

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIRÓZ”  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL**

**PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PIBIQ (2005/2006)  
COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES PENETRÔMETROS PARA  
DIAGNÓSTICOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO**

**LUCELHA CARBONERA**

**PIRACICABA, JULHO DE 2007.**

## COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES PENETRÔMETROS PARA DIAGNÓSTICOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO

**Resumo:** Na agricultura moderna há uma preocupação com as condições físicas do solo, sendo a compactação um fator a ser considerado. A compactação pode ser identificada com a utilização de um parâmetro chamado Índice de Cone (IC), que é a expressão da resistência do solo à penetração. Para tal tarefa usa-se equipamentos denominados de penetrômetros, de modelos e princípios de funcionamento variados. Este trabalho teve como objetivo avaliar a semelhança de resultados obtidos entre quatro desses aparelhos: penetrômetro de impacto, penetrômetro eletrônico, penetrógrafo e penetrômetro eletrônico hidráulico. Foram feitas coletas de 30 pontos com os quatro equipamentos em três parcelas distintas e destes pontos foram tiradas médias para cinco camadas: de 0 a 0,1 m, 0,1 a 0,2 m, 0,2 a 0,3 m, 0,3 a 0,4 m e de 0,4 a 0,5 m. As médias, por sua vez, foram comparadas estatisticamente pelo teste t. Apesar de se mostrarem aptos à mensuração de IC, os equipamentos apresentaram resultados com diferenças significativas. O penetrômetro de impacto se mostrou mais dispar que os demais, especialmente na primeira camada entre 0 e 0,1 m.

**Palavras-chave:** sensor, penetrógrafo, penetrômetro de impacto, penetrômetro eletrônico, penetrômetro eletrônico hidráulico.

**Abstract:** In modern agriculture there's a concern about the physical condition of soil, and the compaction is a factor to be considered. Compaction can be identified with the use of a parameter called the Cone Index (CI), which is the expression of soil resistance to penetration. For this task should use an equipment called penetrometer, with models and principles of operation varied. This study aimed to evaluate the similarity of results from four of these appliances: impact penetrometer, electronic penetrometer, recording penetrometer and electronic hydraulic penetrometer. Were made collections of 30 points with the four equipments in three different plot and of those points were made averages for five layers: 0 to 0.1 m, 0.1 to 0.2 m, 0.2 to 0.3 m, 0.3 to 0.4 m. and 0.4 to 0.5 m. The averages were compared statistically by the test t. Although the equipments seem suitable

for measurement of CI, the equipment performed with significant differences. . The impact penetrometer was more different than the others, especially in the first layer between 0 and 0.1 m.

**Keywords:** sensor, recording penetrometer, penetrometer of impact, electronic penetrometer, electronic hydraulic penetrometer.

## INTRODUÇÃO

Muito tem sido estudado sobre as características físicas do solo, tal como a compactação, especialmente aquela causada pelo tráfego de máquinas nas lavouras. A compactação do solo ocorre quando o solo está sujeito a pressões mecânicas e pode ser caracterizada pela resistência que este oferece a uma determinada força exercida sobre o mesmo. Esta resistência é um índice integrado, ou seja, uma consequência da compactação, da umidade, da textura, do tipo mineral das argilas, da quantidade e tipo do agregado e porosidade do solo (FOLEGATTI et al. 1990). Existem alguns fatores que influenciam na resistência, como por exemplo, o sistema de cultivo que interfere no grau de revolvimento do solo, desde o menor revolvimento possível como no plantio direto, até o revolvimento total, como no plantio convencional (CORRECHEL et al. 1997); da mesma forma, o cultivo rotacionado, por exemplo, proporciona menor compactação do solo que monocultivo (PEDROTTI et al., 2001). Segundo Chancellor (1981), o volume total de um solo é formado pelo volume de partículas minerais e pelos poros entre elas e o solo é considerado compactado quando a proporção de macroporos em relação à porosidade total é inadequada para o eficiente desenvolvimento das plantas.

Considera-se a ocorrência de compactação quando há uma redução da macroporosidade e aumento da densidade, sendo que os microporos são pouco afetados. Assim a compactação pode ser definida como aumento da concentração de massa por deslocamento indiscriminado das partículas a partir de processo mecânico externo, ou seja, não originário do próprio solo (OLIVEIRA JR & BALASTREIRE, 1998). Nesse contexto pode-se definir a compactação como sendo a ação mecânica por meio da qual se impõe, ao

solo, uma redução em seu índice de vazios, que é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos.

