrupados corretamente pela AG, constatado pelo percentual de acerto de 100% para ambas as profundidades.

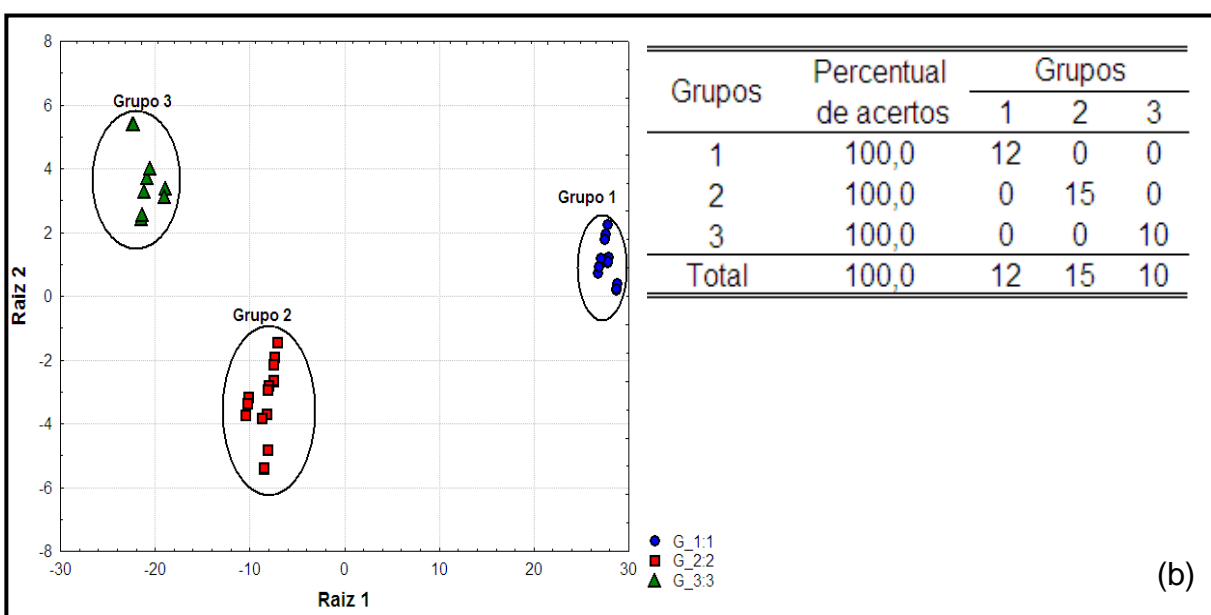
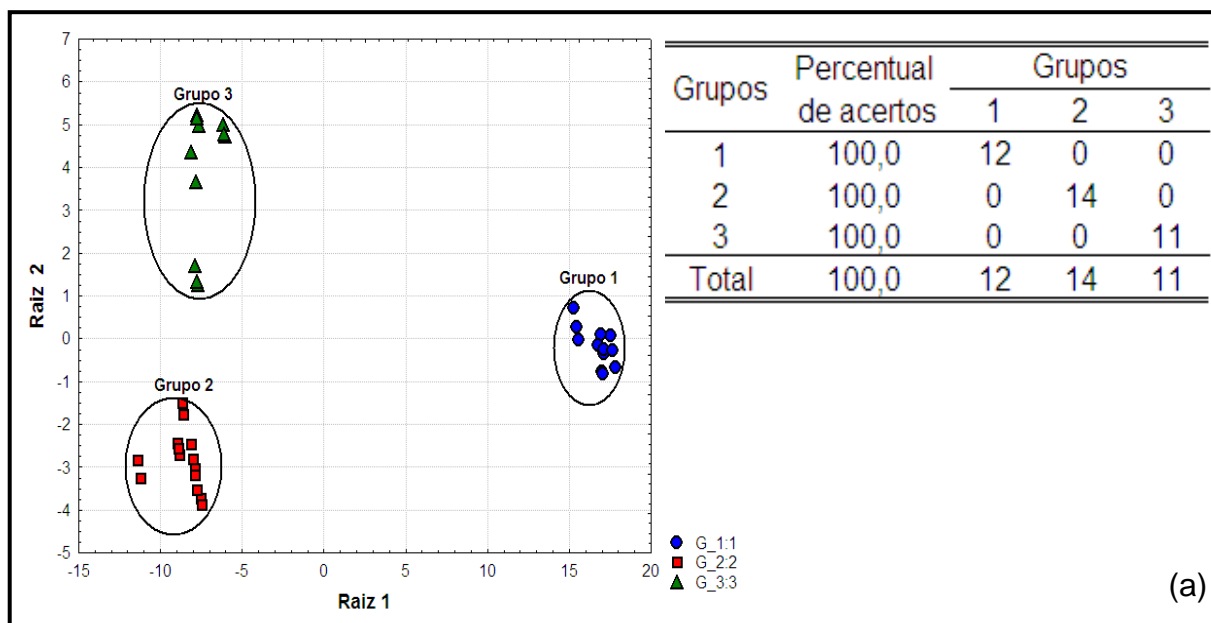


Figura 7 - Análise discriminante para os sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b) em função dos grupos formados na análise de agrupamentos.

5.2 - Curva de retenção de água no solo dos sistemas de manejo e umidades usadas nos ensaios de cisalhamento e compressibilidade do solo

Na figura 8, tem-se as curvas de retenção de água no solo dos sistemas de manejo, das quais, foram estabelecidos os níveis de umidade a serem usados em cada sistema de manejo cultivados com cana-de-açúcar e mata nativa. Procurou-se englobar os níveis de umidade que compreendessem a maior quantidade de sistemas possíveis. Sendo escolhidas as umidades de 0,32, 0,36 e 0,42 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$.

Observa-se que a saída de água e conseqüentemente entrada de ar, dos sistemas de mata nativa e torta de filtro está ocorrendo em tensões de sucção menores 1,0 kPa. Já no o sistemas com aplicação de vinhaça, em ambas as profundidade apresenta a entrada de ar está ocorrendo apartir a partir de 1,0 kPa desse modo justificando os altos níveis de umidade a seres usados nas amostras.

O ponto de inflexão na curva de retenção de água do solo, corresponde ao valor de tensão na qual ocorre à saída de água e conseqüentemente à entrada de ar. Comparando-se os pontos de inflexão (α), nas duas profundidades (figura 8) da mata nativa com os sistemas de manejo, nota-se uma variação bastante expressiva entre eles. No sistema com mata nativa, constata-se que, o ponto de inflexão está em um potencial mátrico menos negativo, fato ocasionado possivelmente por um maior número de macroporos (tabela 5 e 6) facilitando assim, a fácil drenagem. No entanto, nas maiores tensões, a mata nativa apresenta maiores microporosidade e conteúdo de carbono orgânico total do solo, o que possibilita maiores retenções de água a altas tensões.

Os valores de N, que pode representar um índice de continuidade de poros, ao se analisar na profundidade 0-0,20 (m), tem-se em geral, nos sistemas com “torta de filtro” e “vinhaça” os poros apresentam uma descontinuidade em relação à área sob mata nativa. A descontinuidade no tamanho dos poros pode ter sido acarretada pelo tipo de manejo adotado, como também no preparo periódico do solo, pois, segundo Landefeld et al. (2004), o manejo inadequada so solo, promove alterações físicas no solo, como a redução da continuidade de poros, devido à obstrução e fragmentação destes durante as operações agrícolas, comprometendo a funcionalidade do sistema poroso do solo.

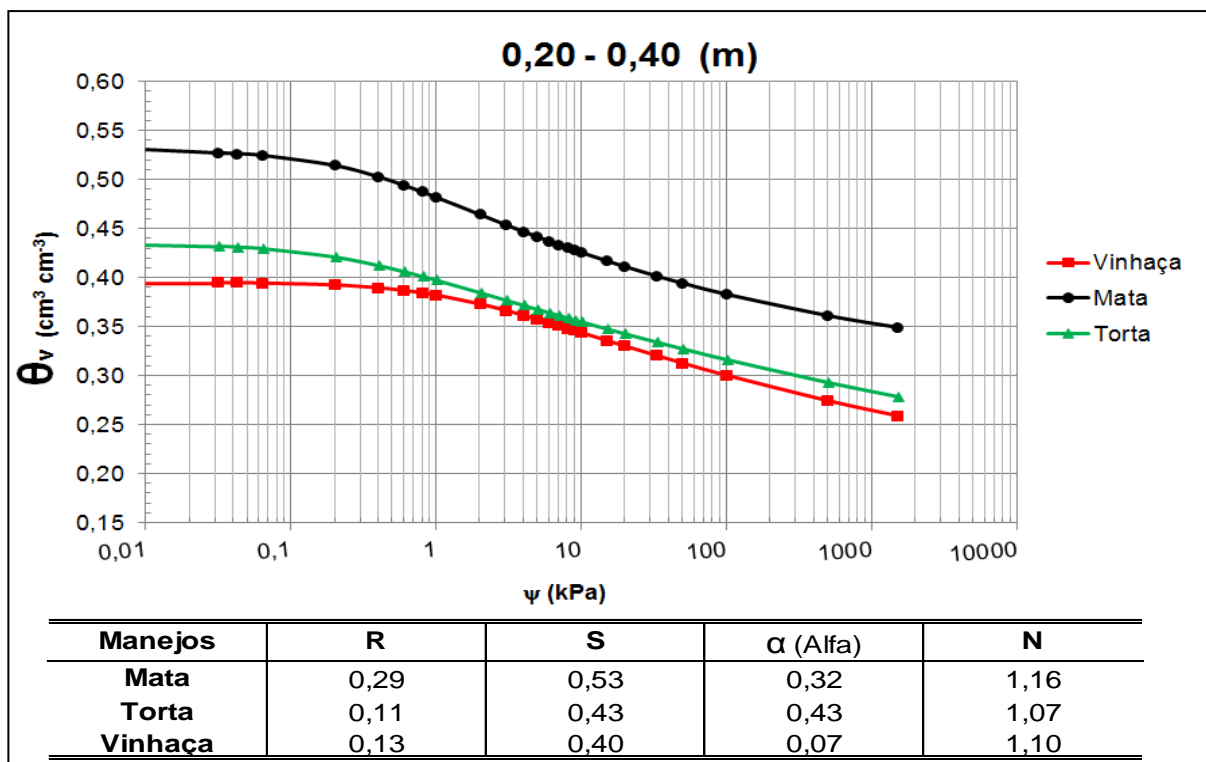
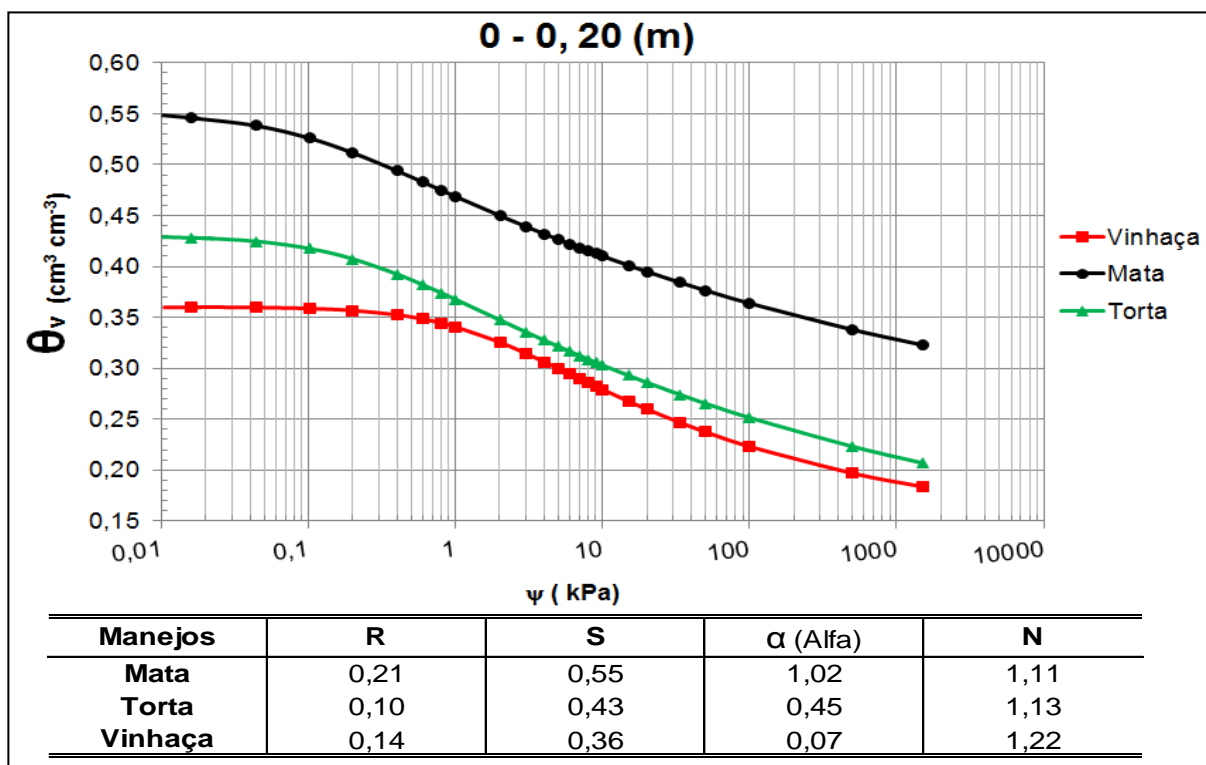


