

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM LATOSSOLO
VERMELHO À PENETRAÇÃO: COMPARAÇÃO DE
PENETRÔMETROS, AJUSTES DE MODELOS E
CORREÇÃO DA UMIDADE**

BACHAREL EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

Kattielly Estteffany Alves de Lima

Rondonópolis, MT – 2019

RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO À PENETRAÇÃO: COMPARAÇÃO DE PENETRÔMETROS, AJUSTES DE MODELOS E CORREÇÃO DA UMIDADE

por

Kattielly Estteffany Alves de Lima

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso como parte dos requisitos do Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof^o. Dr. Thiago Franco Duarte

Rondonópolis, Mato Grosso – Brasil

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732r Lima, Kattielly Estteffanny Alves de.

Resistência mecânica de um latossolo vermelho à penetração: comparação de penetrômetros, ajustes de modelos e correção da umidade/ Kattielly Estteffany Alves de Lima. -- 2019

52 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Thiago Franco Duarte.

TCC (graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rondonópolis, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Resistência do solo. 2. Compactação. 3. Penetrômetro. 4. Umidade. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada à fonte.

**Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas
Engenharia Agrícola e Ambiental**

A comissão examinadora abaixo assinada aprova o trabalho de curso

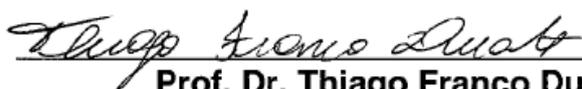
**RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM LATOSSOLO
VERMELHO À PENETRAÇÃO: COMPARAÇÃO DE
PENETRÔMETROS, AJUSTES DE MODELOS E
CORREÇÃO DA UMIDADE.**

elaborado por

Kattielly Estteffany Alves de Lima

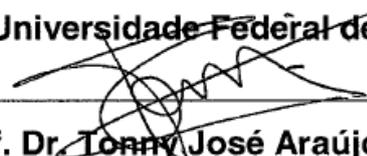
como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Agrícola e Ambiental

Comissão Examinadora



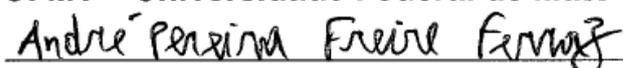
Prof. Dr. Thiago Franco Duarte

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso



Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso



Prof. Dr. André Pereira Freire Ferraz

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

Rondonópolis, dez de abril de 2019

DEDICATÓRIA

A Deus por todas as graças e conquistas recebidas.

Aos meus pais por me proporcionarem viver esta experiência e por todo o suporte e apoio incondicional durante o período da graduação.

A minha avó por todas as orações e apoio.

A minha família por toda compreensão e ensinamento.

Aos meus colegas de curso por toda ajuda e colaboração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por todas as realizações e conquistas durante este período e por toda força nas horas difíceis.

A minha família por toda compreensão e apoio.

Aos meus pais em especial a minha mãe por todo apoio e pela oportunidade de me proporcionar mais um degrau na minha vida e por todo carinho e força a mim depositadas.

Ao meu namorado por todo carinho, apoio e compreensão devida a minha ausência.

A Universidade Federal de Rondonópolis em especial a Coordenação do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental por todo apoio, extensivo a todos os professores.

Ao grupo de pesquisa Prática em Água e Solo- GPAS por todo conhecimento e oportunidades.

À minha amiga Maysa e todos os envolvidos em especial a Maria por toda ajuda e apoio durante a realização deste projeto.

Ao meu orientador Thiago Franco Duarte por aceitar fazer parte deste projeto me auxiliando e me ajudando em cada etapa sem medir esforços.

RESUMO

A resistência mecânica do solo à penetração é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade que este oferece à penetração das raízes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica à penetração de um Latossolo vermelho e a comparação de dois penetrômetros com ajustes de modelos e correção da umidade. O experimento foi realizado no período de maio a outubro de 2018, nas dependências da Universidade Federal de Mato Grosso- UFMT, Campus Universitário de Rondonópolis- CUR. Foram avaliadas entre a camada de 0-20 cm algumas propriedades físicas do solo como densidade, porosidade e resistência do solo a penetração. Para a comparação dos dois penetrômetros foram realizadas avaliações em campo e em laboratório sendo as avaliações em laboratório determinadas através da coleta de amostras na camada entre 0-60 cm. Na determinação da correção da resistência a penetração para umidade padrão foram comparados dois métodos de Busscher e um alternativo. Os dados obtidos da resistência mecânica do solo em laboratório foram submetidos a quatro modelos de ajustes, sendo o modelo de Jakobsen & Dexter (1987) que obteve melhor ajuste aos dados. Existe divergência significativa nos valores de resistência a penetração para uma mesma faixa de umidade quando comparado os valores obtidos pelos dois aparelhos apresentando a avaliação em campo menores valores. Para uma umidade padrão de 20% os dados de resistência mecânica do solo a penetração medida e a resistência de referência apresentaram correlação positiva.

Palavras-chave: resistência do solo; compactação; penetrômetro; umidade do solo.

ABSTRACT

The mechanical resistance of the soil to the penetration is considered the most adequate property to express the degree of soil compaction and, consequently, the ease of soil penetration. The objective of this work was to evaluate the mechanical resistance to the penetration of a Red Latosol and the comparison of two penetrometers with model adjustments and moisture correction. The experiment was carried out from May to October 2018, at the Federal University of Mato Grosso - UFMT, Campus university de Rondonópolis - CUR. Between the 0-20 cm layer some physical soil properties such as density, porosity and soil penetration resistance were evaluated. For the comparison of the two penetrometers, field and laboratory evaluations were carried out and the laboratory evaluations were determined through the collection of samples in the layer between 0-60 cm. In the determination of the penetration resistance correction for standard moisture two methods of Busscher and an alternative were compared. The data obtained from mechanical resistance of the soil in the laboratory were submitted to four models of adjustments, being the model of Jakobsen e Dexter (1987) that obtained better adjustment to the data. There is significant divergence in the values of resistance to penetration for the same range of humidity when compared the values obtained by the two apparatuses presenting the field evaluation smaller values. For a standard moisture of 20% the data of soil mechanical resistance to measured penetration and reference resistance showed a positive correlation.

Keywords:soil resistance; compaction; penetrometer; soil moisture.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Determinação do peso específico dos sólidos e porosidade da área de estudo.	25
Tabela 2- Limites de consistência da área de estudo.	27
Tabela 3- Teste-t: duas amostras em par para médias.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Pesagem de uma porção de solo (A) e pesagem do picnômetro cheio com água e solo (B).....	24
Figura 2- Peneiramento do solo (A) e prato de latão preenchido com solo úmido com a linha de escoamento do material ao centro feita com o auxílio do cinzel (B).....	26
Figura 3- Modelagem do solo de modo a obter um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (A) e porção do solo do local da fragmentação do cilindro (B).....	26
Figura 4- Identificação das amostras (A) e condicionamento das amostras (B) em campo.	27
Figura 5- Saturação do solo da área de estudo.	29
Figura 6- Pesagem dos anéis (A) e saturação das amostras (B) no laboratório de física e mecânica do solo – UFMT, Rondonópolis- MT.	30
Figura 7- Medição da resistência mecânica do solo a penetração no laboratório de física e mecânica do solo – UFMT, Rondonópolis- MT.	32
Figura 8- Medição da profundidade para coleta das amostras (A) e coleta das amostras em diferentes profundidades na camada de 0-60 cm (B).	33
Figura 9- Variação em campo da resistência mecânica a penetração em função da umidade em diferentes profundidades. Profundidade de 0-10 cm (A). Profundidade de 10-20 cm (B). Profundidade de 20-30 cm (C). Profundidade de 30-40 cm (D). Profundidade de 40-50 cm (E). Profundidade de 50-60 cm (F).	38
Figura 10- Variação em laboratório da resistência mecânica do solo à penetração em função da umidade (θ_m).	39
Figura 11- Modelo Busscher e Sojka (1987).	40
Figura 12- Modelo de Busscher et al., (1997).	40
Figura 13- Modelo Jakobsen e Dexter (1987).	41
Figura 14- Modelo de Mielke, et al (1994).	41
Figura 15- Estimativa da densidade através da inversão do modelo de Busscher e Sojka (1987).	42
Figura 16- Comparação da resistência a penetração em campo e laboratório em função da umidade.	43
Figura 17- Comparação da resistência a penetração em campo e laboratório.	44
Figura 18- Correção dos dados da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade padrão.	45
Figura 19- Correção dos dados da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade padrão - método proposto e método de Busscher.	46
Figura 20- Diferença entre dados de resistência mecânica do solo a penetração medidos e a resistência de referência ($R_{Pref} = 1,87 \text{ MPa}$; $\theta_m = 0,20$).	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Compactação do solo	16
2.2	Resistência mecânica do solo à penetração	17
2.3	Densidade do solo	19
2.4	Porosidade do solo	20
2.5	Umidade do solo	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Localização da área de estudo	23
3.2	Caracterização da área de estudo	23
3.2.1	Porosidade do solo.....	23
3.2.2	Limites de consistência.....	25
3.3	Amostragem.....	27
3.4	Resistência mecânica do solo a penetração	28
3.5	Primeiro Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual	29
3.6	Segundo Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro de bancada.	30
3.7	Terceiro Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual e penetrômetro de bancada	32
3.8	Modelos de ajustes da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro de bancada	33
3.9	Correção da resistência a penetração: método alternativo e comparação entre dois métodos de Busscher.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Variação em campo da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade	37
4.2	Equação ajustada da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade em laboratório	38
4.3	Modelos de ajustes da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro de bancada	39
4.4	Estimativa da densidade do solo através da resistência a penetração.....	42
4.5	Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual e penetrômetro de bancada	43
4.6	Correção da resistência a penetração: método alternativo e comparação entre dois métodos de Busscher.....	44
5	CONCLUSÃO.....	48
6	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um desequilíbrio no ecossistema, pois a retirada da cobertura vegetal original e a implantação de culturas, aliadas às práticas de manejo inadequadas, promovem o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando desta forma, suas propriedades químicas, físicas e biológicas, limitando sua utilização agrícola. Estas alterações ocorrem na medida em que os ecossistemas naturais vão sendo substituídos por atividades voltadas para fins industriais ou para produção de alimentos (GODEFROY et al., 1975).