A compactação do solo constitui um tema de crescente importância em face do aumento da mecanização nas atividades agrícolas, uma vez que a mesma afeta as propriedades físicas do solo e conseqüentemente o desenvolvimento das plantas.

Os solos agrícolas podem ser compactados por vários agentes, como animais em pastejo e raízes de árvores, porém mais significativos são os efeitos da mecanização, ocasionados pelo tráfego de máquinas utilizadas no manejo das culturas. Em geral, as máquinas empregadas são pesadas e excedem a pressão admitida pelo solo sem que sejam provocados efeitos nocivos. O tráfego de máquinas pesadas e equipamentos agrícolas são fatores externos que ocasionam mudanças nos atributos físicos do solo em superfície e subsuperfície, podendo formar assim camadas compactadas no solo (ROQUE et al. 2003).

No atual contexto da agricultura, quando é analisada a relação solo-planta-máquina, percebe-se a necessidade de caracterizar o estado físico do solo. Os parâmetros para tal são numerosos e as leis que os regem são complexas (CUNHA et. al., 2002). A resistência mecânica do solo à penetração tem sido usada, ao longo de muitos anos, com aplicações em diversos campos de pesquisa agrônômica. Atualmente, várias aplicações estão consolidadas e dentre elas a detecção de camadas compactadas tem se destacado.

Porém, não somente o sistema de utilização das máquinas no campo, mas também as características físicas do solo e a presença de resíduos culturais são fatores importantes ao entendimento do processo de compactação. As propriedades físicas e mecânicas dos solos os tornam mais ou menos propensos à compactação, influenciando, desta forma, a trafegabilidade e desenvolvimento radicular. A compactação apresenta ainda grandes variações em função das propriedades do solo, tais como teor de água, textura e densidade. Apesar de muitos estudos terem sido feitos, não se tem uma quantificação universalmente aceita da influência de uma determinada variação no teor de água sobre a resistência à penetração para diferentes solos (CUNHA et. al., 2002). Molin et al. (2006) verificaram em seu trabalho que o IC foi influenciado principalmente pelo teor de água, densidade e espaço poroso do solo.

Os fatores que afetam a compactação podem ser classificados em dois os grupos: os fatores externos, e os fatores internos. Ainda têm-se fatores relacionados às características

naturais do solo, formando camadas compactadas, como movimento das partículas do solo (argila) por processos pedogenéticos acelerados, que neste caso é classificado como adensamento (RÍPOLI, 1985).

Como exemplo de fatores internos tem-se aqueles que fazem parte das características físicas do solo. Um solo compactado pode causar queda de produtividade, pois o sistema radicular da planta tem seu desenvolvimento comprometido devido ao impedimento mecânico causado pela alta agregação do solo, ou seja, a redução da porosidade do solo, que diminui a absorção de nutrientes e água, além de comprometer as trocas gasosas entre o solo e o ar, bem como processos químicos e biológicos que nele ocorrem (FOLEGATTI et al. 1990; GOEDERT et al. 2002). Em termos gerais pode-se citar ainda a menor capacidade de armazenamento de água, comprometimento da fertilidade do solo, redução da porosidade e deformação da estrutura.

A sondagem do solo para a determinação do estado de compactação é um parâmetro muito importante, pois através dela leva-se a uma tomada de decisão: fazer o uso da subsolagem ou não. Silva et al. (2004) afirmam que uma forma de otimizar a operação de subsolagem é realizá-la apenas nos locais e profundidades necessárias para a ruptura das camadas compactadas do solo e que isso pode ser feito dispondo-se de estudos que identifiquem a variabilidade espacial das camadas compactadas do solo a ser mobilizado em função da resistência mecânica à penetração considerada crítica. A determinação da compactação é fundamental em estudos científicos que avaliam a relação máquina-solo-planta e também contribui para os estudos pedológicos.

É sabido que quanto maior a densidade amostral possivelmente, melhores são os resultados. Nesse ponto os sensores são bem vindos na tentativa de se aumentar o número de amostragens em uma mesma área e se possível em menor tempo também. Lütticken (2002) afirma em seu trabalho que a automação da amostragem de solo diminui os erros decorrentes da operação tornando-a mais confiável tanto na análise dos dados obtidos e sua variação espacial, como na amostragem exata do local previamente proposto. Afirma ainda que este método otimiza a operação diminuindo o tempo gasto com a amostragem e controla com maior eficácia a profundidade da amostra.

