
NOTA TÉCNICA:**RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM FUNÇÃO DA SUA UMIDADE E DO TIPO DE PENETRÔMETRO**

Elder Barboza de Souza¹, Antonio Pereira Patrocínio Filho², Wisy Alves Pimenta³, Hideo de Jesus Nagahama⁴, Jorge Wilson Cortez⁵

RESUMO

Com o advento da mecanização agrícola o solo passou a receber uma maior pressão dos pneus das máquinas, que pode ocasionar zonas de impedimento ao desenvolvimento radicular das plantas. O objetivo do trabalho foi avaliar a resistência mecânica do solo a penetração (RP) com penetrômetro eletrônico e de impacto em condições de umidade em área cultivada anteriormente por sorgo forrageiro. O experimento foi conduzido no Campus das Ciências Agrárias da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Petrolina (PE). A coleta de dados da RP foi realizada com penetrômetro eletrônico e de impacto em condições de umidade (3,5 e 6,7%) nas profundidades de 0,00 a 0,50 m, sendo os penetrômetros posicionados a 0,20 m um do outro para a coleta. Para o penetrômetro de impacto verificaram-se altos valores de RP, e não houve diferença nos valores de RP nas diferentes condições de umidade. Para o penetrômetro eletrônico verificou-se que em baixas condições de umidade não se conseguiu realizar a penetração no solo, e que até a camada de 0,30 m verificou-se diferença nos valores de RP, sendo menor na maior umidade do solo. Ocorreu relação entre a umidade e o valor da RP para o penetrômetro eletrônico.

Palavras-Chave: física do solo; compactação do solo; mecanização agrícola.

ABSTRACT**MECHANICAL RESISTANCE TO PENETRATION OF SOIL IN FUNCTION OF MOISTURE CONTENT AND PENETROMETER TYPE**

With the advent of mechanized farming the soil began to receive greater pressure from tires of the machines, which can result in areas of impeded root growth. The object of this study was to evaluate the soil mechanical resistance to penetration using an electronic penetrometer and impact in moisture conditions for an area previously cultivated with sorghum. The experiment was conducted at the Campus of Agricultural Sciences, Federal University of São Francisco Valley - UNIVASF, Petrolina (PE), Brazil. Data collection of mechanical resistance to penetration was performed using an electronic penetrometer and impact in moisture content conditions (3.5 and 6.7%) at depths from 0.00 to 0.50 m. The penetrometers were placed 0.20 m from each other for collection. For the impact penetrometer of mechanical resistance to penetration high values were encountered, and there was no difference in values at different moisture contents. For the electronic penetrometer it was found that at low moisture content conditions no soil penetration was observed, and in the layer to 0.30 m there was a difference in resistance values, being lower in soil with higher moisture content. There was a relationship between the moisture content and the value of mechanical resistance for the electronic penetrometer.

Keywords: soil physics; compaction of the soil; agricultural mechanization.

Recebido para publicação em 25/02/2013. Aprovado em 03/12/2013.

- 1 - Graduando em Engenharia Agrônoma da UNIVASF, Petrolina, PE. E-mail: elder.barboza@hotmail.com Bolsista FACEPE
- 2 - Graduando em Engenharia Agrônoma da UNIVASF, Petrolina, PE. E-mail: ap.patrocinio@hotmail.com; Bolsista CNPq.
- 3 - Graduando em Engenharia Agrônoma da UNIVASF, Petrolina, PE. E-mail: wisy.pimenta@hotmail.com. Bolsista CNPq.
- 4 - Eng. Agrônomo, Mestre, da UNIVASF, Petrolina, PE. E-mail: hideo.nagahama@univasf.edu.br
- 5 - Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, FCA/UFMG, Dourados, MS. E-mail: jorge.cortez@yahoo.com.br Bolsista de Produtividade do CNPq

INTRODUÇÃO

A utilização intensiva de máquinas e equipamentos agrícolas em todas as etapas de produção pode ocasionar mudanças nos atributos físicos do solo, que podem ser observadas em superfície ou subsuperfície, como consequência da formação de camada compactada (ROQUE *et al.*, 2003).

Para Seixas (1988), os solos altamente porosos são mais susceptíveis ao processo de compactação que os menos porosos, e o controle do tráfego de máquinas é medida importante para se evitar a compactação adicional, que é definida por Lopes *et al.* (2006) como o aumento da densidade do solo em função do rearranjo das partículas primárias (argila, silte e areia).