Com o uso de tecnologias voltadas para o conjunto da motomecanização nas operações agrícolas e florestais ocorre a alteração das propriedades físicas do solo tornando-se um fator limitante, pois influencia diretamente no processo de movimentação do ar e da água no solo e no volume de macroporos enquanto os de microporos continuam praticamente inalterados. A susceptibilidade de um solo a compactação torna-se crítica quando o mesmo é submetido a uma pressão excedente a da sua capacidade de suporte de carga. Como essa capacidade é uma função da umidade, quando o solo está seco considerando sua alta capacidade de carga o processo de compactação diminui.

Os solos da região do Cerrado corrigidos quimicamente contribuem expressivamente na produção agropecuária do país. A ocorrência de intensa movimentação de máquinas e equipamentos nas lavouras quando aliados a uma inadequada umidade do solo (MANTOVANI, 1987), juntamente com os sistemas de culturas utilizados, as condições climáticas e o tempo de uso desses sistemas de manejo determinam a magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo (COSTA et al., 2003).

Islam e Weil (2000) consideram três grupos de atributos na avaliação da qualidade do solo: o primeiro grupo está relacionado com os atributos denominados efêmeros, que são aqueles que apresentam oscilações em curto espaço de tempo, dentre os quais podem ser citados temperatura, pH, conteúdo de água, respiração do solo e teores de nutrientes; o segundo grupo

engloba atributos denominados intermediários, os quais são alterados com o manejo após alguns anos, dentre estes incluem-se conteúdo de matéria orgânica, resistência à penetração do solo e permeabilidade do solo à água, e, por último têm-se os atributos definidos como permanentes, atributos inerentes ao solo, os quais não sofrem alterações a curto prazo, dentre estes podem ser citados componentes mineralógicos, textura, profundidade do solo, camadas de impedimentos e pedoclima.

Quando a compactação do solo é oriunda de práticas inadequadas de manejo o mesmo influencia diretamente um aumento na densidade do solo gerando conseqüentemente alterações em outras propriedades físicas como a porosidade, o aumento da resistência mecânica do solo ao crescimento radicular, a retenção de água, e a diminuição dos macroporos e aeração do solo (LETEY, 1985).

O processo de compactação é influenciado pelo manejo inadequado sendo a umidade o fator que controla a facilidade de deformação que poderá ocorrer nesse solo (FIGUEIREDO et al., 2000). Segundo Seixas e Oliveira Junior (2001), quando a umidade aumenta, ocorre efeito contrário na resistência à compactação devido à maior lubrificação das partículas, até que se atinjam os limites plásticos inferiores e o conteúdo de água de aeração ótimo.

O crescimento e desenvolvimento adequado das plantas dependem da harmonia de uma série de fatores. A redução no crescimento do sistema radicular pode ser ocasionada por: temperatura inadequada, drenagem insuficiente, e pela compactação do solo, onde dentre as limitações muitas vezes a compactação do solo implica em sérios problemas, pois um dos fatores importantes para obtenção de uma boa produção é a absorção de nutrientes e além de ser um impedimento mecânico o mesmo afeta também processos químicos e biológicos (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionada com o crescimento das plantas (Letey, 1985) e modificada pelos sistemas de preparo do solo, sendo uma das melhores estimativas do impedimento mecânico que o mesmo causa ao sistema radicular.

A resistência mecânica do solo a penetração é utilizada na determinação da resistência do solo devida ser de fácil determinação e a própria estar relacionada com o crescimento das plantas logo se a mesma não obtém crescimento e rendimento adequado acarreta uma menor produção. Na determinação desse fator os penetrômetros eletrônicos e de impacto se destacam por serem aparelhos capazes de medir em várias profundidades o valor da pressão correspondente a compactação na camada observada (STOLF, 1991).

Este equipamento pode identificar as condições do solo quanto ao aspecto compactação, sendo essa avaliação de suma importância para a determinação dos implementos mais adequados para o manejo a fim da obtenção de um crescimento e rendimento adequado de uma agricultura sustentável (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

Diante do exposto o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica à penetração de um Latossolo vermelho entre um penetrômetro eletrônico a velocidade constante e um penetrômetro eletrônico com operação manual, com a correção da umidade e comparação de modelos ajustes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compactação do solo

Denomina-se compactação o processo em que ocorre a diminuição do volume de um solo que não se encontra saturado quando é submetido a uma pressão externa, seja por máquinas agrícolas, animais ou equipamentos de transportes (LIMA, 2004). Para a pedologia, a compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

A determinação da suscetibilidade do solo à compactação assume importante papel como fator de limitação econômica devido o mesmo estar relacionado ao crescimento das plantas e se a mesma não obtém crescimento adequado causa limitação na produtividade agrícola (KONDO et al., 1999).

Reichert et al. (1988) verificaram que em condições de formação de selamento superficial, a velocidade de infiltração básica foi sensivelmente reduzida durante a chuva, em todos os solos por eles estudados, sendo esse efeito mais pronunciado em solos argilosos com argila expansiva ou com alta dispersão de partículas finas.

Segundo Rosolem (1999) mesmo conhecendo o efeito que a compactação e a água causa sobre o crescimento radicular das plantas como no milho que altera o diâmetro e a distribuição das raízes, não se encontra avaliações sobre esse efeito quando em conjunto com solos de diferentes texturas.

Em um sistema de semeadura direta algumas práticas de manejo podem ser maximizadas com o objetivo de reduzir a compactação e conseqüentemente suas conseqüências. Algumas dessas propriedades são as contínuas adições superficiais de resíduos orgânicos, mantendo o solo coberto e enriquecendo a camada superficial com matéria orgânica no solo. Esses materiais orgânicos podem atuar na atenuação do processo de compactação ou nos efeitos causados como na dissipação de parte da pressão exercida

pelas rodas de máquinas ou quando incorporados na matéria orgânica, aumentam a elasticidade e a resistência à compactação (Silva et al., 2000; Braida et al., 2006).

Os Latossolos argilosos do cerrado brasileiro, susceptíveis à compactação, têm sido utilizados com sistemas de preparo que revolvem o solo. Este revolvimento, associado a chuvas intensas, de alta erosividade, e a temperaturas elevadas, degrada rapidamente o solo, comprometendo a sustentabilidade da atividade agrícola (STONE e SILVEIRA 2001). O sistema de preparo do solo com grade aradora tem sido o mais usado nessa região. Normalmente, a grade trabalha o solo a baixa profundidade e é de alto rendimento de campo. Entretanto, o uso contínuo desse implemento pode levar à formação de camadas compactadas, chamadas “pé-de-grade” (SILVA, 1992).

2.2 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica é um termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. Essa resistência geralmente aumenta com a compactação e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas, o que pode ocasionar uma redução no desenvolvimento do sistema radicular. Dentre os vários parâmetros físicos do solo, a resistência mecânica à penetração pode ser empregada para avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo (BENGHOUGH E MULLINS, 1990).

Letey (1985) descreve a resistência do solo a penetração como uma propriedade física que está diretamente relacionada com o sistema radicular das plantas e quando apresenta valores excessivos podem influenciar no crescimento das raízes em comprimento e diâmetro e na direção preferencial do crescimento radicular. Assim a resistência do solo à penetração é um fator

fundamental para a avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do solo para o crescimento das plantas.