Figura 8 - Curva característicade retenção de água no “solo” dos sistemas de manejo do Argissolo nas profundidades de 0-0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).

5.3 – Reações de resistência ao cisalhamento direto do Argissolo sob os diferentes manejos da cana-de-açúcar

Na tabela 9, observa-se que, os valores de coesão variaram de 61,23 a 2,06 kPa, havendo diferenças significativas na coesão do sistema com mata nativa em relação aos sistemas cultivados com cana-de-açúcar, os quais, não apresentaram diferenças significativas entre si no mesmo nível de umidade. Com a redução de umidade volumétrica, houve aumento significativo nos valores de coesão no solo sob mata nativa, aumentando de 22,50 para 61,23 kPa. O mesmo não ocorrendo quando houve aplicação de torta e vinhaça.

O aumento significativo na coesão do solo de mata em relação aos solos cultivados deu-se por dois fatores. O primeiro, corresponde a um aumento do conteúdo de carbono orgânico do solo, proveniente ou provavelmente vindo dos resíduos vegetais, os quais, também podem aumentar a coesão do solo, por meio do aumento da agregação entre as partículas, conforme verificado por Horn & Lebert (1994). O segundo, corresponde a menor distância entre as partículas do solo geradas com a diminuição da umidade, aumentando assim a força de atração entre elas conforme comentado por Fredlund & Rahardjo (1993) e, demonstrado por Mitchell (1993). Al-Shayea (2001), Arvidsson et al. (2001), Boeni (2000), Pires (2007), Silva e Cabeda (2005) e Silva et al (2004), também observaram aumentos expressivos nos valores de coesão com a redução do teor de água no solo, evidenciando o efeito da umidade na coesão.

Tabela 9 - Valores coesão de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo na cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0 – 0,20 m

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Sistemas		
	Mata	Torta	Vinhaça
	Coesão (kPa)		
0,32	61,23 Aa	11,50 Ab	9,51 Ab
0,36	31,19 ABa	5,40 Ab	7,40 Ab
0,42	22,58 Ba	2,06 Ab	-----
Cot (dag kg ⁻¹)	24,2 a	13,22 b	10,42 b

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Com relação ao ângulo de atrito interno, observa-se na tabela 10 que o ângulo variou de 41,24 à 31,35°. Não houve diferenças significativas do ângulo de atrito interno entre os sistemas de manejo do solo no mesmo nível de umidade, como também nos diferentes níveis. O alto conteúdo de água no solo, durante os ensaios, pode ter contribuição para essa não diferenciação, uma vez que, o efeito do conteúdo de água sobre o ângulo de atrito interno está associado ao efeito lubrificante que a água exerce quando recobre as partículas sólidas. Assim, a medida que o conteúdo de água no solo vai diminuindo, os filmes de água sobre as partículas vão se desfazendo, reduzindo o seu efeito lubrificante e, portanto, aumentando o atrito interno entre as partículas (Braida et al. , 2007). Os valores determinados do ângulo de atrito interno na camada de 0-0,20m nos sistemas de manejo com torta e vinhaça no argissolo, estão em concordância com os valores de ângulo de atrito interno em outras pesquisas nessa classe de solo conforme os estudos de Braida et al. (2007); Machado, (2001); Bastos, (2008).

Tabela 10 - Valores do ângulo de atrito interno de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido à diferentes sistemas de manejo na cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0 – 0,20 m. ---- Umidade superior à saturação para o tratamento

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Sistemas		
	Mata	Torta	Vinhaça
Ângulo de atrito interno (graus)			
0,32	40,40 Aa	35,76 Aa	31,35 Aa
0,36	41,24 Aa	38,36 Aa	36,17 Aa
0,42	41,23 Aa	39,81 Aa	-----

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

5.3.1 - Envoltórias de resistência do Argissolo submetido aos sistemas de manejo

As envoltórias foram obtidas pela média das três repetições das quatro tensões normais (50, 100, 150 e 200 kPa) e suas respectivas tensões cisalhantes. Observa-se bons ajustes na representatividade das envoltórias, determinados pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) superiores à 0,96 para os três sistemas de manejo nos níveis de umidade em estudo.

As envoltórias de resistência ao cisalhamento para todas as tensões estudadas apresentaram inclinação constante ao longo de toda a faixa de pressões normais utilizadas. Observa-se que o sistema de mata (figura 9-a) apresentou maiores coesões em todos os níveis de umidade em relação aos sistemas de manejo com torta de filtro (figura 9-b) e vinhaça (figura 9-c) por apresentar maior inclinação da reta. Evidenciando assim, o efeito positivo da matéria orgânica no aumento da resistência do solo ao cisalhamento. Na análise das envoltórias de Morh, observa-se que em todas as umidades houve ruptura na maior parte das tensões normais aplicadas, conforme constata-se no tangenciamento dos círculos de Morh nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, conforme comentado por Pinto (2000).

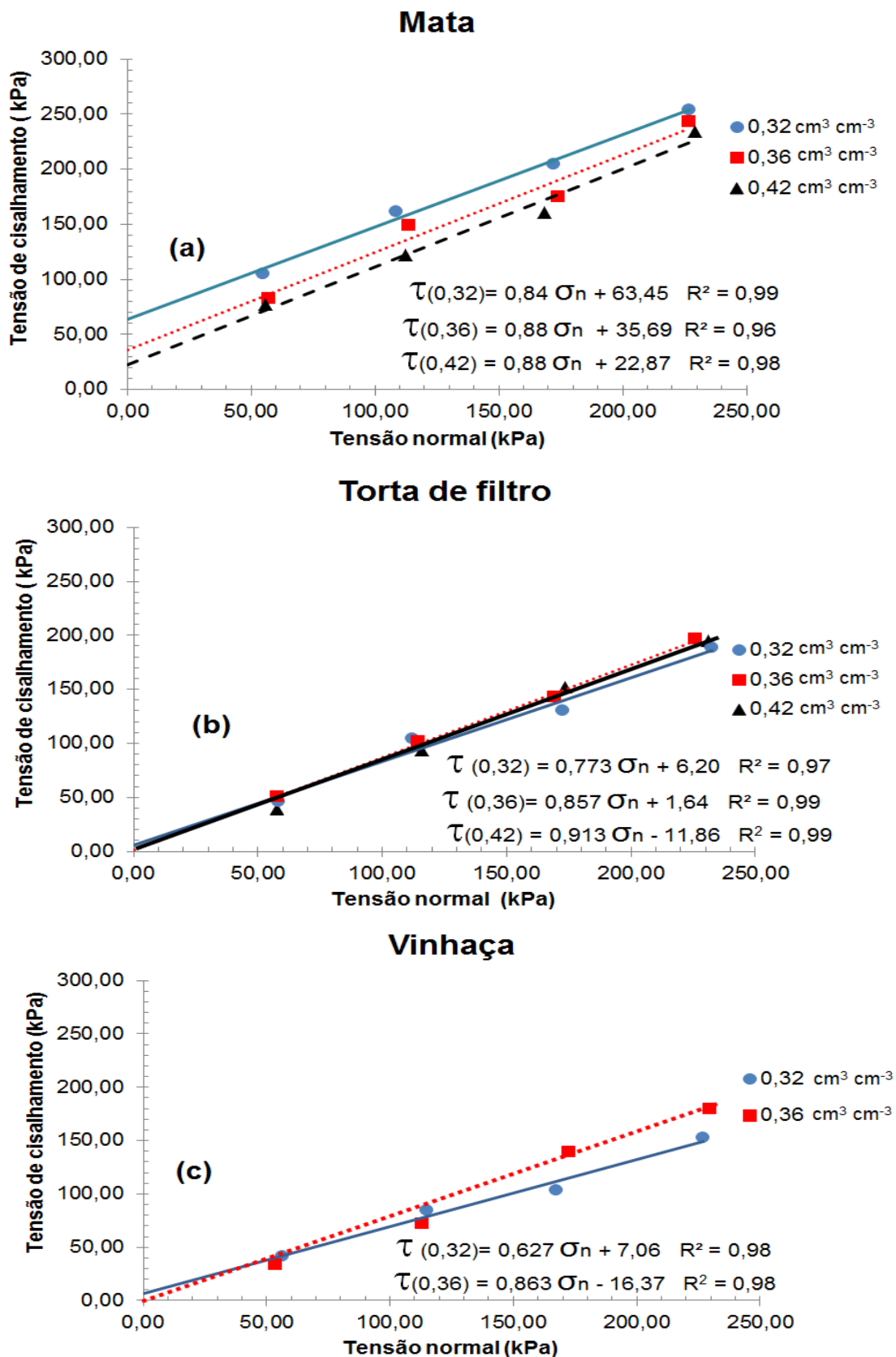


Figura 9 - Envoltórias de resistência do Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo (a) mata nativa, (b) torta de filtro e (c) vinhaça em três níveis de umidade.