Pode-se diagnosticar a compactação por meio de métodos científicos ou práticos, os primeiros requerem aparelhos específicos e são de grande confiabilidade como a densidade e a porosidade do solo, enquanto que os métodos práticos informam o resultado de forma mais rápida, como os penetrômetros (CARVALHO FILHO *et al.*, 2004). A penetrometria é uma técnica quantitativa muito utilizada devido à facilidade, rapidez e a possibilidade de se efetuar grande número de repetições na obtenção de dados, embora possam ocorrer dificuldades na interpretação dos resultados obtidos, devido à dependência desses em relação à umidade (SILVEIRA *et al.*, 2010).

Os penetrômetros mais utilizados para a avaliação da compactação são denominados em função do seu princípio de penetração, sendo estáticos em que o conjunto é pressionado contra o solo, e a resistência à penetração é registrada em um dinamômetro; ou dinâmicos, que possuem uma haste que penetra o solo em decorrência do impacto de uma massa que cai em queda livre de uma altura constante (STOLF, 1991).

Com o uso do penetrômetro é possível identificar no perfil do solo barreiras impeditivas ao crescimento radicular das plantas (MAGALHÃES *et al.*, 2009) e esse diagnóstico pode auxiliar na tomada da decisão de qual operação de preparo do solo irá atender ao rompimento dessa camada.

No campo, a resistência mecânica do solo à penetração (RP) é bastante variável, sendo muito

influenciada pelas condições do manejo do solo e intensidade de tráfego das máquinas agrícolas, e é dependente da umidade do solo (SILVA *et al.*, 2004). Tormena *et al.* (1998) consideraram que a RP foi fortemente influenciada pela densidade do solo, corroborando com Serafim *et al.* (2008), no entanto, estes últimos autores também verificaram variação inversamente proporcional da RP em função da umidade.

O objetivo do trabalho foi avaliar a resistência mecânica do solo à penetração utilizando penetrômetro eletrônico e de impacto, sob duas condições de umidade, em um Argissolo cultivado anteriormente por sorgo forrageiro.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Campus de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF em Petrolina (PE), que se localiza em 09°23' latitude Sul e longitude 40°30' longitude Oeste, a uma altitude de 376 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima desta região apresenta-se como tropical semiárido, tipo BshW, seco e quente na parte norte e semi-árido quente estípico na parte sul, caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações com chuvas no verão e forte evaporação em consequência das altas temperaturas. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo, textura arenosa, segundo Amaral *et al.* (2006) que utilizaram o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). A composição granulométrica do solo é apresentada no Quadro 1.

A área experimental possui um sistema linear de irrigação para manutenção da umidade durante a condução de culturas e coleta de dados de solo. Antes da implantação do experimento a área foi cultivada com sorgo forrageiro em sistema de preparo convencional do solo, o qual foi submetido a três cortes para produção de forragem

Para a análise da RP, foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, desenvolvido por Stolf *et al.* (1983), com as seguintes características: massa de 4 kg com impacto em curso de queda livre de 0,40 m; cone com 0,0128 m de diâmetro, área de 1,29 cm² e ângulo sólido de 30°; haste com diâmetro aproximado

Quadro 1. Composição granulométrica para as camadas do Argissolo Amarelo

Camadas (m)	Argila	Areia	Silte
	-----kg kg ⁻¹ -----		
0,00 – 0,10	0,090	0,878	0,032
0,10 – 0,20	0,100	0,883	0,017
0,20 – 0,30	0,080	0,852	0,068
0,30 – 0,40	0,140	0,807	0,053
0,40 – 0,50	0,180	0,742	0,078

Fonte: Adaptado de Cortez *et al.* (2011).

de 0,01 m. Os dados de RP foram anotados até a profundidade de 0,50 m e transformados para MPa (STOLF, 1991). O penetrômetro eletrônico manual utilizado segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3, cone na parte inferior com 0,0128 m de diâmetro, sendo composto de um módulo eletrônico acoplado a uma haste dividida em duas partes, sendo coletados os dados de RP a cada um centímetro.