Valores de resistência à penetração de 2,8 a 3,2 MPa retardam a alongação das raízes e com 4,0 MPa não há crescimento de raízes, haja vista que uma redução de 40% do comprimento radicular é crítico à produtividade das plantas (LETEY, 1985; VEPRASKAS e MINER 1986).

Cintra e Mielniczuk (1983) observaram que em um Latossolo Roxo, muito argiloso possuía uma redução de 50% no comprimento radicular de várias culturas, para valores da resistência à penetração de 1,1MPa. Para Merotto e Mundstock (1999) valores de resistência mecânica à penetração variando entre 1,0 e 3,5 MPa podem restringir, ou mesmo impedir, o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Logo, verifica-se que em relação a um valor crítico de resistência mecânica do solo a penetração existe uma amplitude de valores que são considerados críticos quando relacionado ao desenvolvimento e crescimento das raízes das plantas.

Uma alta resistência mecânica devida às alterações físicas do solo causa prejuízos no crescimento radicular das plantas. A resistência mecânica do solo à penetração é formada devida a dois fatores: a) incompressão das partículas primárias e b) fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento relativo da raiz. Ou seja, a mesma é resultante de forças oriundas da compactação, que é definida pela densidade aparente, teor de água e textura do solo (GROENEVELT et al., 1984).

A relação entre a resistência mecânica do solo com a umidade e a densidade é descrita como curva de resistência do solo, sendo utilizada para inferências na condição estrutural do solo relacionada à resistência crítica para o crescimento das plantas. Assim, a avaliação desses fatores é importante no estudo do efeito da compactação nas condições físicas do solo (IMHOFF, 2000).

A curva de resistência do solo pode ser utilizada para estabelecer tanto a umidade como a densidade do solo crítica, em que a resistência a penetração seria impeditiva para o crescimento radicular das plantas. A curva de resistência do solo pode ser determinada em amostras indeformadas ou diretamente no campo obtendo-se medidas da resistência a penetração

durante o secamento de um solo em distintos valores de densidade. Desta forma, na quantificação e descrição da curva de resistência do solo, são incorporados diferentes fatores associados com a degradação física do solo, permitindo estabelecer os valores críticos de densidade ou de umidade associados com valores limitantes de resistência a penetração (BLAINSKI et al., 2008).

2.3 Densidade do solo

Segundo Kiehl (1979) a densidade do solo é também denominada de densidade aparente, sendo a relação entre a massa de sólidos seco e a soma dos volumes ocupados pela parte sólida e gasosa. Assim, de maneira análoga quanto maior a densidade do solo maior a compactação, acarretando em uma menor porosidade total e maior dificuldade para o crescimento do sistema radicular das plantas.

A estrutura do solo em sistemas de plantio direto pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas em relação ao sistema de plantio convencional que apresenta igual ou menor densidade devido à ocorrência de maior teor de matéria orgânica e atividade biológica na superfície do solo (SILVA, 2000).

Thompson et al.,(1987) encontrou uma relação significativa entre a densidade radicular e a resistência à penetração medida pelo penetrômetro ($r^2 = 0,65$), mesmo que o crescimento dessas raízes no solo se de em diferentes direções.

Segundo Vieira e Muzilli (1984) o sistema de cultivo de plantio direto apresenta valores maiores de densidade do solo e resistência à penetração na camada superficial em relação ao sistema convencional. O mesmo aborda que a ocorrência é devida a associação do tráfego na área aliado ao não-revolvimento do solo, propiciando este comportamento do perfil em relação ao preparo convencional.

Entretanto, no plantio direto, os solos apresentam, em geral, na camada superficial, após três a quatro anos, maiores valores de densidade e

microporosidade e menores valores de macroporosidade e porosidade total, quando comparados com os do preparo convencional. Isto decorre, principalmente, do arranjo natural do solo, quando não é mobilizado, e da pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, sobretudo quando realizado em solos argilosos e com teores elevados de umidade (Vieira e Muzilli, 1984).

O crescimento das raízes em solos compactados deve-se ao balanço entre a pressão externa oferecida pelo solo, e a interna, exercida pela raiz, sendo a taxa de crescimento da raiz condicionada, primeiramente, pela menor pressão oferecida pelo solo do que pela maior pressão exercida pelas raízes. Estas podem crescer nas fendas do solo, principalmente quando as paredes do solo são constituídas por material de alta resistência à penetração ou densidade do solo elevada o suficiente para inibir o crescimento das raízes dentro dos agregados (Vepraskas et al., 1986; Thompson et al., 1987).

2.4 Porosidade do solo

Quando não ocorre apenas a análise da porosidade ou somente da porosidade total, a mesma é um importante atributo, pois é imprescindível a separação entre a macroporosidade e a microporosidade. Sendo que a macroporosidade é o volume dos macroporos em relação ao volume do solo e a microporosidade é constituída do volume de microporos em relação ao volume do solo. Logo, os macroporos desempenham no solo a função da capacidade de aeração, influenciando diretamente na capacidade de infiltração e do crescimento radicular enquanto os microporos têm a principal função de retenção da água e solutos no solo para absorção das plantas (KIEHL, 1979).

Segundo Abreu (2000) quando os poros são formados devido à ação das raízes os mesmos tendem a serem mais estáveis devido à decomposição dos microorganismos gerarem matérias cimentantes na parede desses poros os tornando mais duradouros quando os comparam aos formados por implementos mecânicos.

A permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo à água (BEUTLER et al., 2001).

A porosidade e a aeração do solo desempenham importante papel no crescimento das raízes. Shierlaw e Alston (1984) verificaram que a compactação do solo diminuiu o número de macroporos, similares em tamanho e diâmetro às raízes das plantas, e, desse modo, as raízes não puderam penetrar em poros de diâmetros menores que os seus.

Muitos esforços de pesquisa foram desenvolvidos tentando avaliar a estrutura do solo, onde não existe nenhum processo direto disponível para tanto. Mas o mesmo apresenta alguns fatores que são atribuídos como indicadores para esse estado de estruturação do solo como a densidade do solo, a macroporosidade e a relação macroporos/microporos. Todavia a estrutura poderá ser quantificada indiretamente através da medida de determinadas características físicas, como: análise de agregados, porosidade total e distribuição dos poros por tamanho. Gavande (1973), ainda explica que uma simples determinação da porosidade total não exprime condições de aeração efetiva do solo. As determinações da macro e microporosidade caracterizam melhor a correlação entre os espaços porosos. Quanto ao uso da macroporosidade e da relação macroporos/microporos Prevedello (1996) comenta não existir consenso na classificação de valores limites, variando nos diferentes estudos.

2.5 Umidade do solo

Solos agrícolas funcionam como um sistema que armazena água, nutrientes, ar e calor que posteriormente as sementes e plantas subtraem estes fatores para que apresentem um sistema radicular adequado e um ciclo completo no intuito de máxima produção e rendimento. Porém, os sistemas de preparo de solo devem levar em consideração tais fatores, pois quando

manejados incorretamente pode ocasionar a degradação dessa qualidade física (LETEY, 1985).

No fator manejo do solo, tanto quanto para os sistemas convencionais como para o sistema de plantio direto um fator muito importante é o intervalo hídrico ótimo, ou seja, a faixa de conteúdo de água no solo definida no limite superior pela umidade e capacidade de campo ou no conteúdo de água em que a aeração se torna limitante, ou no conteúdo de água em que a resistência do solo a penetração se torna limitante (KAY et al., 1997).

Quando há uma redução do teor de água conseqüentemente ocorre o aumento na resistência à penetração devida a uma coesão maior entre as partículas. Esse fator pode ser corrigido através da capacidade de campo do solo (BELTRAME et al., 1981).

Segundo Cintra et al. (1983) a umidade como um fator de gradiente em estudos comparativos tanto em áreas secas como em áreas úmidas pode ser usada na determinação do ritmo fenológico das comunidades.

3 METODOLOGIA

3.1 Localização da área de estudo

O experimento foi realizado no período de maio a outubro de 2018, nas dependências da Universidade Federal de Mato Grosso- UFMT, Campus Universitário de Rondonópolis- CUR, que possui coordenadas geográficas de 16°28' Latitude Sul e 50°34' Longitude Oeste e Altitude de 284 m. O tipo climático regional é predominantemente o Aw de Köppen (Tropical Chuvoso), caracterizado por ser um clima quente e úmido, com duas estações definidas: uma chuvosa, e outra seca coincidente com o inverno.

A área em estudo é constituída por Latossolo vermelho, não apresentando vegetação. A mesma é composta de uma estrutura de chapa de aço galvanizado com diâmetro de 4 m e 0,20 m de profundidade abaixo da superfície e 0,10 m acima, para facilitar a saturação do solo. No centro da parcela tem instalado um tubo de acesso para a medição da umidade volumétrica do solo.