5.3.2 - Tensões de cisalhamento e processos de deformações

Nas figuras 10 e 11, têm-se as tensões de cisalhamento com a aplicação das tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa em cada sistema de manejo nos três níveis de umidade volumétrica. As tensões de cisalhamento foram obtidas pelas médias das três melhores repetições das tensões normais e suas respectivas tensões cisalhantes nos três níveis de umidade. Observa-se que a mata nativa apresenta maiores valores de resistência ao cisalhamento quando comparado com sistema sob torta de filtro, como também, a presença da tensão de pico ($\cong 110$ kPa) na umidade de $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$, caracterizando a ruptura para essas condições.

O sistema com torta de filtro apresentou maiores resistência ao cisalhamento quando comparado com o sistema de vinhaça. Essa maior resistência pode estar ligada a presença de fibras celulósicas proveniente da torta de filtro, uma vez que, segundo Gao & Zhau (2013), a resistência ao cisalhamento de solos com a presença de fibras é devido a dois fatores: um inerente às propriedades do solo; e outro, inerente à própria fibra devido a sua resistência tênsil.

Segundo Cristelo et al.(2015), devido a natureza da interação fibra-solo, a resposta ao cisalhamento é fortemente influenciada pela inclusão de fibras na matriz do solo, onde as partículas do solo transmitem os esforços normais e cisalhantes para a superfície da fibra, que é então esticada até a sua resistência à ruptura, para só então as partículas serem totalmente mobilizadas e, desse modo a fibra contribui para um aumento da resistência ao cisalhamento. Estudos na literatura utilizando incorporação de fibras orgânicas na melhoria da resistência ao cisalhamento de solos podem ser vistos em Prabakar & Sridhar, 2002; Mohamed, 2013; Consoli et al.1998; Gray & Ohashi,1983.

Na figura 12 e 13, têm-se os processos de deformações ocorridos durante os ensaios de cisalhamento direto. Observa-se que o processo da expansão teve apenas uma ocorrência quando comparado com o processo da compressão, o qual dominou os ensaios. A ocorrência do processo de expansão do solo de mata na tensão normal de 50 kPa com umidade à $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi devido a forma de encaixamento dos grãos entre as partículas (imbricamento), causando necessariamente uma expansão volumétrica durante o cisalhamento, como também, segundo Schellmann et al. (2013), pode representar a ocorrência da máxima tensão de pico cisalhante, conforme constatado no presente estudo.

Já nas amostras que, houve o processo de compressão, este processo é um reflexo do aumento da tensão normal nas amostras, diminuindo assim o efeito da expansão. Segundo Gerscovich (2010), os processos de expansão e compressão durante os ensaios de cisalhamento dependem das condições iniciais das amostras, como por exemplo, o estado de compactação inicial do solo.

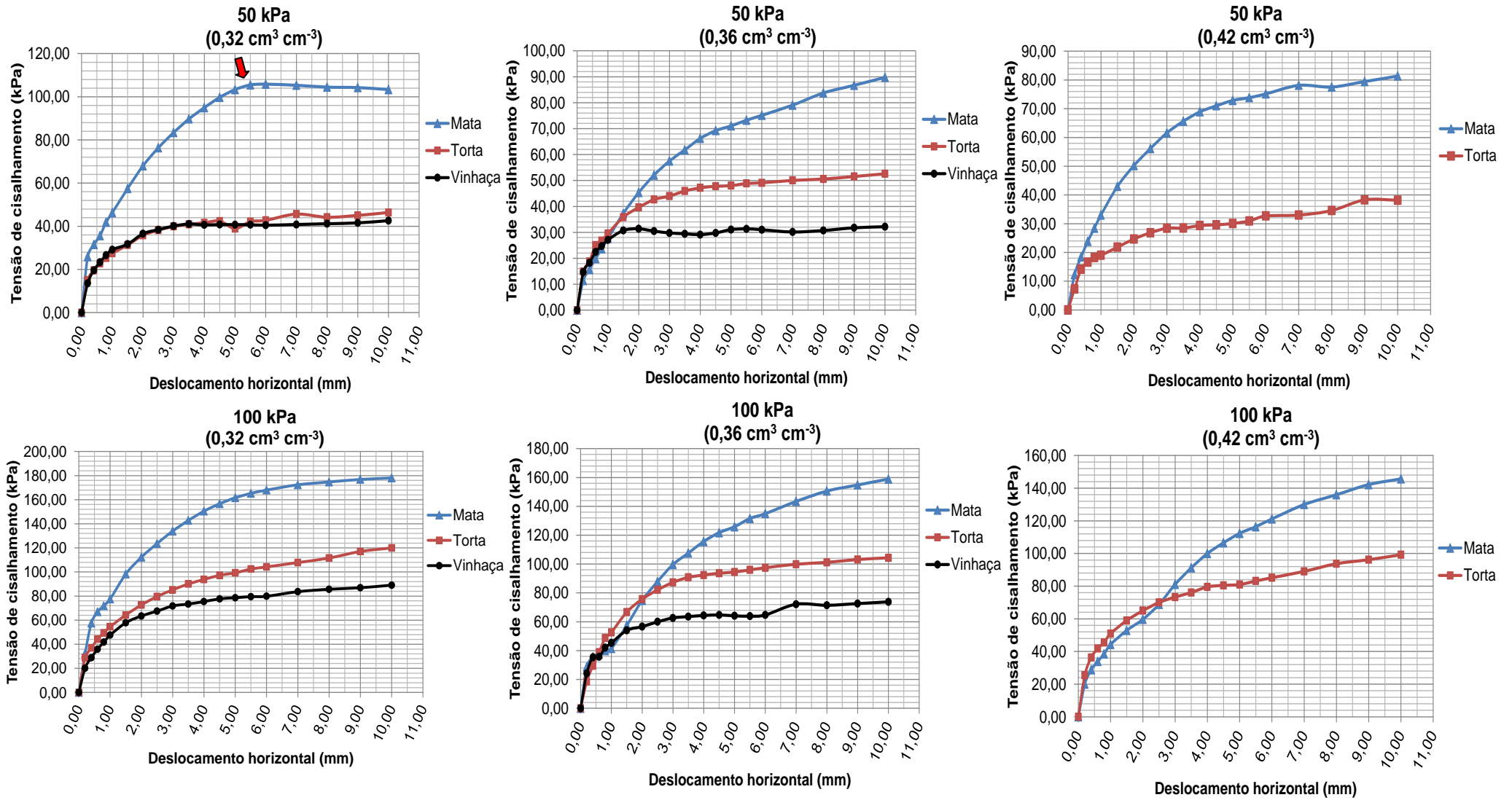


Figura 10 - Tensão de cisalhamento nas tensões normais de 50 e 100 kPa em função da umidade volumétrica do solo.

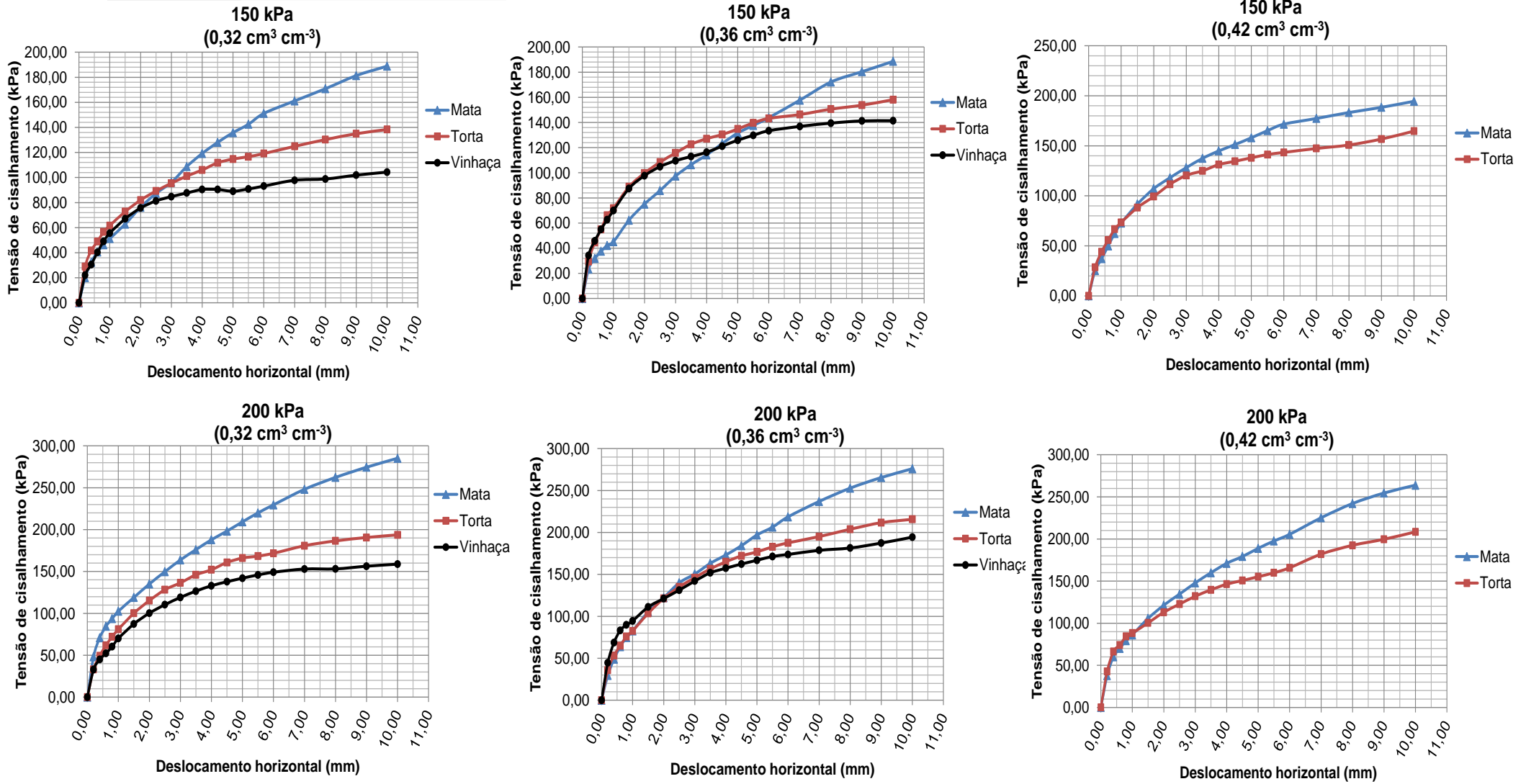


Figura 11 - Tensão de cisalhamento nas tensões normais de 150 e 200 kPa em função da umidade volumétrica do solo.