Oliveira et al. (2007) verificaram que os coeficiente de variação dos valores de IC por eles obtidos apresentaram-se altos, o que indica a necessidade de um maior número de

amostras para diminuir esta variabilidade. Os autores afirmam ainda que a compactação na entrelinha no plantio de cana-de-açúcar é muito maior do que na linha, devido ao tráfego das máquinas ocorrerem sempre na entrelinha. O que reafirma a idéia de que na hora da amostragem é imprescindível que haja um estudo preliminar das condições e manejo da lavoura.

A resistência à penetração é um dos atributos físicos do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA & ROLOFF, 1996). Os métodos mais comumente utilizados para se medir a compactação são indiretos, a exemplo da quantificação da densidade do solo (KLEIN et al. 1998) e a resistência mecânica à penetração (CUNHA et al. 2002). No caso da resistência à penetração o equipamento utilizado para tal denomina-se penetrômetro. Nesse caso a avaliação da resistência do solo à penetração pode ser realizada pelo índice de cone (IC), definido como a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica, e expressa como a força por unidade de área da base do cone.

O penetrômetro tem como parte constituinte principal uma ponteira cônica fixada em uma haste. As partes constituintes da ponteira que penetra no solo têm uma padronização internacional descrita pela ASABE (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURE AND BIOLOGY ENGINEERING). Segundo a norma ASAE S313.1, área de projeção da ponteira deve ter  $323 \text{ mm}^2$  (20,27 mm de diâmetro) para condições de solo menos compactado e quando o solo se apresentar mais compactado usa-se a ponteira com área de projeção de  $130 \text{ mm}^2$  (12,83 mm de diâmetro), e com um ângulo sólido de  $30^\circ$ .

O penetrômetro de impacto também comumente chamado de penetrômetro dinâmico ou bate-estaca (STOLF et al. 1983) tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste através de uma força que provém do impacto de um peso que compõe o equipamento e cai de uma altura constante. Para coleta dos dados deve-se utilizar anotações da profundidade de penetração da haste para cada impacto ocasionado. Os dados podem ser transformados para valores de pressão a partir de uma fórmula (STOLF, 1990). Além deste existem vários outros equipamentos como o penetrógrafo (CARTER, 1967), o penetrômetro eletrônico (JESUS FILHO et al. 2007), de vários fabricantes, o penetrômetro

eletrônico hidráulico (VIEIRA & SIERRA, 1993; SILVA JR. 2000), e muitos outros modelos existentes no mercado.

Parte dos problemas de interpretação ocorre porque alguns dos penetrômetros não são versáteis e apresentam problemas de padronização ao oferecem dados primários e indiretos, como o penetrômetro de impacto, ou geram gráficos mecanicamente, como o penetrógrafo. Também deve-se considerar que os penetrômetros manuais a penetração é controlada pela força humana, permitindo que a velocidade de penetração varie, o que pode influenciar os valores obtidos. Quando a ponteira encontra uma camada mais compactada a tendência é que a velocidade de deslocamento diminua e o operador exerce uma maior força para continuar a penetração da haste e quando o obstáculo é vencido a velocidade aumenta. A norma da ASABE EP542 cita que a velocidade de penetração da haste deve ser constante (0,003048 m/s) ao longo do deslocamento para evitar dados mascarados.

Existe uma diversidade de variações de penetrômetros, porém seus resultados podem não ser comparáveis. Considerando-se a necessidade de se conhecer melhor esses equipamentos e seus resultados, neste trabalho são testados e comparados os resultados obtidos com quatro penetrômetros.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O primeiro equipamento é o penetrômetro de impacto (STOLF et al. 1983) comumente denominado de penetrômetro dinâmico ou bate-estaca. O segundo é um penetrógrafo de acionamento manual (CARTER, 1967), o terceiro é o penetrômetro eletrônico hidráulico (VIEIRA & SIERRA, 1993) acoplado a um trator e por último um penetrômetro de acionamento manual e coleta eletrônica de dados (DGL Automação<sup>®</sup>).