3.2 Caracterização da área de estudo

Na caracterização da área de estudo foi realizada a determinação da porosidade e dos limites de consistências.

3.2.1 Porosidade do solo

Para a determinação da porosidade foram coletadas quinze amostras na camada de 0-60 cm e encaminhadas para estufas a 105 °C. Portanto, para a

determinação foi pesado um picnômetro vazio e uma porção de solo seco (Figura 1) para a determinação dos seus respectivos pesos.

Em seguida o picnômetro foi preenchido com água e pesado novamente, imediatamente foi acrescentado o solo com peso conhecido agitando vigorosamente, realizando assim a pesagem novamente do picnômetro com a mistura de água e solo (Figura 1). Tal procedimento foi efetuado para todas as amostras.

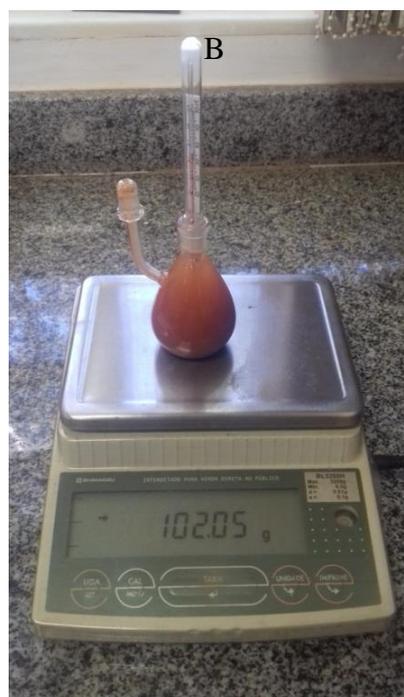


Figura 1- Pesagem de uma porção de solo (A) e pesagem do picnômetro cheio com água e solo (B).

O peso específico dos sólidos foi determinado através da equação (1):

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Onde:

γ_s - massa específico dos sólidos (Kg m^{-3});

M_s - Massa de sólidos (Kg);

V_s - Volume de sólidos (m^3);

A determinação da porosidade do solo foi realizada através da equação (2):

$$\alpha = 1 - \frac{D}{\gamma_s}$$

Onde:

α - Porosidade (%);

D- Solo seco/ volume do anel;

γ_s – Peso específico dos sólidos.

Tabela 1- Determinação do peso específico dos sólidos e porosidade da área de estudo.

Peso específico dos sólidos	Porosidade
2.5 g.cm ⁻³	43.2 %

3.2.2 Limites de consistência

A passagem gradual de um estado de consistência para outro é definido como limite de consistência. Se o solo apresenta umidade muito elevada o mesmo se apresenta como um fluido denso e à medida que se ocorre à evaporação da água o mesmo se endurece e perde sua capacidade de fluir, assim se a perda de umidade continuar ocorre à gradual passagem para o estado sólido. Logo, os limites de Atterberg são estabelecidos através de ensaios padronizados (CAPUTO, 1988).

A determinação do limite de liquidez foi realizada como descrito pela Embrapa (1997).



Figura 2- Peneiramento do solo (A) e prato de latão preenchido com solo úmido com a linha de escoamento do material ao centro feita com o auxílio do cinzel (B).

A determinação do limite de plasticidade foi realizada como descrito no manual de métodos de análise de solos pela Embrapa (1997).



Figura 3- Modelagem do solo de modo a obter um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (A) e porção do solo do local da fragmentação do cilindro (B).

O índice de plasticidade foi determinado através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Sendo a definição da zona que o terreno se encontra no estado plástico.

Tabela 2- Limites de consistência da área de estudo.

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
27,9 %	20,04 %	7,84 %

3.3 Amostragem

As amostras foram coletadas de modo a preservar a estrutura do solo em análise, onde após a coleta as mesmas foram identificadas e acondicionadas em papel filme para não ocorrer perda da umidade (Figura 4).



Figura 4- Identificação das amostras (A) e condicionamento das amostras (B) em campo.

Assim, após tais procedimentos as mesmas foram desembaladas e encaminhadas para devida limpeza e pesagem.

3.4 Resistência mecânica do solo a penetração

Para a avaliação da medição da resistência mecânica do solo a penetração foram utilizados dois penetrômetros, sendo um penetrômetro eletrônico a velocidade constante para avaliação da resistência a penetração em laboratório e um penetrômetro eletrônico com operação manual para avaliação da resistência a penetração em campo.

O penetrômetro eletrônico a velocidade constante modelo comercial MA 933/Marconi é um equipamento aplicável em laboratórios para testes de dureza, compactação e textura. Apresentam estrutura constituída de uma base e caixa em chapa de aço e haste de sustentação em aço inox AISI 304, com sistema mecânico de elevação e velocidade ajustável de 4 a 100 milímetros por minuto com indicação digital e célula de carga com capacidade máxima para 20 Kg. O Pino de penetração possui altura de 80 mm com ponta cônica angular a 30 graus. O registro de dados é obtido através da fonte de alimentação e amplificador para célula de carga, conversor analógico digital de 8 bits, e software para leitura da célula de carga gerando um arquivo texto final.

O penetrômetro com registro eletrônico dos dados, PLG 1020 penetroLOG® (Falker Automação, Porto Alegre, RS), é operado manualmente e depende da força do operador para a penetração da haste; trata-se de um equipamento que possui um sensor tipo sonar o qual indica a profundidade e compõe o cálculo da velocidade de penetração e avisa ao usuário se a velocidade está fora do padrão, anulando a medição. As medições podem ser armazenadas para análise no computador ou visualizadas instantaneamente. Através da medição da resistência à penetração do cone metálico no solo, o mesmo indica o valor da pressão correspondente à compactação do solo naquela camada. Possui um software que permite a visualização e a análise dos dados armazenados em um computador.

3.5 Primeiro Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual

Para a determinação da resistência a penetração do solo em campo em função da variação da umidade com o tempo, a área total do experimento utilizado para a aquisição dos dados foi saturada com auxílio de um tanque de água (Figura 5).



Figura 5- Saturação do solo da área de estudo.

As medições em campo para obtenção da relação da umidade do perfil com a resistência mecânica a penetração na profundidade de 0-60 cm foram realizadas no período de 22 de maio a 04 de junho compreendendo 30 avaliações. Assim, todos os dias que foram efetuados os testes também foram efetuados as medições da umidade.

Após a realização de cada teste os dados obtidos foram tabulados em planilha eletrônica para calcular a média dos valores da resistência a penetração e da umidade a cada 10 cm de todas as medições efetuadas em cada dia, obtendo assim a média total a cada 10 cm de ambos para posterior relação.

3.6 Segundo Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro de bancada.

Para efetuação das medidas da resistência mecânica a penetração com o penetrômetro eletrônico a velocidade constante, foi realizada a coleta de vinte amostras entre a camada de 0-20 cm sendo posteriormente identificadas e embaladas. Para todos os anéis utilizados foi realizada a pesagem (Figura 6) e as medições de diâmetro e altura após as avaliações da resistência mecânica a penetração para posterior determinação do volume, peso úmido e peso seco e da densidade do solo e conseqüentemente da umidade em cada amostra.

Logo para a determinação da resistência do solo a penetração em função da variação da umidade nas amostras, após a limpeza das amostras as mesmas foram saturadas (Figura 6) e pesadas.



Figura 6- Pesagem dos anéis (A) e saturação das amostras (B) no laboratório de física e mecânica do solo – UFMT, Rondonópolis- MT.

Para a obtenção da resistência a penetração em faixas de umidade diferentes, foram realizados os seguintes procedimentos:

1º procedimento: Após a saturação e pesagem das amostras as mesmas foram encaminhadas para estufa a 105° C por 2 horas. Em seguida as mesmas foram pesadas e encaminhadas para análise da resistência mecânica do solo a penetração.

2º procedimento: Posteriormente as amostras foram encaminhadas novamente para estufa a 70°C por um período de 15 horas. Em seguida foi realizada a pesagem e análise da resistência mecânica do solo a penetração.

3º procedimento: As amostras foram retornadas para estufa a 105°C por 3 horas realizando-se novamente a pesagem e análise da resistência mecânica do solo a penetração.

4º procedimento: Para a determinação do peso seco de cada amostra as mesmas foram conduzidas para estufa a 105°C por 24 horas.

A análise da resistência mecânica do solo a penetração foi obtida através do penetrômetro eletrônico à velocidade constante no período de 300 s com velocidade de 10 mm/min (Figura 7). O período que as amostras ficaram na estufa em cada procedimento foi determinado arbitrariamente de modo a obter a variação da umidade e da resistência a penetração nas três faixas de observação.



Figura 7- Medição da resistência mecânica do solo a penetração no laboratório de física e mecânica do solo – UFMT, Rondonópolis- MT.