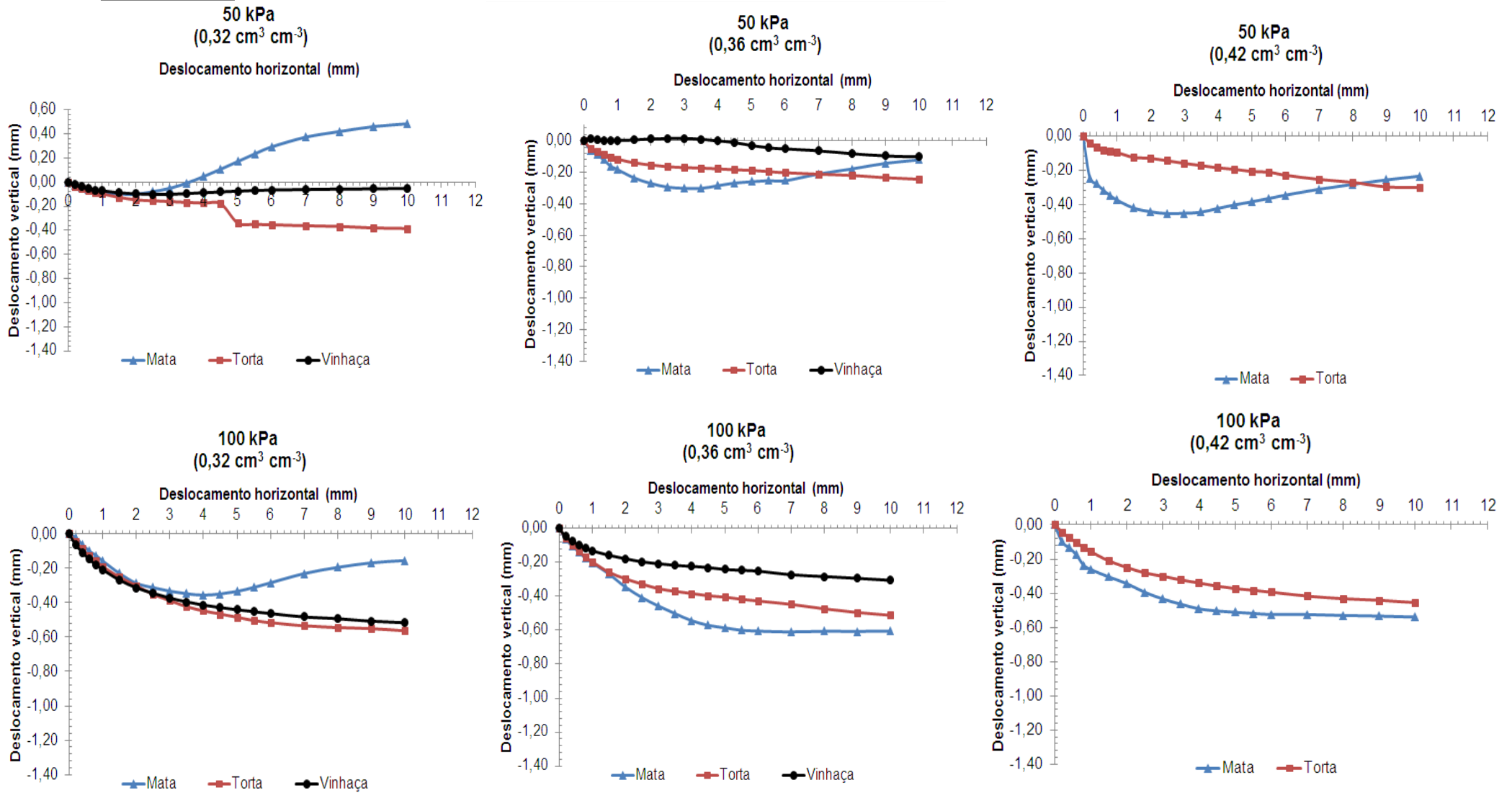


Figura 12 - Processos de deformações horizontais e verticais nas tensões de 50 e 100 kPa nos níveis de umidade em estudo.

Souza, W. L. S.- Comportamento físico-mecânico de dois solos cultivados com cana-de-açúcar

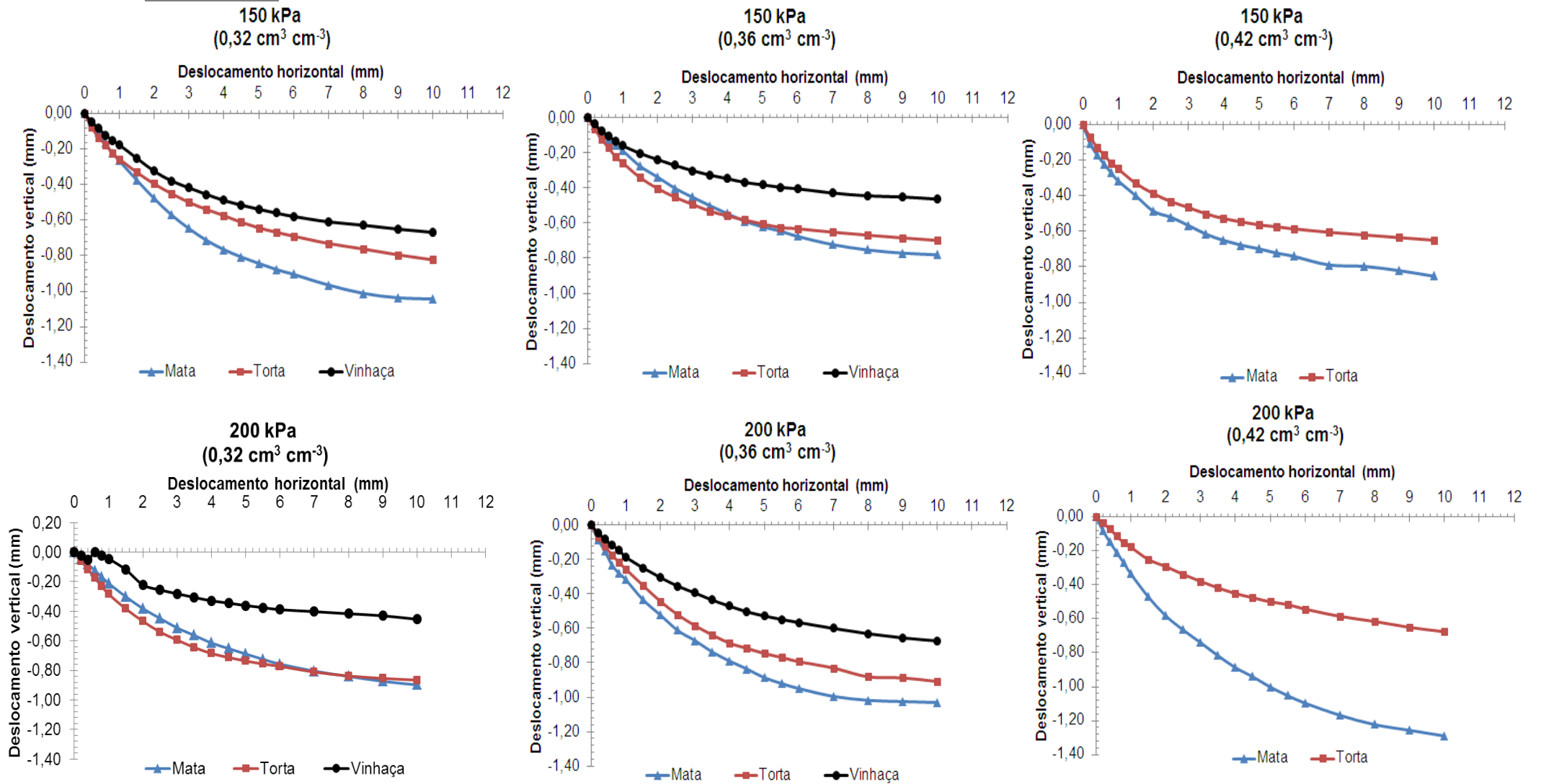


Figura 13 - Processos de deformações horizontais e verticais nas tensões de 50 e 100 kPa nos níveis de umidade em estudo.

5.4 - Pressões de précompressão (σ_p) e relações de predição

A tabela 11 constam os valores da pressão de précompressão para os sistemas de manejo em função da umidade volumétrica nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Em ambas as profundidades, os valores de pressão de précompressão conforme a classificação estabelecida por Horn & Fleige (2003), podem ser considerados baixos à muito baixos, em todos os sistemas de manejo.

Para a camada de 0 – 0,20 m, a pressão de précompressão variou de 39,03 à 14,22 kPa. Não houve diferenças significativas para os três níveis de umidade no mesmo sistema de manejo. No entanto, para a mesma umidade, observa-se diferenças significativas nas médias das pressões de précompressão do sistema com mata em relação aos sistemas de manejo com aplicação de torta de filtro e vinhaça.

Na profundidade ou camada de 0,20 – 0,40 m a pressão de précompressão variou de 26 – 41,28 kPa, não havendo diferenças significativas entre a pressão de précompressão dos sistemas de manejo em estudo, como também em relação aos níveis de umidade volumétrica. Desse modo, o fator umidade do solo não foi significativo na avaliação da tensão de précompressão do solo nos manejos e profundidades estudadas. Silva et al. (2002), também não encontraram diferenças significativas nas pressões de précompressão Argissolo Vermelho-Amarelo nas mesmas faixas de umidade usada neste estudo.