Os tratamentos constituíram-se da combinação de duas umidades (3,5 e 6,7%) com faixas de profundidade, sendo cinco para o penetrômetro de impacto (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m) com arranjo fatorial de 2x5 e três para o penetrômetro eletrônico (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) em esquema fatorial 2x3, com 13 repetições para cada equipamento; sendo os penetrômetros analisados separadamente. No momento da avaliação da RP, os dois aparelhos foram distanciados a 0,20 m um do outro.

As umidades do solo foram quantificadas, utilizando-se o método gravimétrico (EMBRAPA, 1997) em amostras de solo coletadas com 03 repetições, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m dentro de cada parcela. A diferenciação na umidade do solo foi obtida pela coleta de amostras em dois dias diferentes após a irrigação da área.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando o valor do teste F (Fisher) foi significativo a 5% de probabilidade, realizou-se o teste de Tukey para a comparação de médias (PIMENTEL-GOMES, 2000) para cada penetrômetro, separadamente. Utilizou-se para a análise dos dados

o programa para computador ESTAT 2.0 - Sistema para Análises Estatísticas (ESTAT, 1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade do solo (Figura 1), na primeira condição (dia 1), chegou próxima a 12% (capacidade de campo), entretanto, com o aumento em profundidade, observou-se diminuição até a estabilização em torno de 5%. Para a segunda condição (dia 2), a umidade do solo não decresceu abruptamente como verificada no dia 1; ocorrendo valor máximo próximo de 5% e posterior estabilização próxima de 3%.

No primeiro dia observou-se maior valor percentual de umidade, principalmente nas primeiras camadas de coleta (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m) (Figura 1). Os maiores valores de umidade nas camadas mais superficiais do solo podem ser explicados provavelmente pelo maior adensamento das partículas nas camadas mais profundas. Quando determinada pressão externa é aplicada ao solo por máquinas, ocorre um novo acomodamento e/ou disposição das partículas, diminuindo o espaço poroso do solo, resultando em incremento dos valores de densidade e resistência à penetração e, conseqüentemente, favorecimento de formação de camada compactada (STRECK *et al.* 2004; DEDECK; GAVA, 2005), lembrando que também pode ocorrer formação de camada adensada pela eluviação de argila do horizonte A no perfil do solo, característica essa típica de Argissolos. Assim, a compactação/adensamento faz com que a percolação da água torne-se limitado.

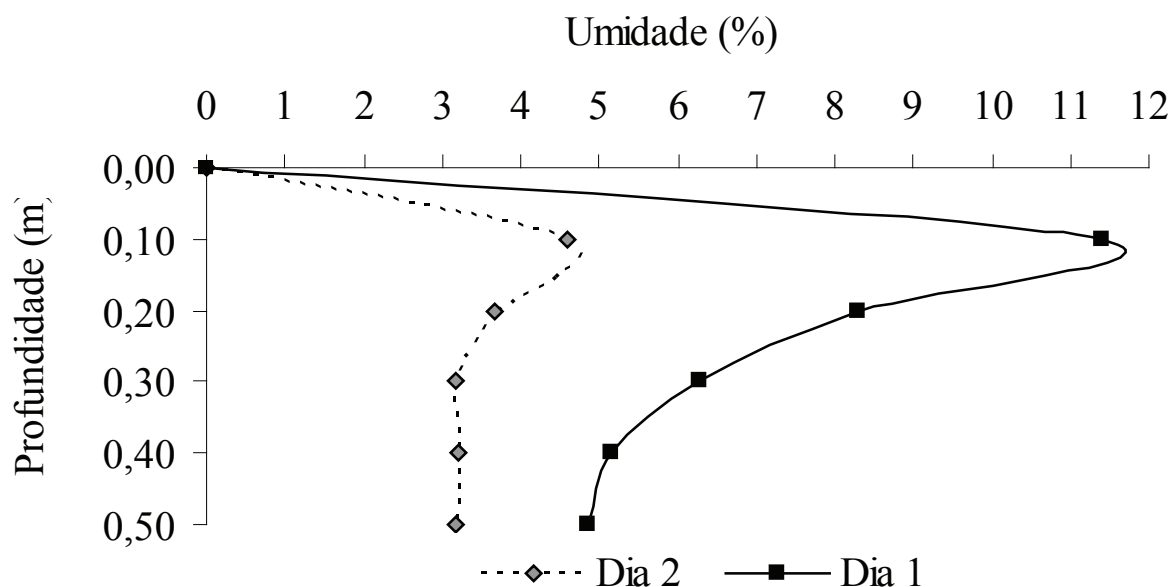


Figura 1. Umidade no perfil do Argissolo Amarelo.