3.7 Terceiro Experimento: Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual e penetrômetro de bancada

Para a comparação e avaliação dos dados entre os dois penetrômetros foi realizada as medições em campo nos dias 08, 11 e 18 de junho de 2018. Nos mesmos dias e locais das leituras da resistência a penetração foi efetuada após as medições a coleta de amostras para determinação da resistência a penetração com o penetrômetro de bancada.

Em cada dia de avaliação foram coletadas cinco amostras com três repetições cada, em diferentes profundidades na camada de 0-60 cm para a determinação da resistência mecânica do solo a penetração em laboratório (Figura 8).

Após as leituras da resistência a penetração as amostras foram pesadas e levadas para estufa por 24 horas a 105°C para a determinação da umidade.

Após a realização das avaliações os dados obtidos foram tabulados em planilha eletrônica para calcular a média dos valores obtidos da resistência a penetração com os dois penetrômetros.



Figura 8- Medição da profundidade para coleta das amostras (A) e coleta das amostras em diferentes profundidades na camada de 0-60 cm (B).

3.8 Modelos de ajustes da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro de bancada

Segundo Busscher et al. (1997), são necessários ajustes separados para a curva de resistência do solo à penetração, conforme se obtêm diferenças nos tratamentos. Dessa forma, após as avaliações com penetrômetro de bancada da resistência mecânica do solo a penetração os valores obtidos foram submetidos a quatro modelos de ajustes, afim de comparação a qual modelo melhor se ajustava aos fatores abordados, obtendo assim, a relação entre os valores da resistência a penetração com penetrômetro de bancada e os valores da resistência a penetração simulada através de cada modelo de ajuste.

O primeiro modelo de ajuste estudado ao quais os dados da resistência a penetração foram ajustados foi o de Busscher e Sojka (1987) através da equação 3:

$$RP = a\rho_d^b\theta_m^c$$

O segundo modelo estudado foi de Busscher et al., (1997), onde os dados da resistência a penetração em laboratório foram submetidos a equação 4:

$$RP = a \exp(b\theta_m)$$

O terceiro modelo ao quais os dados da resistência a penetração foram submetidos é o de Jakobsen e Dexter (1987), através da equação 5:

$$RP = \exp(a + b\rho_d + c\theta_m)$$

O quarto modelo estudado foi o de Mielke et al, (1994), onde os dados da resistência a penetração em laboratório foram submetidos através da equação 6:

$$RP = a\theta_m^b$$

3.9 Correção da resistência a penetração: método alternativo e comparação entre dois métodos de Busscher

Como a resistência à penetração varia em função da umidade, a comparação de medidas da resistência em períodos diferentes pode ser mascarada pela umidade do solo, gerando interpretações errôneas. Uma

alternativa é corrigir os valores de resistência medidos a uma umidade qualquer para um valor de referência.

A proposta de Busscher et al. (1990) foi corrigir a resistência utilizando a expressão:

$$RP_c = RP_0 + dC/d\theta \times (\theta_{ref} - \theta_0)$$

Onde:

RP_c: resistência à penetração corrigida;

RP₀: resistência à penetração medida;

dC/dθ: derivada de um modelo do tipo RP (θ_m);

θ_{ref}: umidade a base de massa de referência;

θ₀: umidade medida.

O modelo escolhido para calcular a correção (calcular dC/dθ) foi de Busscher et al., (1997) conforme maioria da literatura científica.

Para avaliar a correção da resistência à penetração, foram simulados dois testes com variação dos dados de umidade e densidade através do modelo de Busscher e Sojka (1987), através da equação 7:

$$RP = a\rho_d^b\theta_m^c$$

1º teste: Considerou-se uma densidade de 1,25 g/cm³ e umidade variando de 0,12 a 0,25. A resistência a penetração considerada como referência foi obtida para umidade de 20% utilizando o modelo exponencial ajustado anteriormente para garantir a independência dos dados.

2º teste: No segundo exemplo de correção utilizou-se um conjunto de dados com umidade variando de 0,058 a 0,394, e densidade de 1,27 g/cm³. A resistência a penetração de referência foi 1,87 MPa obtida para umidade de referência de 20%.

O método alternativo de correção da resistência à penetração em função da umidade consiste em:

1º conhecendo o comportamento da resistência à penetração em função da umidade para certo tipo de solo e para uma faixa de densidade do solo,

calcula-se a diferença entre a resistência à penetração para uma umidade qualquer e a resistência à penetração na umidade de referência;

2° ajusta-se um modelo de regressão entre as diferenças obtidas anteriormente em função da umidade do solo;

3° por fim, em medições posteriores de resistência a penetração, deve-se adicionar ou subtrair o valor obtido em campo da correção verificada pelo modelo de regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação em campo da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade

Pode-se verificar que em todas as seis avaliações da resistência mecânica do solo a penetração realizada em dias distintos no campo em função da variação da umidade presente em cada dia apresenta correlação, onde quanto menor a umidade apresentada no solo maior à resistência mecânica a penetração do mesmo. Pode-se afirmar com base nos dados que a resistência a penetração diminui com o aumento da umidade. Logo, solos mais úmidos podem se tornar mais susceptíveis a compactação.

Analisando os valores do coeficiente de determinação (R^2), indica uma alta regressão em relação à primeira e a sexta avaliação nas estimativas da resistência do solo à penetração em função da umidade.

As figuras a seguir demonstram a variação da resistência mecânica à penetração do solo em função da umidade em condições de campo.

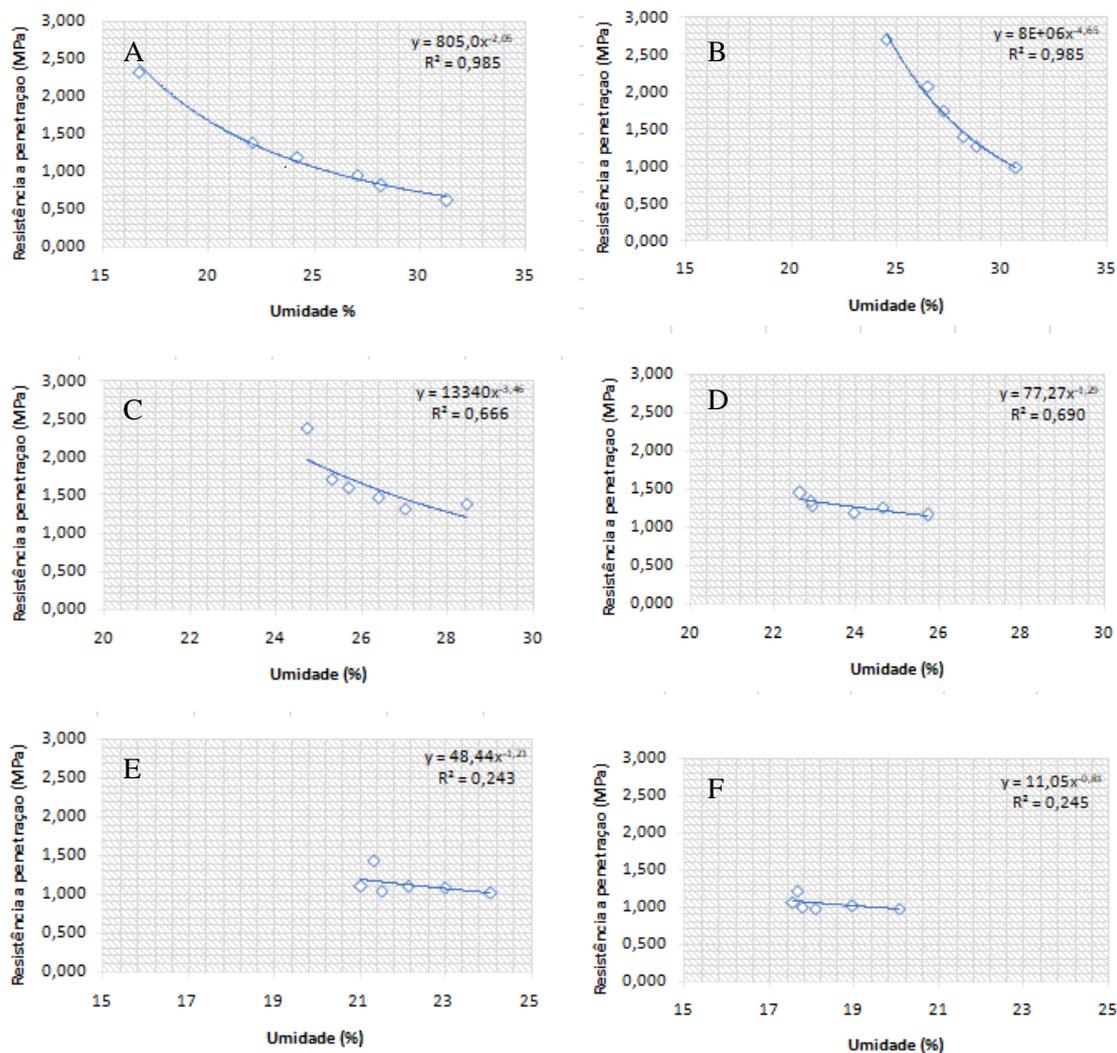


Figura 9- Variação em campo da resistência mecânica a penetração em função da umidade em diferentes profundidades. Profundidade de 0-10 cm (A). Profundidade de 10-20 cm (B). Profundidade de 20-30 cm (C). Profundidade de 30-40 cm (D). Profundidade de 40-50 cm (E). Profundidade de 50-60 cm (F).