O penetrômetro de impacto do modelo IAA-PLANALSUCAR/STOLF, também conhecido como bate-estaca, tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste com ponteira com uma área de projeção no solo através do impacto de um êmbolo de massa conhecida a uma altura constante. A cada impacto mede-se a penetração da haste no solo. Considera-se ainda a força da gravidade (g) e massa dos demais componentes do

penetrômetro, excluindo o embolo. A fórmula, modificada por Stolf (1990), considerada para o cálculo de índice de cone, é descrita a seguir:

$$R(MPa) = \frac{\left[ (M + m)g + \frac{M}{(M + m)} * \frac{Mgh}{x} \right]}{A} * 0,101325$$

Onde:

R: resistência à penetração conhecido como Índice de Cone, MPa;

M: massa total do equipamento, Kg;

m: massa do embolo, Kg;

g: aceleração da gravidade, m/s;

h: altura da queda do embolo, cm;

x: número de impactos;

A: área de projeção da ponteira, mm<sup>2</sup>;

Os valores para as variáveis foram: M = 4,019 kg; m = 3,33 kg; (M+m)g = 7,349 kgf; h = 40 cm e A = 1,22 cm<sup>2</sup>. Assim simplificou-se a equação para:

$$R(MPa) = 0,67 + 0,731 * N$$

sendo N o número de impactos para uma penetração de cinco centímetros no solo.

Carter (1967) descreve o penetrógrafo como um penetrômetro registrador portátil, onde a força de penetração é detectada por uma mola que trabalha em duas direções coaxialmente. A deflexão da mola é transferida para um gráfico através de uma caneta presa em um “braço” que acompanha o movimento da mola enquanto a haste penetra no solo.

Também foi usado o Penetrômetro Eletrônico Geo-Referenciado (modelo PNT 2000 da DGL Automação<sup>®</sup>). Este aparelho, de operação manual, tem como componentes uma CPU que gera e ao mesmo tempo armazena dados, uma haste e uma ponteira. Possui ainda uma tela onde é possível selecionar funções e visualizar, em tempo real, a profundidade e o Índice de Cone daquele ponto coletado. Para calcular a profundidade ao longo do perfil amostrado, este aparelho usa de um sensor de distância (ultra-som) entre a CPU e uma placa metálica que fica paralela a superfície do solo. Os dados de pressão (MPa) obtidos das leituras são exportados diretamente para um microcomputador através

de um cabo se liga a uma porta serial existente na CPU do penetrômetro com o auxílio de um software específico que importa estes dados na forma de planilha.

O penetrômetro eletrônico hidráulico, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, é acoplado ao engate de três pontos do trator e utiliza força hidráulica para deslocar um cilindro que possui um sensor potenciométrico linear. Na ponta da haste há uma célula de carga para registrar a resistência oferecida pelo solo à penetração. As leituras obtidas são enviadas automaticamente ao computador e gravadas em um programa desenvolvido em ambiente BORLAND DELPHI. (OLIVEIRA et al. 2007).

Para efeitos de padronização em todos equipamentos foi usada uma mesma haste e mesma ponteira com dimensões estabelecidas pelas normas da ASABE, ASAE S313.1 (1983).

As unidades de medidas são diferentes para cada aparelho, e para tal foi feita, em virtude de padronização, a transformação dos dados para MPa. Para o penetrômetro de impacto isto é feito na própria fórmula; para o penetrógrafo deve-se multiplicar os valores obtidos por 0,0981; para o penetrômetro eletrônico hidráulico deve-se multiplicar por 0,10135; o penetrômetro eletrônico dá leitura direta em MPa.

O experimento foi conduzido em campo em três parcelas quadradas medindo 3 m de lado, no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba, SP. A primeira e a segunda parcela encontram-se em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico de textura arenosa/média e horizonte A moderado. A área em que foram alocadas as duas primeiras parcelas encontram-se em áreas destinadas à regeneração de florestas (APP). A terceira parcela tem seu solo classificado como uma associação de Nitossolo Vermelho Eutroférico léptico de textura Argilosa e horizonte A moderado mais Cambissolo Háptico Eutroférico léptico de textura Argilosa e horizonte A moderado utilizada como lavoura de culturas anuais. A identificação e classificação dos solos onde se encontravam as parcelas deste trabalho foi citado por Vidal Torrado & Sparovek (1993).