As menores pressões de précompressão nos sistemas com torta e vinhaça, demonstram o efeito da aplicação desses resíduos no processo de dissipação das pressões aplicadas ao solo. Desse modo, durante a compressão, os resíduos orgânicos fibrosos da torta de filtro e da vinhaça deformam-se, enquanto ocorre o processo da compressão (deformação) e parte dessa energia de compressão é absorvida por esses resíduos até a sua deformação total, para só então, a energia restante não ser mais dissipada pelos resíduos, sendo então, transmitida ao solo, conforme comentado por Braida (2004).

Além dos resíduos atuando na dissipação das pressões de précompressão, a água também pode ter contribuído nesse processo, uma vez que os níveis de umidade volumétrica usadas nos ensaios foram estabelecidos conforme a curva de retenção de água no solo (figura 8) com isso, atuando no processo de dissipação da energia de précompressão, conforme comentado por Kondo e Dias Júnior (1999).

O processo de dissipação da pressão de compressão é constatado nos valores de densidades do solo normalizadas (figura 14 e 15), cujo objetivo é eliminar ou reduzir as diferenças de densidade inicial do solo, onde constata-se um comportamento mais acentuado com aplicação das pressões em todas as umidades dos sistemas sob o cultivo agrícola em estudo.

Tabela 11 - Valores médios das pressões de précompressão (σ_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas.

Umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Sistemas de manejo		
	Mata	Torta	Vinhaça
Camada 0 - 0,20 (m)			
0,32	35,50 Aa	18,82 Ab	17,80 Ab
0,36	30,50 Aa	14,22 Ab	19,14 Ab
0,42	39,03 Aa	14,56 Ab	----
CV (%)	20,13	33,26	26,81
Camada 0,20 - 0,40 (m)			
0,32	31,83 Aa	29,40 Aa	41,28 Aa
0,36	39,58 Aa	27,50 Aa	36,26 Aa
0,42	26,00 Aa	31,48 Aa	----
CV (%)	21,39	50,99	27,27

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. CV= Coeficiente de variação.

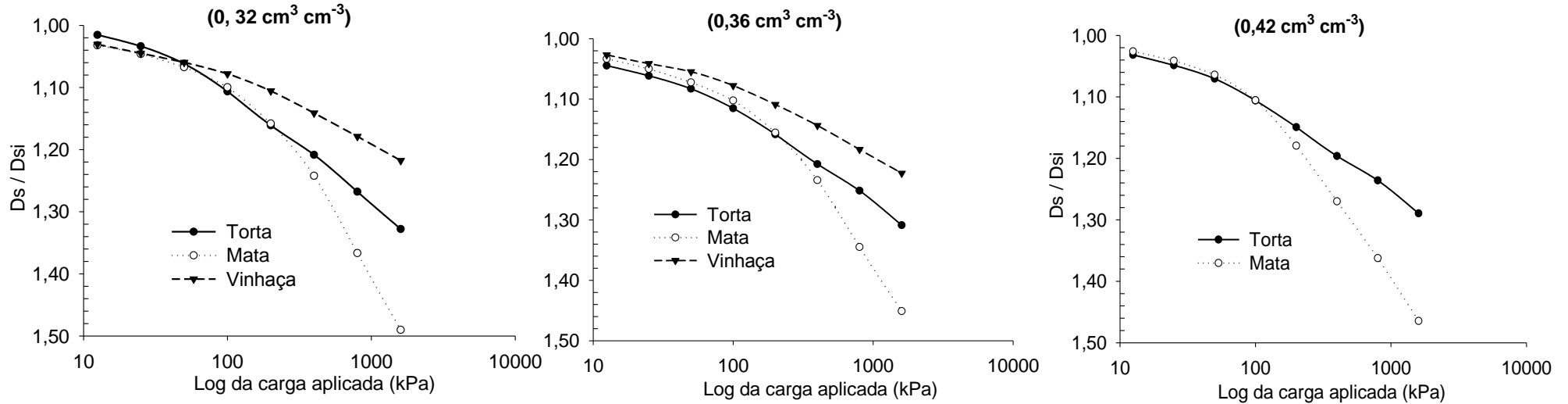


Figura 14 - Valores de densidade do solo em função da tensão aplicada nos diferentes níveis de umidade (0-0,20).

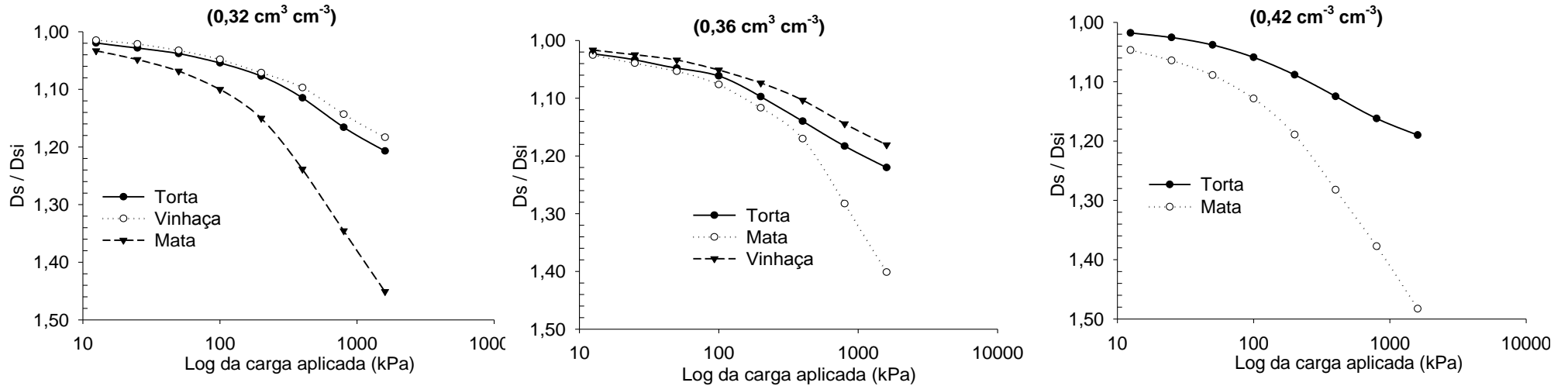


Figura 15 - Valores de densidade do solo em função da pressão aplicada nos diferentes níveis de umidade (0,20 – 0,40 m).

5.4.1 - Índice de compressibilidade e sua relação com alguns atributos físicos do solo

Na tabela 12 observa-se que, em ambas as profundidades, o índice de compressibilidade (C_c) não apresentou diferenças significativas com a redução da umidade para os sistemas de manejo em estudo. O C_c apresentou maiores valores no sistema de mata e, na mesma umidade gravimétrica o C_c apresentou diferenças significativas em relação ao sistema com aplicação de torta de filtro e vinhaça, os quais não diferiram significativamente entre si.

Na profundidade de 0 – 0,20 m, o índice de compressibilidade variou de 0,43 à 0,12, decrescendo na seguinte ordem: mata > torta de filtro e vinhaça. Na profundidade de 0,20 – 0,40 m a variação foi de 0,35 à 0,13 decrescendo na ordem do sistema de mata > torta > vinhaça.

O índice de compressão (C_c), por ser a inclinação da reta de compressão virgem, é usado como um indicador da compressibilidade do solo, sendo um solo tanto mais compressível quanto maior o seu índice de compressão (Silva e Cabeda, 2006; Holtz & Kovacs, 1981). Comparando as curvas de compressão para o Argissolo Vermelho - Amarelo (figuras 16 e 17), observa-se nas duas profundidades que os sistemas sob cultivo agrícola em todos os níveis de umidade apresentaram as menores tendências à deformação com aplicação das cargas. Este pode ser um reflexo dos maiores valores de densidade do solo, o que estaria sobrepondo ao efeito que a água exerce no comportamento compressivo do solo conforme comentado por Larson & Gupta (1980); Smith et al.(1997); Kondo & Dias Júnior (1999), e constatados por Silva et al. (2002). No presente estudo, houve correlação negativa e significativa com “bom” ajuste (R^2) para a regressão do índice de compressibilidade com a densidade do solo, nas duas profundidades (figura 18 “a” e “b”) onde, quanto menor o índice de compressibilidade maior a densidade inicial do solo.

Por outro lado, os resultados revelam uma tendência maior à deformação do solo de mata, o que pode estar relacionado com sua menor densidade do solo e com o maior espaço poroso disponível à deformação. Diversos outros estudos como os de Kondo & Dias Júnior (1999); Vasconcelos (2009); Silva et al. (2002), obtiveram, valores de índice de compressão na mata natural superiores àqueles encontrados para o solo sob cultivo .

Tabela 12- Índice de compressibilidade dos diferentes sistemas de manejo

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	Profundidade (m)	Sistemas de manejo		
		Mata	Torta	Vinhaça
32	0 - 0,20	0,41 Aa	0,19 Ab	0,12 Ab
36		0,35 Aa	0,19 Ab	0,13 Ab
42		0,43 Aa	0,17 Ab	----
CV	(%)	18,46	19,75	15,10
32	0,20 - 0,40	0,35 Aa	0,14 Ab	0,13 Ab
36		0,33 Aa	0,15 Ab	0,13 Ab
42		0,34 Aa	0,13 Ab	----
CV	(%)	8,45	13,08	40,37

Letras maiúsculas idênticas na mesma coluna e letras minúsculas idênticas na mesma linha, não apresentam diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. CV = Coeficiente de variação.