4.2 Equação ajustada da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade em laboratório

Após o resultado das avaliações da resistência mecânica do solo a penetração (RMSP) em função da umidade em cada amostra, foi ajustada uma equação que melhor se ajustava ao modelo. Observa-se que ocorre correlação entre o teor de umidade presente na amostra e a RMSP. A umidade causa a alteração da coesão entre as partículas do solo (Beltrame et al., 1981). Assim,

quando o solo apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas por qualquer força externa, justificando os valores mais elevados com a diminuição da umidade.

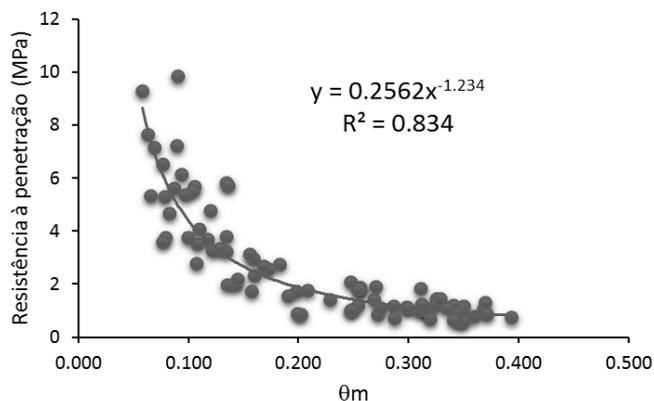


Figura 10- Variação em laboratório da resistência mecânica do solo à penetração em função da umidade (θ_m).

4.3 Modelos de ajustes da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro de bancada

Observa-se que todos os ajustes, para as quatro equações, apresentaram alta qualidade de conformação, quando ressalva os valores do coeficiente de determinação (R^2), indicando alta precisão nas estimativas da resistência do solo à penetração.

O primeiro modelo estudado foi de Busscher e Sojka (1987), onde os dados da resistência a penetração foram ajustados obtendo valor de 0.88 de coeficiente de determinação.

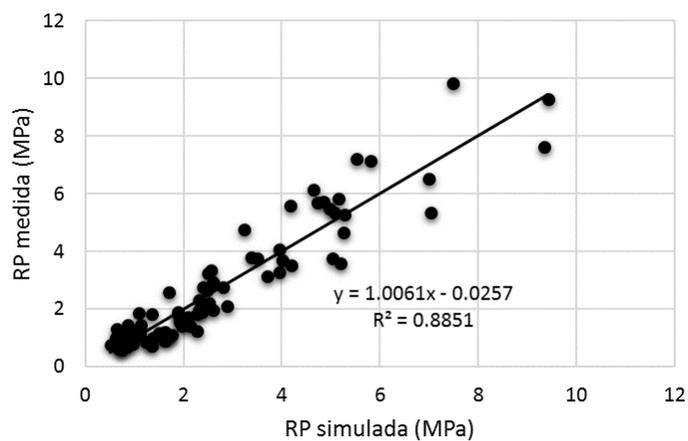


Figura 11- Modelo Busscher e Sojka (1987).

O segundo modelo estudado foi de Busscher et al., (1997), onde os dados da resistência a penetração foram ajustados obtendo valor de 0.78 de coeficiente de determinação.

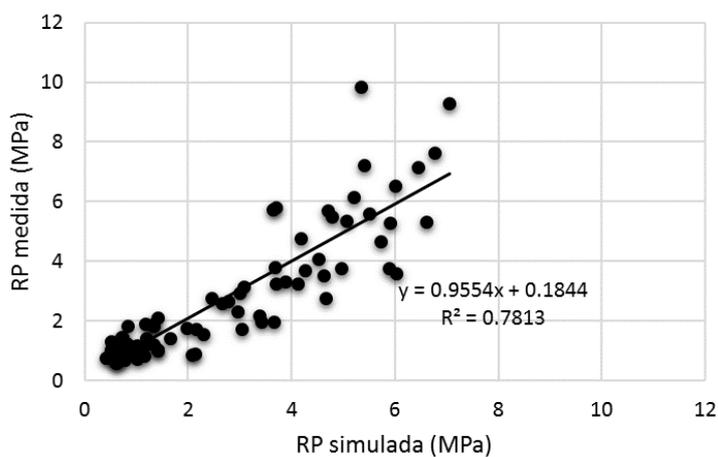


Figura 12- Modelo de Busscher et al., (1997).

O terceiro modelo ao quais os dados da RP foram submetidos é o Jakobsen e Dexter (1987), obtendo valor de aproximadamente 0.90 (Figura 13) de coeficiente de determinação.

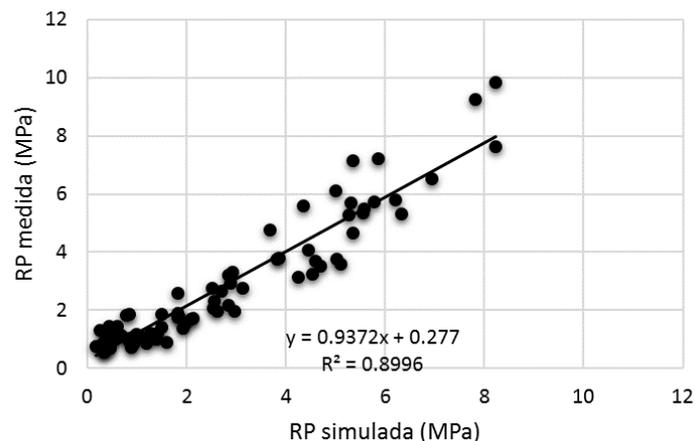


Figura 13- Modelo Jakobsen e Dexter (1987).

Para o modelo de Mielke et al, (1994) o coeficiente de determinação apresentou valor de 0.787 (Figura 14).

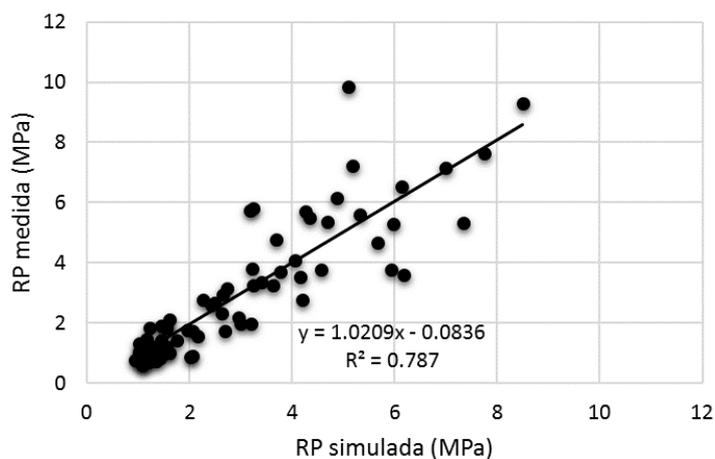


Figura 14- Modelo de Mielke, et al (1994).

Portanto, após a submissão dos dados da RP medida e da RP simulada com a obtenção dos coeficientes de determinação de cada modelo, observa-se que para os dados e fatores abordados todos os modelos testados apresentaram alto coeficiente de determinação, porém o modelo de Jakobsen e Dexter (1987) apresentou maior ajuste para a curva de resistência do solo a penetração.

4.4 Estimativa da densidade do solo através da resistência a penetração

Com a determinação da densidade do solo medida foi realizada uma densidade do solo simulada através da inversão da equação de resistência a penetração, através do modelo de Busscher e Sojka (1987). Assim, pode-se verificar na figura 15 que houve relação entre a densidade medida e simulada do solo.

Beltrame et al. (1981) afirmam que, para uma dada mudança na densidade, ocorre uma mudança no mesmo sentido da resistência do solo à penetração, isto é, há uma relação direta entre a densidade do solo e a resistência do solo à penetração.

De acordo com Richart et al. (2005), o aumento excessivo da densidade do solo pode acarretar em redução no volume total de poros, menor taxa de infiltração de água e maior resistência do solo a penetração, devido ao arrançamento e adensamento das partículas do solo que, por sua vez, refletem nas características do sistema poroso e no crescimento radicular.