Penetrômetro de impacto

A independência dos valores da RP nas camadas em função da umidade (Quadro 2) é confirmada pelo teste de Fisher (F), e verifica-se que a interação umidade x camadas não foi significativa, talvez devido ao alto valor do coeficiente de variação (CV), que, segundo Pimentel-Gomes (2000), é considerado muito alto.

Os valores da resistência mecânica do solo a penetração (RP), obtidos utilizando-se o penetrômetro de impacto, foram significativamente ($P < 0,01$) diferentes nas camadas de solo (Quadro 2), já para a umidade não, mostrando que a mesma não interferiu na RP, visto que para os valores de umidade as médias da RP não diferiram pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Diferentemente deste trabalho, Silveira *et al.* (2010) encontraram relação entre a umidade e a resistência mecânica do solo a penetração em um Argissolo Amarelo, com os dados coletados com penetrômetro de impacto.

Os resultados de RP (Quadro 3) indicaram maior compactação entre as camadas de 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m, 46,8 e 43,3 MPa, respectivamente. Estes valores estão muito acima do considerado como crítico ao crescimento radicular das plantas, que, segundo Tormena *et al.* (1998) e Iaia *et al.* (2006) é de 2,0 MPa, e em torno de 6,5 MPa para Torres e Saraiva (1999). Para Lipiec e Hatano (2003) *apud* Lanzasova *et al.* (2007), valores a partir de 3,0 a 4,0 MPa já podem paralisar o crescimento das raízes.

Os elevados valores de RP (Quadro 3), nas camadas

do solo mais profundas, podem ser explicados pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas, como o uso de arado e grade no preparo do solo, formando o “pé de arado ou de grade”. Segundo Silveira *et al.* (2010), quando o solo está seco ou apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas por qualquer força externa. Os autores citados acima encontraram para o Argissolo Amarelo cultivado com *Citrus* maiores valores de RP nos menores valores de umidade do solo, que aconteceu no mês de novembro, sendo os valores máximos de RP de 33,18 MPa na camada de 0,20-0,40 m.

Para as camadas iniciais 0,00-0,1; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Quadro 3), observam-se os menores valores de RP, provavelmente devido ao revolvimento das camadas superficiais durante o preparo do solo, como a maior umidade do solo. Situação semelhante também foi verificada por Nagahama (2013), quando avaliou o efeito ocasionado pelo preparo periódico do solo e da velocidade deslocamento do conjunto trator-equipamento sobre os atributos físicos do solo na cultura do sorgo forrageiro. Souza e Alves (2004) lembram que adequadas práticas de manejo do solo apresentam maiores capacidades de infiltração e condutividade hidráulica do solo, resultando em menor RP.

Observa-se que tanto na maior umidade do perfil do solo (6,7%) quanto na menor umidade (3,5%) as curvas de RP (Figura 2) foram semelhantes, podendo-se neste caso inferir que a umidade do

Quadro 2. Análise de variância da resistência mecânica do solo à penetração para os fatores umidade do solo e camadas do solo para o penetrômetro de impacto, em Petrolina, PE, Brasil

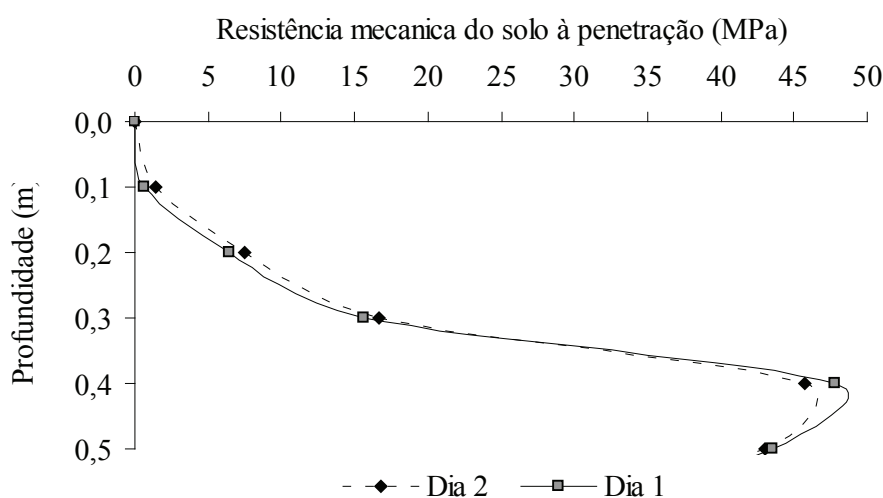
Causa de variação	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)
Umidade do solo	0,0001 ^{ns}
Camadas do solo	20,73 ^{**}
Umidade do solo x Camadas do solo	0,02 ^{ns}
Coefficiente de variação (%)	102,46