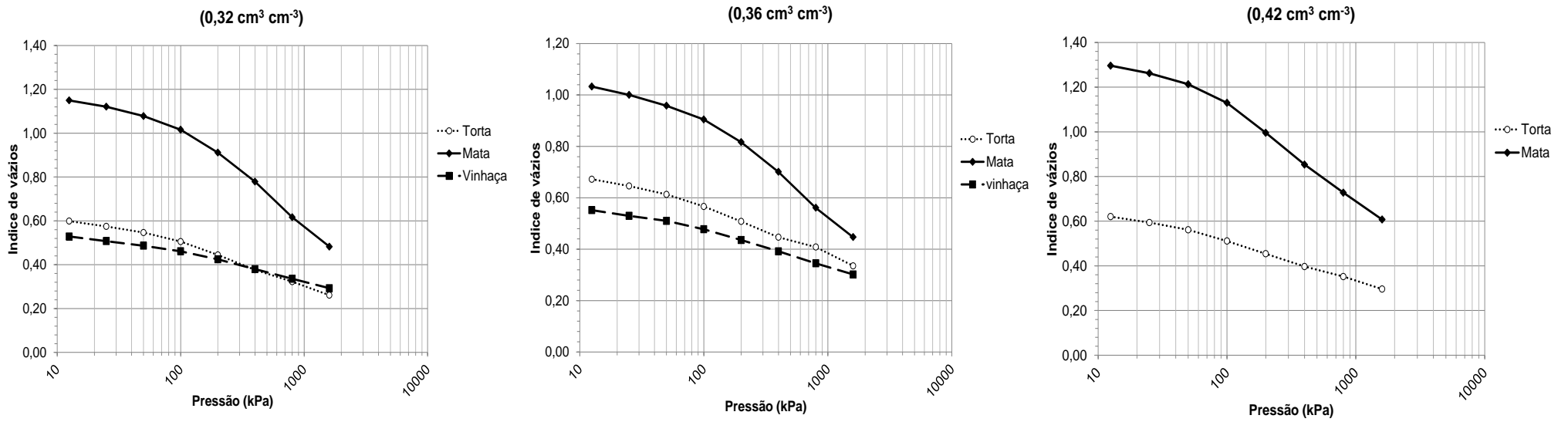


Figura 16 - Índice de vazios em função da pressão aplicada nos ensaios de compressibilidade do solo a camada de 0 – 0,20 m

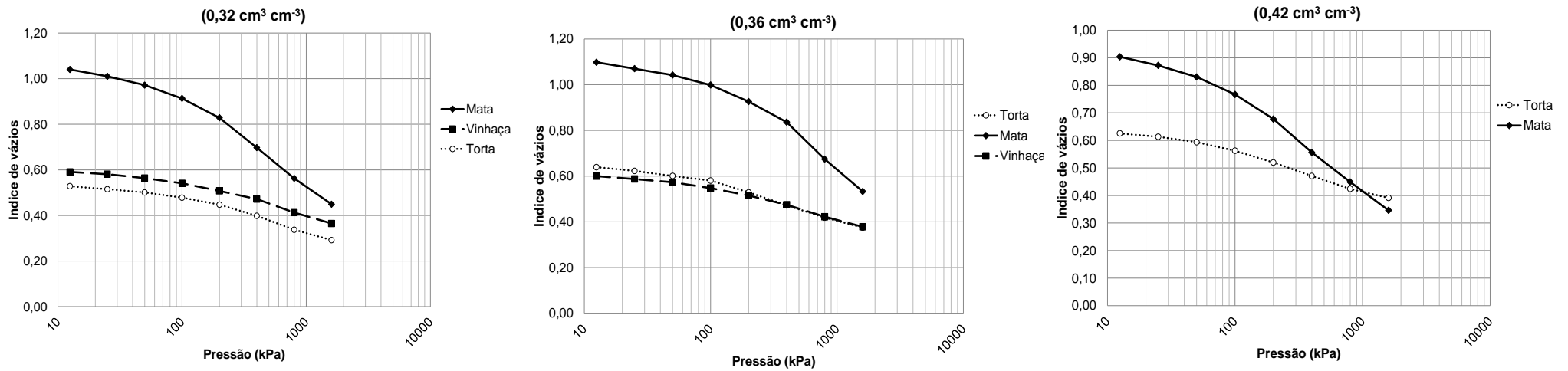


Figura 17- Índice de vazios em função da pressão aplicada nos ensaios de compressibilidade do solo a camada de 0,20 – 0,240 m.

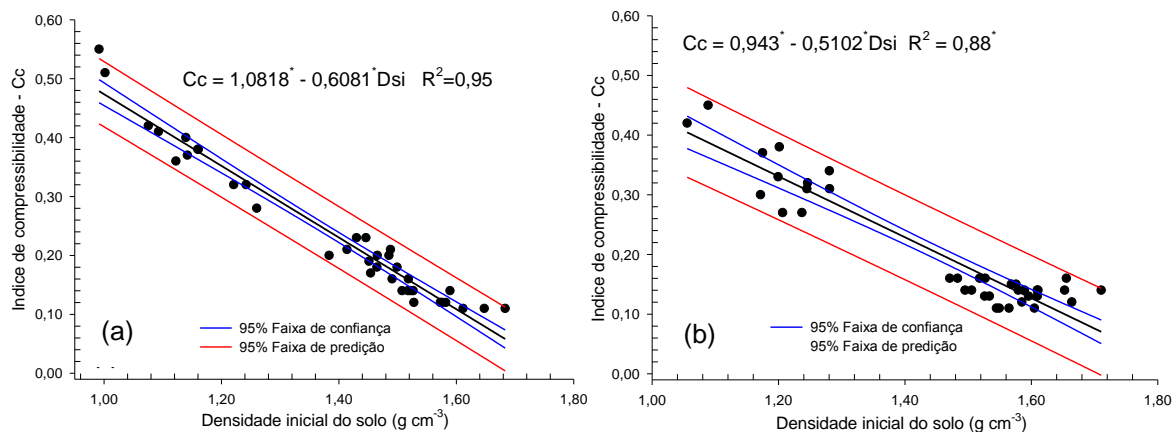


Figura 18 – Regressão do índice de compressibilidade em função da densidade inicial do solo para o Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0 - 0,20 m (a) e 0,20 – 0,40 m (b).

5.5 - Pressão das máquinas agrícolas aplicadas na superfície do solo no solo

A figura 19 ilustra as pressões exercidas na superfície pelos rodados da carregadeira. Observa-se que as maiores pressões foram geradas pelos rodados traseiro (figura 19-b) da carregadeira com aplicação de uma pressão ao solo de 139 kPa. A pressão exercida pelo rodado dianteiro foi de 123 kPa (figura 19-a). A menor largura do rodado traseiro da carregadeira (380 mm) em relação ao dianteiro (470 mm) gerou maiores pressões sob a superfície do solo, uma vez que, ambos estavam sob a mesma pressão de insuflagem nos pneus (180 kPa) como também a mesma carga sob eixo. Alakukku et al. (2003), avaliando a compactação induzida por tráfego de máquinas em solos aráveis, também constataram que, quando a pressão de insuflagem, carga sob rodas e outros parâmetros do solo, são mantidos constantes, as dimensões dos pneus são responsáveis por maiores ou menores pressões na superfície.

As pressões geradas pelos rodados dianteiro e traseiro na superfície do Argissolo Vermelho - Amarelo são superiores as pressões de précompressão em todos os sistemas de manejo para o menor nível de umidade do solo em estudo. Logo, para essas condições, o tráfego dessas máquinas podem estar gerando compactações adicionais nos sistemas sob aplicação de vinhaça e torta de filtro no cultivo da cana-de-açúcar.

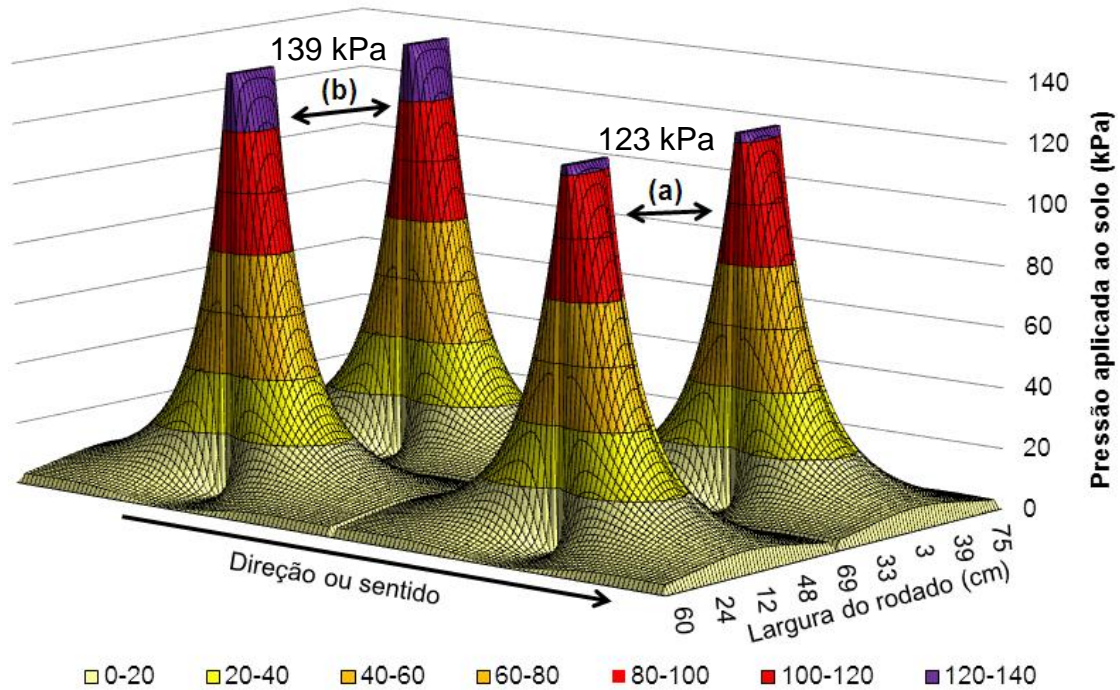


Figura 19 - Pressões aplicadas na superfície solo geradas pelos rodados dianteiros (a) e traseiro (b) da carregadeira de cana-de-açúcar.

Na figura 20-a, observa-se que o rodado dianteiro gerou maiores pressões na superfície do solo, quando comparado com o rodado traseiro (figura 20-b). As maiores pressões de insuflagem (179 kPa) e a menor largura do pneu (470 mm), foram responsáveis por maiores pressões aplicadas na superfície do solo, geradas pelo rodado dianteiro de 152 kPa. Já em relação ao rodado traseiro, a pressão na superfície do solo foi menor, correspondente à 85 kPa, devido a menor insuflagem nos pneus (165 kPa) e uma maior largura (622 mm). Diversos estudos, como os de Lozano et al. (2013); Arvidsson e Keller, (2004); Arvidsson & Ristic (1996) constataram diferenças de pressões aplicadas na superfície do solo quando ocorrem mudanças na relação largura-insuflagem de rodados agrícolas.