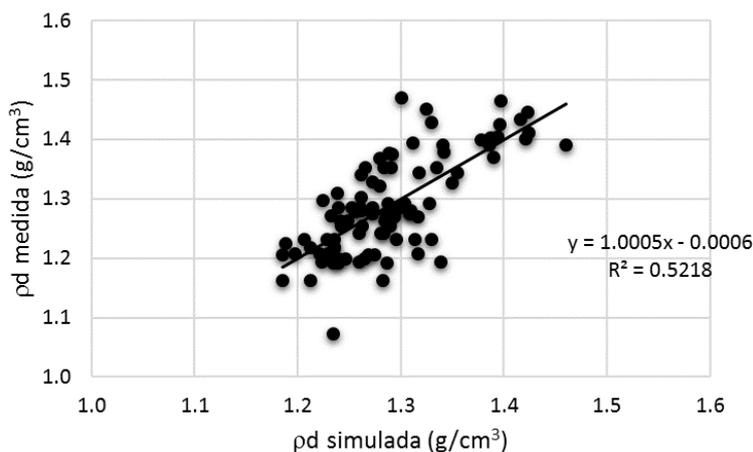


Figura 15- Estimativa da densidade através da inversão do modelo de Busscher e Sojka (1987).

4.5 Avaliação da resistência mecânica com penetrômetro manual e penetrômetro de bancada

De forma geral, os valores obtidos pelos dois penetrômetros divergiram significativamente, assim a avaliação da RMSP em campo quando comparadas com a de laboratório obteve menores valores quando submetidos a uma mesma faixa de umidade. De acordo com Beutler et al. (2007) a diferença entre os valores de RP em função do equipamento de penetrometria pode ser relacionada ao modo de operação.

Beutler et al., (2007) e Vogel et al., (2017), ao compararem dois penetrômetros, observaram que os valores obtidos pelos mesmos divergiram significativamente, sendo que o penetrômetro de impacto apresentou valores superiores de RP quando comparado com um penetrômetro eletrônico.

Corroborando com Leite et al., (2010) no estudo sobre os comportamentos de um penetrômetro eletrônico e de um penetrômetro manual em resistência mecânica à penetração conhecida. Os pesquisadores observaram que a resistência do solo à penetração foi maior para o penetrômetro eletrônico, demonstrando a eficácia e a maior sensibilidade do equipamento para detectar a real resistência oferecida.

A figura abaixo demonstra a comparação dos valores da resistência mecânica do solo a penetração em campo e laboratório em função da umidade do solo.

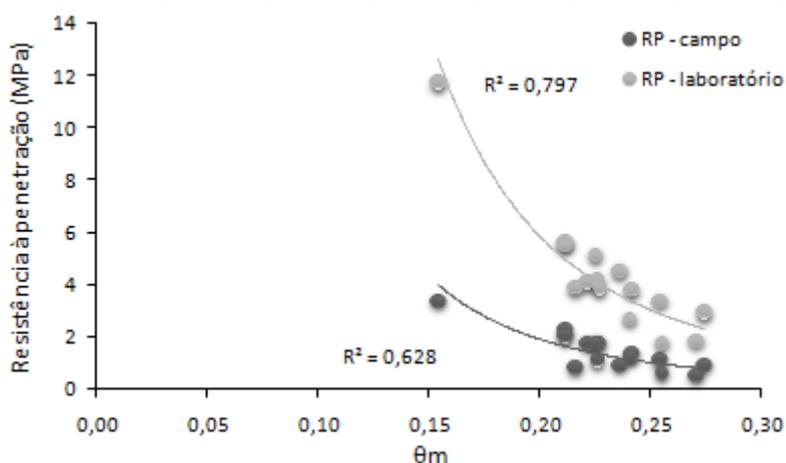


Figura 16- Comparação da resistência a penetração em campo e laboratório em função da umidade.

Com a aplicação do teste t- Student (Tabela 3) para a comparação das duas amostras em par para médias observando os valores obtidos da RMSP em campo e laboratório se ressalva a correlação entre ambos os resultados (Figura 17).

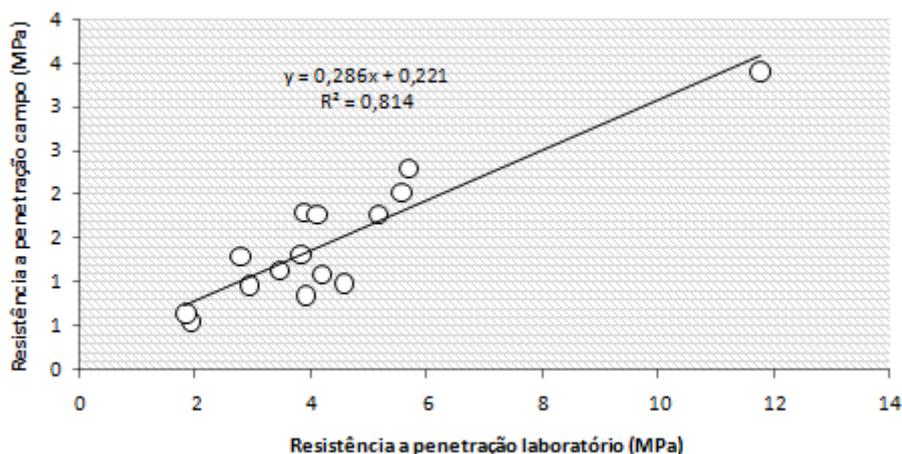


Figura 17- Comparação da resistência a penetração em campo e laboratório.

Tabela 3- Teste-t: duas amostras em par para médias.

	<i>RP lab</i>	<i>RP campo</i>
Média	4357.67	1469.80
Variância	5518387.10	555677.33
Observações	15.00	15.00
Correlação de Pearson	0.90	
Hipótese da diferença de média	0.00	
gl	14.00	
Stat t	6.55	
P(T<=t) uni-caudal	0.00	
t crítico uni-caudal	1.76	
P(T<=t) bi-caudal	0.00	
t crítico bi-caudal	2.14	

4.6 Correção da resistência a penetração: método alternativo e comparação entre dois métodos de Busscher

Para o primeiro teste a avaliação da correção da resistência à penetração foi com densidade de $1,25 \text{ g/cm}^3$ e umidade variando de 0,12 a 0,25, sendo a umidade padrão de 0,2. A figura abaixo representa o resultado da simulação de correção da resistência à penetração.

Nota-se que com o modelo de Busscher et al., (1997) as diferenças entre os dados corrigidos e a resistência de referência, foram maiores nos maiores valores de umidade do solo. O método de correção proposto apresentou variações mais suaves, não divergindo acentuadamente o valor de referência (Figura 18).

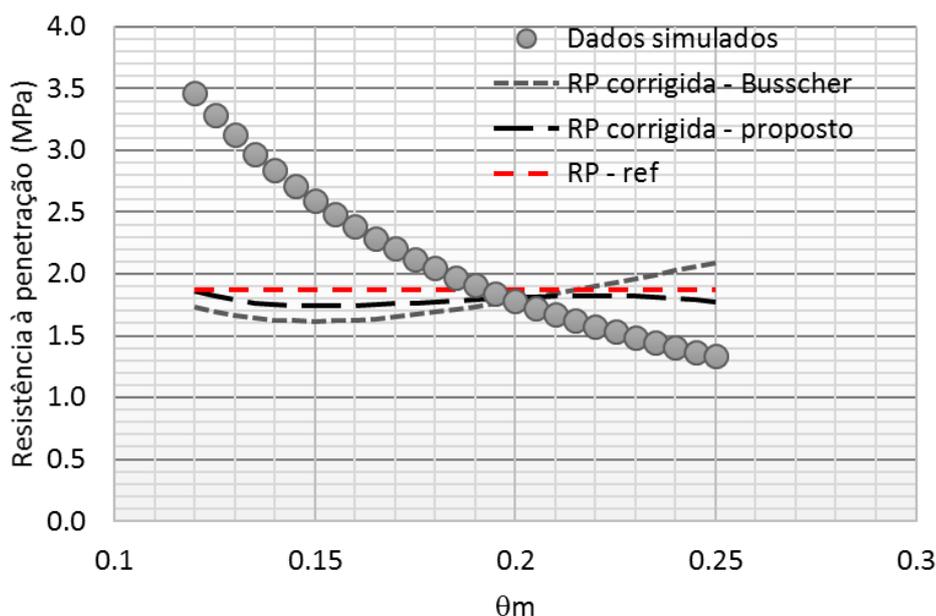


Figura 18- Correção dos dados da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade padrão.