^{ns}: não significativo ($P > 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$).

Quadro 3. Resistência mecânica do solo à penetração em função da umidade do solo e camadas do solo para o penetrômetro de impacto, em Petrolina, PE, Brasil

Fatores	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)
Umidade do solo (%)	
3,5	22,90 a
6,7	22,88 a
Camadas do solo (m)	
0,00-0,10	1,21 b
0,10-0,20	6,98 b
0,20-0,30	16,18 b
0,30-0,40	46,78 a
0,40-0,50	43,28 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey.

**Figura 2.** Curva da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro de impacto em função da umidade média de perfil do solo de 6,7% (Dia 1) e de 3,5% (Dia 2).

solo não interferiu nos valores de RP (Quadro 2). Verifica-se que na camada 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m existe um valor muito elevado da RP, isso pode ser devido à existência de faixa compactada do solo, camada essa conhecida vulgarmente como “pé-de-arado ou pé-de-grade”, pois logo após essa camada os valores de RP tendem a diminuir.

Penetrômetro eletrônico

Em condições de baixa umidade do solo não se conseguiu atingir a profundidade máxima (0,50 m) de penetração para o penetrômetro eletrônico.

Os valores de RP obtidos para o penetrômetro eletrônico (Quadro 4) diferiram significativamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, nas duas condições de umidade do solo (3,5 e 6,7 %), mostrando que para o penetrômetro eletrônico, a umidade é um fator que apresenta relação com a RP, como também foi verificado por Assis *et al.* (2009) na avaliação da RP com a variação da umidade do solo em Latossolo e Nitossolo. Isso pode estar

associado à característica manual da penetração do equipamento, dependente do operador.

A interação entre os fatores umidade do solo x camadas do solo (Quadro 4), também foi significativa, mostrando que além da umidade e a profundidade terem efeito significativo na RP individualmente, a interação entre esses dois fatores também pode interferir na RP, sendo o CV, segundo Pimentel-Gomes (2000), aceitável para condição de campo. Klein *et al.* (1998) concluíram que a RP foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo. Além da umidade, outros parâmetros, como a densidade do solo e o teor de matéria orgânica, podem influenciar na medida da RP oferecida pelo solo (VAZ; HOPMANS, 2001).

Para as camadas do solo amostradas (Quadro 5) também verificou-se diferença dos valores de RP, sendo que os valores foram crescentes à medida que aumentou-se a profundidade de amostragem, condição essa explicada por Iaiá *et al.* (2005) como o resultado do intenso tráfego de máquinas.

Quadro 4. Análise de variância da resistência mecânica do solo à penetração para os fatores umidade do solo e camadas do solo para o penetrômetro de impacto, em Petrolina, PE, Brasil

Causa de variação	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)
Umidade do solo	24,49 **
Camadas do solo	167,13 **
Umidade do solo x Camadas do solo	4,16 *
Coeficiente de variação (%)	28,30

ns: não significativo ($P > 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$).

Quadro 5. Resistência mecânica do solo à penetração em função da umidade do solo e camadas do solo para o penetrômetro de impacto, em Petrolina, PE, Brasil

Fatores	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)
Umidade do solo (%)	
3,5	2,21 a
6,7	1,60 b
Camadas do solo (m)	
0,00-0,10	0,39 c
0,10-0,20	2,26 b
0,20-0,30	3,06 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey.