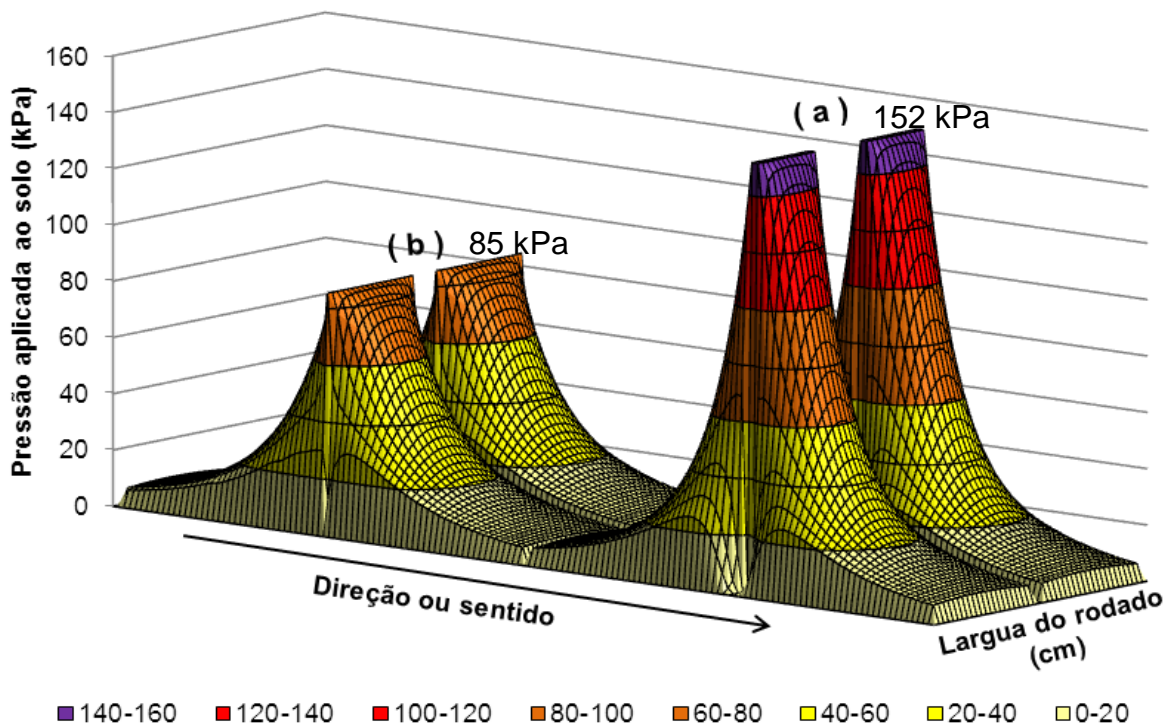


Figura 20 - Pressões aplicadas na superfície solo geradas pelos rodados dianteiros (a) e traseiros (b) do trator BH 180.

Na figura 21, observa-se que as maiores pressões na superfície do solo, com o menor nível de umidade ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram geradas pelos o rodado dianteiro do trator (152 kPa) e pelo o rodado traseiro da carregadeira (139 kPa). Segundo Arvidson & Keller (2007), a pressão média que um pneu exerce sobre a superfície do solo é aproximadamente a sua pressão de inflação. No entanto, Reaves & Cooper (1960), comentam a razão de carga aplicada na superfície do solo, em relação à pressão exercida a 0,25 m de profundidade, é de aproximadamente 8,3:1. Sendo assim, analisando a pressão aplicada à 0,25 m, notasse que as pressões que estes dois rodados exercem são respectivamente de 75 e 68 kPa. Desse modo, ficando estabelecida uma relação entre a carga aplicada na superfície e na profundidade avaliada de 2:1 para o rodado dianteira do trator e, para o rodado traseiro da carregadeira essa relação é de aproximadamente 2,5:1. Assim, a pressão dissipada até a camada de 0,25 m correspondeu a 50,40% para o rodado dianteiro do trator e, uma dissipação 51% para o rodado traseiro da carregadeira.

Em ambas as camadas, as pressões que são exercidas pelas máquinas agrícolas são maiores que a capacidade de suporte de carga para as condições em

estudo. Pacheco (2010) salienta que a pressão aplicada na superfície do solo por trânsito de máquinas, mesmo sendo transmitida de forma atenuada para horizontes ou camadas mais profundas, muitas vezes é aplicada ao solo com umidades favoráveis à compactação subsuperficial, ou seja, subsolo com capacidade de suporte de carga (σ_p) menor do que a pressão aplicada durante operações mecanizadas.

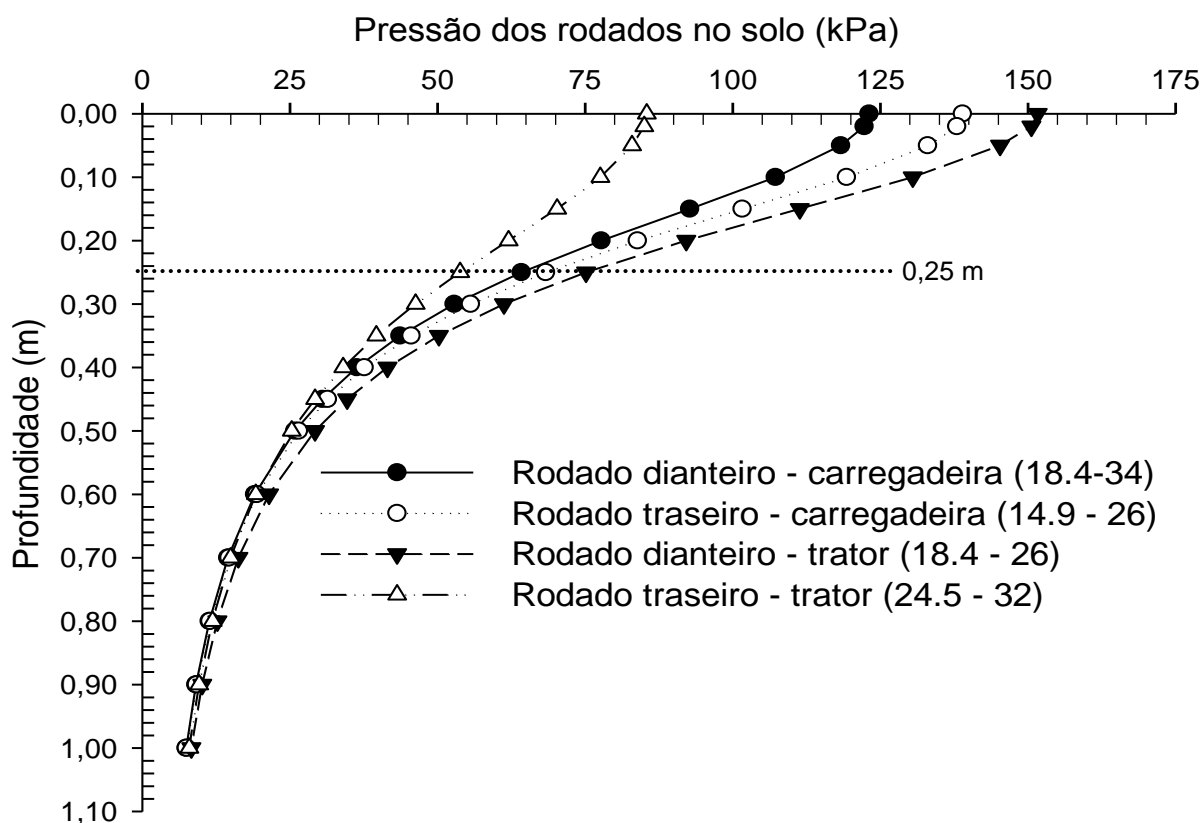


Figura 21 - Distribuição da pressão aplicada na superfície do solo pelos maquinários agrícolas até 1 metro de profundidade.

Na figura 22 observa-se a avaliação dos bulbos de pressões das rodas do trator e da carregadeira com a propagação das pressões abaixo das rodas, onde o rodado traseiro do trator gerou menor bulbo de pressão, enquanto o dianteiro foi responsável pelo maior bulbo.

Os resultados de pressões transmitidas na superfície do solo observado nos bulbos de pressões elaborados pelos Tasc v.2.0, estão em concordância com os valores de vários pesquisadores como Lamandé & Schjønning (2011); Schjønning & Lamandé (2010); Arvidsson & Keller (2007); Alakukku et al. (2003), os quais relatam

que as pressões verticais médias na camada superficial podem ser descritas pela pressão de insuflagem dos pneus, e que as pressões abaixo dos 25 cm de profundidade estão diretamente relacionadas com as cargas por roda.

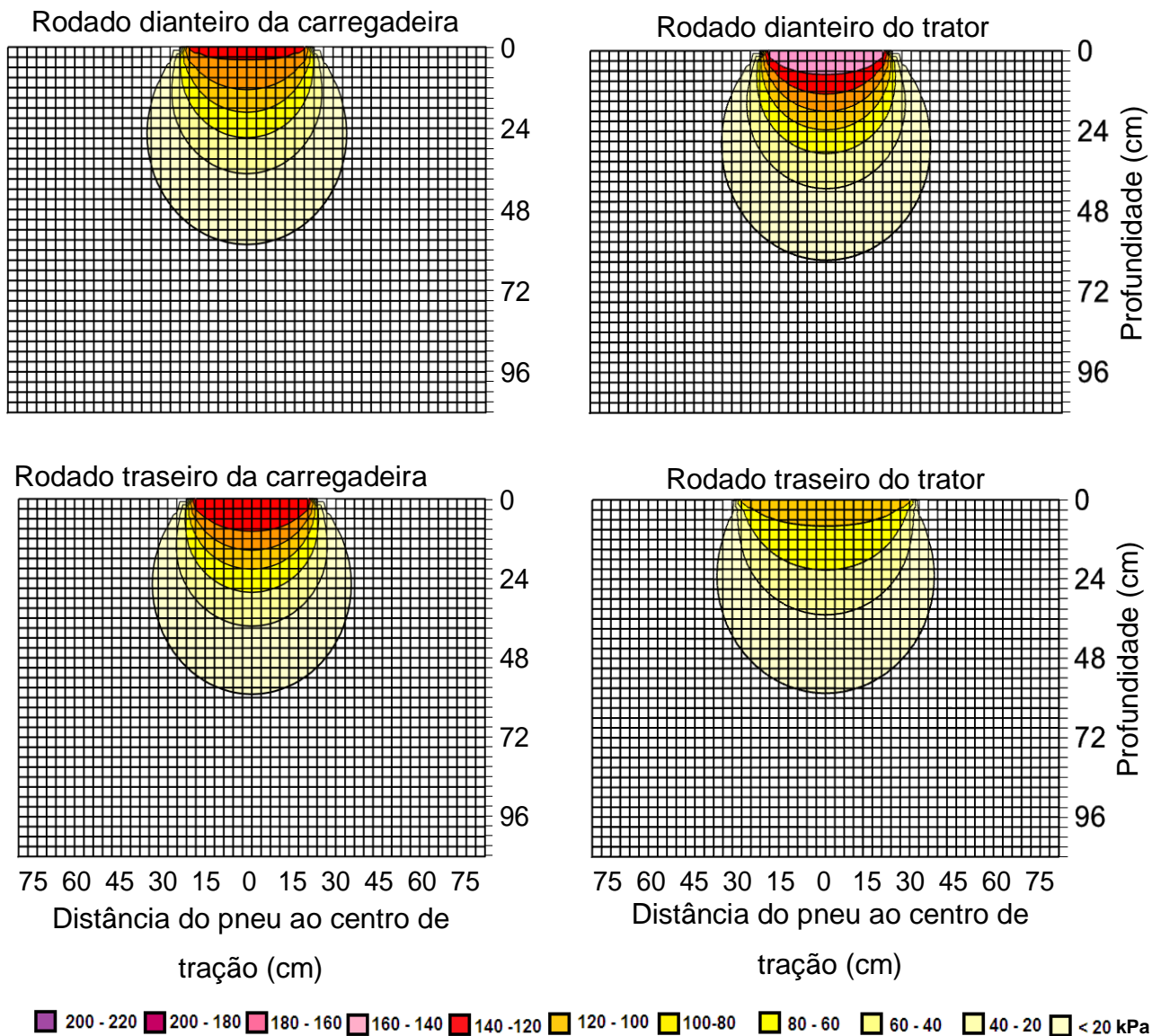


Figura 22 - Bulbos de pressões (kPa) dos rodados dianteiros e traseiros da carregadeira e do trator agrícola.