No segundo teste de correção utilizou-se um conjunto de dados com umidade variando de 0,058 a 0,394, e densidade de $1,27 \text{ g/cm}^3$, sendo a umidade padrão de 0,2. Nessa situação, a soma de quadrados dos desvios foi de 34,56 para o método proposto e 26,70 para o método Busscher. Entretanto,

nota-se que as maiores variações ocorrem para valores de resistência obtidas em umidades menores do que a umidade de referência. Quando se considera valores cuja umidade estão acima da referência, a soma de quadrados dos desvios foi de 2,97 para o método proposto e 12,16 para o método Busscher.

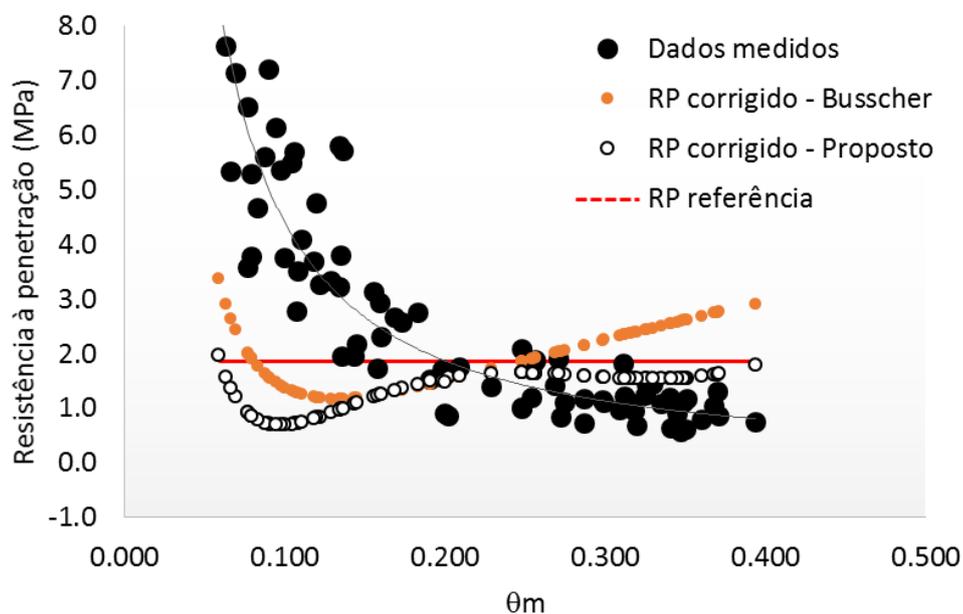


Figura 19- Correção dos dados da resistência mecânica do solo a penetração em função da umidade padrão - método proposto e método de Busscher.

No método alternativo, observa-se que a diferença da variação da resistência a penetração medida e de referencia apresenta valores menores para os maiores valores de umidade, característica essa observada nos gráficos anteriores. Essa característica é decorrente de que quanto maior a umidade do solo maior a lubrificação entre as partículas do solo facilitando a introdução do aparelho no solo.

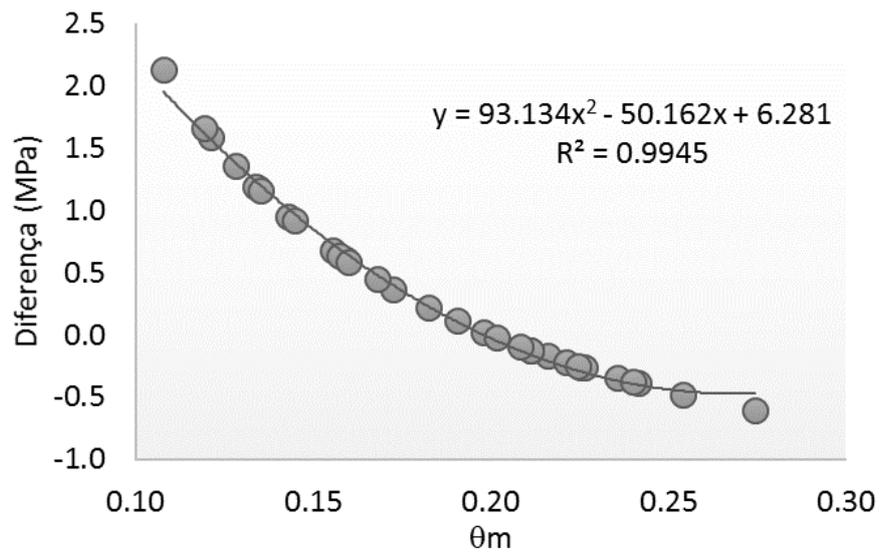


Figura 20- Diferença entre dados de resistência mecânica do solo a penetração medidos e a resistência de referência ($R_{Pref} = 1,87$ MPa; $\theta_m = 0,20$).

5 CONCLUSÃO

A umidade influencia diretamente na resistência mecânica do solo a penetração.

Os modelos testados apresentaram alto coeficiente de determinação, porém o modelo de Jakobsen e Dexter (1987) apresentou maior ajuste para a curva de resistência do solo a penetração.

Existe divergência significativa nos valores de resistência a penetração para uma mesma faixa de umidade quando comparado os valores obtidos pelo penetrômetro eletrônico a velocidade constante e pelo penetrômetro eletrônico com operação manual.

O penetrômetro eletrônico a velocidade constante apresenta melhor resolução dos dados comparados ao penetrômetro eletrônico com operação manual.

O penetrômetro eletrônico com operação manual por depender da força do operador apresenta menor sensibilidade na avaliação dos dados em campo, pois um solo com baixa umidade apresenta alta resistência mecânica exigindo do operador muito esforço.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, S.L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. 2000. 65p. Dissertação Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32. p.975-983, 2008.

BRAIDA, J.A. et al. 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. p.605-614, 2006.

BELTRAME, L.F.C.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, F.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5. p.145-149, 1981.

BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth responses: a review of experimental techniques and root growth responses. **J. Soil Sci.**, v.41. p.341-358, 1990.

BEUTLER, A.N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25. p.167-177, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, 2007.

BUSSCHER, W.J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**. v.43. p.205-217, 1997.

BUSSCHER, W. J; SOJKA, R.E. Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage. **Trans. Asae**. v.30. p.888-892, 1987.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. **Embrapa Meio Ambiente**, Piracicaba, p. 132, 1997.

CAPUTO, H.P. Plasticidade e consistência dos solos. In: CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos. 1988. p.52-56.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.197-201, 1983.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.443-450, 1983.

COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um latossolo bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de ciência do solo**. p.527-535, 2003.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Rio de Janeiro. 388 p. 2005.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 11. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA solos. 1997.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.3, p.487-493, 2000.

GAVANDE, S.A. **Física de suelos: principios e aplicaciones**. México, Limusa, 1973.

GODEFROY, J.; JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et les apports organiques em conditions tropicales; comparasion avec les sols forestiers. **Fruits**, Paris, v.30, p.595-612, 1975.

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **J. Soil Water Conserv.**, v.55. p.69-78, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.35. p.1493-1500, Julho. 2000.

JAKOBSEN, B. F.; DEXTER, A.R. Effect of soil structure on wheat root growth, water uptake and grain yield. A computer simulation model. **Soil Tillage and Research**. vol.10. p.331-345, 1987.

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

KIEHL, A. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres. 262 p. 1979.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, v.30, p.959-964, 2000.

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

LEITE, F.; SANTOS, J. E. G.; LANÇAS, K. P. Comparação da resistência do solo à penetração entre penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual. **Cultivando o Saber**, v.3, p.32-39, 2010.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv.Soil**. Califórnia, v. 1, n. 2, p. 277-294, 1985.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de

Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

MIELKE, L. N; et al. Estimating soil water content from soil strength. **Soil Tillage and Research**. vol.31. p.199-209. 1994.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo**. Curitiba: C. L. Prevedello, 1996. 446p.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.289-298, 1988.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, maio 1999.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.60, p.73–87, 2001.

SILVA, V.R; REINERT, D.J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria. v. 30, n. 5. p.795-801, 2000.

SILVA, V.R.; et al. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24. p.191-199, 2000.

SILVA, J.G. **Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)** 1992. 180 p. Tese de Doutorado. Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

SHIERLAW; J. & ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant Soil**, The Hague, v.77. p.15-28,1984.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 229- 235. 1991.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25. p.395-401, 2001.

TAVARES, M.H.F.; FELICIANO, J.J.S.; VAZ, C.M.P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DO SOLO: Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira, 31, 2008, Serrano Centro de Convenções, **Irriga**, p. 517-524, 2008.

THOMPSON, P.J., JANSEN, I.J., HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1288-1293, 1987.

VEPRASKAS, M.J., MINER, G.S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.50, p.423-427, 1986.

VIEIRA, M.J. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19. p.873-882, Julho, 1984.

VOGEL, F. G.; et al. Avaliação dos penetrômetros de impacto e eletrônico na determinação da resistência mecânica a penetração do solo. **Revista Scientia Agrária**. vol.18, n.3, p. 30-36, 2017.