Quando analisada a interação entre umidade do solo versus camadas do solo da RP no penetrômetro eletrônico (Quadro 6), verificou-se que a umidade (3,5 e 6,7%) em relação à camada mais superficial do solo (0,00-0,10 m) não diferiu estatisticamente. Na camada 0,10-0,20 m, os valores de RP diferenciam-se para os percentuais de umidade do solo, apresentando maior RP (2,75 MPa) quando a umidade do solo se encontrou em 3,5%, e na camada 0,20-0,30 m, onde os valores de RP foram maiores (3,4 MPa) para a menor umidade do solo.

Pode-se afirmar que um solo com maior umidade (6,7%) possui maior facilidade a penetração do aparelho, e, conseqüentemente, menor valor de RP quando se utiliza equipamentos eletrônicos manuais. Portanto, para o penetrômetro eletrônico

a umidade do solo foi fator que diferenciou nos valores de RP encontrados. A RP é altamente influenciada pela umidade e densidade do solo (CUNHA *et al.*, 2002; GENRO JÚNIOR *et al.*, 2004). A RP aumenta exponencialmente com a diminuição da umidade, em razão do aumento das forças de coesão entre as partículas do solo, resultante da concentração dos agentes cimentantes (sesquióxidos de ferro e alumínio associados a materiais húmicos degradados, exsudação dos microrganismos do solo, etc.) e da redução do efeito lubrificante da água (SILVA *et al.*, 2002).

Observa-se que a umidade de 3,5% para a curva da RP (Figura 3) foi apenas até a camada de 0,20-0,30 m por não se conseguir penetrar no solo com o equipamento. Na umidade de 6,7%, o efeito

Quadro 6. Resistência mecânica do solo à penetração para a interação dos fatores umidade e camadas de solo para o penetrômetro eletrônico, em Petrolina, PE, Brasil

Umidade do solo (%)	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)		
	Camadas do solo (m)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
3,5	0,46 aC	2,75 aB	3,40 aA
6,7	0,32 aC	1,76 bB	2,73 bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

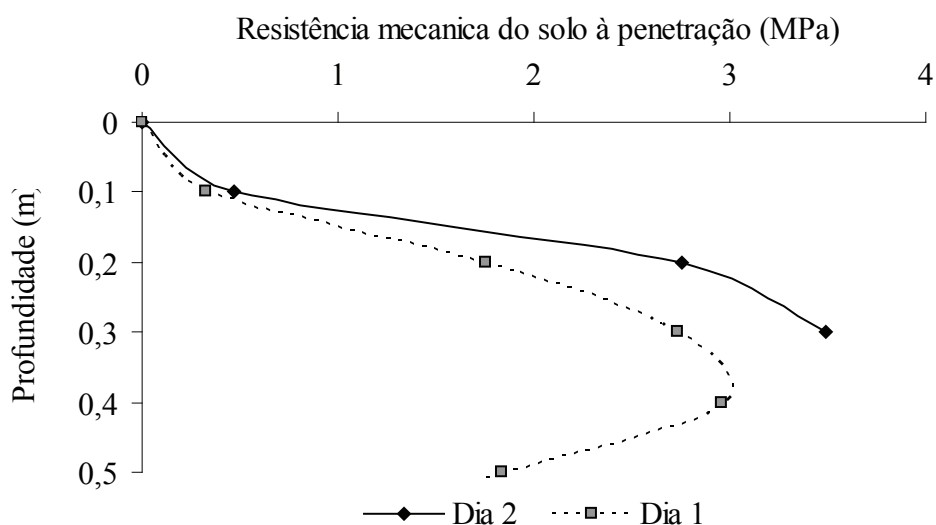


Figura 3. Curvas da resistência mecânica do solo à penetração com penetrômetro eletrônico em função da umidade média do perfil do solo de 6,7% (Dia 1) e de 3,5% (Dia 2).

foi positivo, possibilitando que o penetrômetro chegasse até os 0,50 m, evidenciando mais uma vez, que a umidade afetou significativamente a RP com o uso do penetrômetro eletrônico. É possível verificar que os valores de RP até a camada de 0,20-0,30 m ocorreu à penetração nas duas condições de umidade, mas houve divergência com variação de 1,0 MPa na camada de 0,10-0,20 m.