6 - CONCLUSÃO

- ✓ A pressão de précompressão na profundidade de 0 – 0,20 m apresentou correlações com a Dsi, microporosidade e com a granulometria da fração areia;
- ✓ O uso agrícola do solo promoveu uma heterogeneidade dos sistemas de manejo com vinhaça e torta de filtro na profundidade de 0–0,20 (m), constatado pela análise de agrupamento;
- ✓ Os maiores valores de coesão e resistência ao cisalhamento foram constatados nos solos de mata nativa quando comparado com os sistemas sob cultivo agrícola;
- ✓ A aplicação de torta de filtro no solo promoveu maiores resistência ao cisalhamento em relação ao sistema com aplicação de vinhaça;
- ✓ O ângulo de atrito interno do solo não foi afetado pelos níveis de umidade do solo em estudo, com isso não apresentando tendências de mudanças com o aumento ou redução da umidade;
- ✓ A aplicação de torta de filtro e vinhaça nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar gerou dissipação da energia da pressão de précompressão nesses sistemas de manejo, constatados pelos menores valores de pressão em relação aos solos de mata nativa;
- ✓ A mata nativa apresentou maiores índices de vazios, apresentando, conseqüentemente, maiores índices de compressibilidade e de susceptibilidade a compressão;
- ✓ A aplicação dos resíduos orgânicos da cana-de-açúcar na forma vinhaça e torta de filtro, ao longo de quase 25 anos, possibilitaram bons resultados nos processos de dissipação da pressão de précompressão nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar;
- ✓ As maiores pressões impostas à superfície do solo pelos rodados das máquinas agrícolas são maiores que as pressões de précompressão na menor umidade volumétrica;
- ✓ Na menor umidade, as pressões impostas à superfície do solo pelos rodados agrícolas tiveram uma dissipação superior a 50% a partir da profundidade de 0,25 m;

- ✓ As menores larguras dos rodados dianteiro do trator e traseiro da carregadeira geraram maiores pressões na superfície do solo, quando comparado com os rodados de maiores larguras.

REFERÊNCIAS

- ALAKUKKU, L; WEISSKOPF, P; CHAMEN, W.C.T; TIJINK, F.G.J; VAN DER LINDEN, J.P; PIRES, S; SOMMER, C; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.
- AL-SHAYEA, N. A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soil. **Engineering geology**, n.62, p.319-342.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (**ASTM D-3080**): Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 1998. 6p.
- ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in Southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computation of compaction. **Soil & Tillage Research**, v.60, n.1, p.79-89, 2001.
- ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tire inflation pressure. **Soil & Tillage Research**. v.96, p.284-291. 2007.
- ARVIDSSON, J.; RISTIC, S. soil stress and compaction effects for four tractor tyres. **Journal of Terramechanics**, v.33, n.5, p.223-232,1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (**NBR 12007/90-MB 3336/90**): Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (**NBR 6459**): determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984 a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (**NBR 7180**): Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984 b.
- BASTOS, C.A.B; SCHMITT, L.A; VASCONCELOS, S.M; RABASSA, C. M.; SOUZA, E.W. Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.12, p.59-67, 2008.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 106, n. 39, p. 859 -863, 1959.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99f. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, . Porto Alegre – RS.Alegre.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SOARES, J.M.D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo, **Ciência Rural**, v.37, n.6, p.1646-1653, 2007.

CONSOLI, N.C; PIETRO, P.D.M; UBRIACH, L.A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, . p.1211-1215, 1998.

CRISTELO, N.; CUNHA, V.M.C.F; DIAS, M.; GOMES, A.T.; MIRANDA, T.; ARAÚJO, N. Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay. **Geotextiles and Geomembranes**,. v.43, p.:1-13, 2015.

DIAS JÚNIOR, M. S; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. SoloRevista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; VITOR HUGO,A.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do solo**. Sociedade Brasileira em ciência do solo. Viçosa-MG . 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (- EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises química de solos, plantas e fertilizantes**. 2º 2ª edição. Rio de Janeiro, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA . Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª. ed. Revisada e. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FREDLUND, D.G. RAHRDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley and Sons. INC. New York. 1993. 510p.

GAO, Z.; ZHAO, J. Evaluation on Failure of Fiber-Reinforced Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, J. Geotech. Geoenviron. Eng. p.139.:95-106, 2013.

GERSCOVICH, D.M.S. **Resistência ao cisalhamento**.102p, 2010.

granular material. *Journal of Soil Science*, Baltimore, v. 23, n.2, p. 481 - 498, 1972.

GRAY, D.H.; OHASHI, H, Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE. v.109, n.3, p.335–353, 1983.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p. 5 -10, 1987.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P; . & DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. *Advance. Agronomy.*, v42, p:311-338, 1989.

HAIR, J.F.; ANDERSEN, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C., **Multivariate data analysis**, 3^a 7^a edition, prentice hall, 2013. 752p.

HOLTZ, R.D; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: **SOANE, B.D.; & VAN OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production**. Amesterdam, Elsevier, 1994.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Analysis**, 4^a Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1998.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.85-95, 2004.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. **Madison, American Society of Agronomy**, n.9, Part 1, p. 425-442, 1986.

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

LAMBE, T. L.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. Massachusetts. Institute of Technology. John Wiley & Sons, 1979. 553 p.

LAMBE, T.W. **Soil testing for engineers**. John Wiley, New York, 1951. 165p.

LARSON, W.E.; & GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, 44, p.1127-1132, 1980.

LOZANO, N.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA, V.S.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil & Tillage Research**, v.129, p.61–68, 2013.

MACHADO, A.L.T. Esforços de tração para ferramentascde hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul. 2001. 193f. Tese (Doutorado em engenharia agrícolas) -. Universidade Federal de Pelotas, Porto Alegre-RS.

MCKYES, E.; NYAMUGAFATA, P.; NYAMAPFENE, K.W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. **Soil & Tillage Research**, v.29, p.357-366, 1994.

MICKLETHWAITE, E.W.E. **Soil mechanics in relation to fighting vehicles**. Chertsey: Military college College of Science, 1944. 20 p.

MITCHELL, J.K **Fundamentals soil behavior**. 2nd ed. Wiley, New York, 1993.

MOHAMED, A. M.K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers. **Construction and Building Materials**, v.38, p. 242–247, 2013.

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HAJABBASI, M. A.; HEMMAT, A.; KELLER, T. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. **Biosystems Engineering**, v.98, p.90-101, 2007.

MOSADDEGHI, M.R., HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; ALEXANDROU, A. Pré-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil & Tillage Research**, v. 70, p. 53-64, 2003.

MURRAY, E.J; SIVAKUMAR, V. **Unsaturated Soils: A fundamental interpretation of soil behavior**. Wiley-Blackwell, 2010. 304p.

NIEL, N.T. **Applied multivariate analysis**. Springe. 2002, 718p.

OLIVEIRA, V.S.; ROLIM, M.M; COSTA, Y. J.; PEDROSA, E.M.R; SILVA, E.F.F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.435-442, 2011.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos. São Paulo. , 2000. 247p.

PIRES, B.S. **Capacidade de suporte de carga de e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob pastagens ao longo do tempo**. 2012. 113f ((Tese de doutorado). Universidade Federal de Lavras, UFLA-MG Minas Gerais.

PIRES, B.S. **Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um Latossolo sob diferentes usos de manejos**. 2007. 86p. Dissertação (Mestrado em Solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R.S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. **Construction and Building Materials**,v.16, p.123–131, 2002.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Saeafs, Curitiba, 1996. 446p.

REAVES, C.A.; COOPER, A.W. Stress distribution in soil under tractor roads. **Journal of Agricultural Engineering Society**, v. 41, p.20-31, 1960.

REICHERT, J. M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do solo (cap. II). **IN: VAN LIER, Q. J. Física do Solo. Sociedade Brasileira Ciência do Solo**. UFV. 2010. 298p.

REINERT, D. J. et al. Compress - software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade de solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. , 2003, Ribeirão Preto. **Anais**. Ribeirão Preto, SBCS, 2003. CD-ROOM.

REINERT, D.J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. **In: DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V., eds. Recuperação de áreas degradadas.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas. p.163-176, 1998.

ROCHA, W. W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras-MG.** 2003. 101p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

ROSA, D.P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação.** 2007. 112 p. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

SAS Institute. **1996. SAS User's Guide: Statistic softwares.** 1996.

SCHJØNNING, P; LAMANDÉ, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. **Soil & Tillage Research**, v.108, p.77-82, 2010.

SCHNELLMANN, R.; RAHARDJO, H.; SCHNEIDER, H.R. Unsaturated shear strength of a silty sand. **Engineering Geology**, v.162, p.88–96, 2013.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto.** 2003. 128p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solos de tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p.447-457, 2005.

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

SILVA, B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.1, p.165-173, 2004.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A. & LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial water content and applied pressure on uniaxial compaction. **Soil & Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uniaxial compaction. **Soil & Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997.

TOWER, G. D. Effective stresses in unsaturated soil and their applicability in theory on critical state soil mechanics. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 34, p.429 - 435, 1983.

TOWER, G. D.; CHILDS, E. C. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. **Soil Science Society of America Journal**, n.23, p.481-498, 1972.

VAN GENUCHTEN VAN, M. T. A closed-form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VASCONCELOS, R. F. B DE; CANTALICE, J. R. B.; MOURA, G. B. A; . ROLIM, M. M; MONTENEGRO, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo amarelo distrocoeso Não saturado sob diferentes sistemas de manejo da Cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.525-536, 2012.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1220-1225, 1984.

VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern corn belt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n. 2, p. 344-9, 1978.

WU, L; SWAN, J.B; ALLMARAS, R.R; LOGSDON, S.D. Tillage and traffic influence on water and solute transport in corn-soybean systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.185-191, 1995.