Portanto, os valores de RP encontrados pelos penetrômetros de impacto e eletrônico foram divergentes, sendo maior para o primeiro, como também observado por Roboredo *et al.* (2010); Beutler *et al.* (2002) e Beutler *et al.* (2007). Beutler *et al.* (2002) afirmam que, em Latossolo, o penetrômetro de impacto determina valores superiores de RP em locais mais compactados, não permitindo sua comparação com valores obtidos com penetrômetros eletrônicos. Fato este verificado neste trabalho para solos arenosos (Argissolo Amarelo). No entanto, a curva de compactação apresentada pelos aparelhos foi semelhante, indicando que existe uma camada compactada de 0,30-0,50 m, sendo necessária a subsolagem para correção da compactação.

CONCLUSÕES

- A resistência mecânica do solo à penetração utilizando-se o penetrômetro de impacto não foi influenciada pela sua umidade, mas foi quando se utilizou o penetrômetro eletrônico;
- Ocorreu limitação em relação à utilização do penetrômetro eletrônico quando a umidade do solo foi de 3,5%, em camadas abaixo de 0,30 m de profundidade;
- O penetrômetro de impacto proporcionou medições de resistência mecânica do solo à penetração superior às obtidas quando se utilizou o penetrômetro eletrônico, entretanto foi semelhante à indicação da presença de camada compactada pelos aparelhos.

AGRADECIMENTOS

A FACEPE – Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pela Bolsa de Iniciação Científica do primeiro autor. Ao CNPq –

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelas bolsas do segundo, terceiro e quinto autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, R.L.; LAZARINI, G.D.; LANÇAS, K.P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009.

AMARAL, F.C.S.; SILVA, E.F.; MELO, A.S. **Caracterização pedológica e estudos de infiltração da água no solo em perímetros irrigados no Vale do São Francisco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 104p.

BEUTLER, A.; 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.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; SILVA, L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.2, p.191-199, 2002.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R.P.; FERNANDES, A.L.T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2004. 44p. (UNIUBE - Boletim Técnico, n.3).

CORTEZ, J.W.; ALVES, A.D.S.; MOURA, M.R.D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H.J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.4, p.1207-1216, 2011.

CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHAES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.

DEDECEK, R.A.; GAVA, J.L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.3, p.383-390, 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2006. 370p.

ESTAT. **Sistema para análises estatísticas (v. 2.0)**. Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas, FCAV-UNESP, 1994.

GENRO JÚNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.477-484, 2004.

IAIA, A.M.; MAIA, J.C.S.; KIM, M.E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n. 2, p.523-530, 2006.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, 1998.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1131-1140, 2007.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C.; RINALDI, P.C.N. Compactação de um solo de uso florestal submetido

ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.3, p.369-376, 2006.

MAGALHÃES, W.A.; CREMON, C.; MAPELI, N.C.; SILVA, W.M.; CARVALHO, J.M.; MOTA, M.S. Determinação da resistência do solo à penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**, Dourados, v.2, n.6, p.21-32, 2009.

NAGAHAMA, H.J. **Relação máquina-solo-planta em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-equipamento e dos sistemas de preparo**. 2013. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 477p.

ROBOREDO, D.; MAIA, J.C. DE S; OLIVEIRA, O.J. DE; ROQUE, C.G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo Vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.308-314, 2010.

ROQUE, C.G.; CENTURION, J.F.; ALENCAR, G.V.; BEUTLER, A.N.; PEREIRA, G.T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v.25, n.1, p.53-57, 2003.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: Causas, Efeitos e Práticas de Controle. **Circular Técnica do IPEF**, Piracicaba, n.163, p.1-10, 1988.

SERAFIM, M.E.; VITORINO A.C.T.; PEIXOTO, P.P.P.; SOUZA, C.M.A.; CARVALHO, D.F. Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.654-665, 2008.

- SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P. **Avaliação da compactação de solos florestais**. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. Piracicaba: IPEF, 2002. p.352-372
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004.
- SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F. DE; SACRAMENTO, J.A.A.S.; SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.659-667, 2010.
- SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.18-23, 2003.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de formulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.2, p.229-235, 1991.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto – modelo IAA/Planalsucar – STOLF. **STAB**, Piracicaba, v.1, n.3, p.18-23, 1983.
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja. 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).
- VAZ, C.M.P.; HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, n.1, p.4-12, 2001.