Em cada parcela foram coletados trinta pontos para cada um dos quatro aparelhos até a profundidade de cinquenta centímetros. Os dados foram coletados na terceira semana do mês de março de 2006. Para o penetrômetro de impacto, o penetrógrafo e o penetrômetro eletrônico, a posição dos pontos de coleta foi aleatória dentro da parcela, já

para o penetrômetro eletrônico hidráulico a coleta foi feita em três linhas não equidistantes, assim também para os pontos ao longo da linha e com o trator entrando de ré nas parcelas.

Para a mensuração da umidade relativa foi feita uma amostra de solo composta por quatro subamostras coletada aleatoriamente dentro de cada parcela. As amostras foram obtidas a partir de coleta em quatro pontos distintos em cada parcela; foi aberta uma pequena trincheira e coletadas amostras de cinco profundidades, em um intervalo de 0,10 m, até 0,50 m. A umidade foi obtida utilizando-se o método gravimétrico; as amostras foram pesadas em balança eletrônica assim que chegaram do campo e foram colocadas em estufa a 105° C por 24 horas. Após a secagem as amostras foram novamente pesadas.

Das trinta leituras obtidas foram calculadas as médias para camadas de dez centímetros para cada equipamento em cada parcela. Estas médias foram plotadas em gráfico de índice de cone (MPa) por profundidade (cm). Foi utilizado o teste de Fischer, mais comumente conhecido como teste F, que avalia se a variância entre duas amostras, neste caso amostra é o conjunto de trinta pontos coletados com cada aparelho, são estatisticamente iguais, estabelecido o parâmetro de  $\alpha = 0,05$ , ou seja, uma probabilidade de 95% de confiabilidade. O teste F é um pré-requisito para o teste de Student, mais conhecido como teste t. Este teste avalia se a média entre duas amostras são estatisticamente iguais entre si, para os mesmos parâmetros de teste F ( $\alpha = 0,05$ ), (IGUE et al., 1993).

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos teores de umidade do solo nas diferentes camadas para as três parcelas experimentais. Alguns autores vêm estudando a relação entre o teor de água e o IC. Orlando et. al. (2000) confirmam que há uma tendência à redução dos valores com o aumento do teor de água, isso quando em umidade na faixa de 25% a 45%. O autor ainda cita que a maior homogeneidade dos valores de IC ocorre na faixa de 35% de teor de água, devido provavelmente, a esse valor estar na faixa de friabilidade do solo e tanto acima quanto abaixo dessa faixa de 35%, a tendência é que o Coeficiente de Variação (CV) dos valores de IC aumente. Os valores aqui obtidos não se

equiparam, mas se a tendência do CV do IC aumentar conforme diminui o teor de água for verdadeira, uma afirmativa preliminar seria que o comportamento dos quatro aparelhos serão mais dispares na parcela 1 do que nas parcelas 2 e 3, como mostra a Tabela 1, o teor de água na parcela 3 é bem maior do que na parcela 1 e semelhante à parcela 2.

Tabela 1. Teor de umidade do solo (%) nas diferentes camadas para as três parcelas.

Profundidade (m)	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
0 a 0,1	6,7	20,7	20,4
0,1 a 0,2	8,5	22,0	21,2
0,2 a 0,3	8,3	20,7	23,2
0,3 a 0,4	9,7	20,7	25,2
0,4 a 0,5	9,7	21,0	20,6
Média	8,52	21,0	22,12
DP	1,24	0,56	2,05
CV	14,43	2,68	9,26

Klein et al. (1998) conclui que a resistência à penetração foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo, sendo o método utilizado, o método da amostra indeformada, o que garante maior acurácia nos dados obtidos. Concomitantemente, o teor de argila e o teor de água estão correlacionados diretamente; quanto maior o teor de argila maior é a capacidade de absorção de água. A terceira parcela se encontra em uma área de solo de textura argilosa, já as parcelas 1 e 2 em local onde o solo é classificado com textura arenosa/média. Segundo Moraes et. al. (1995) o menor teor de argila resulta em nível mais baixo de compactação.

A Figura 1 mostra os gráficos obtidos com as médias de IC nas cinco camadas analisadas e a Tabela 2 mostra o teste de Student (t) que avalia a semelhança estatística entre as médias.

Figura 1. Gráfico de IC e seu desvio padrão como função da profundidade para as parcelas 1, 2 e 3 e para os quatro penetrômetros: penetrômetro de impacto, penetrômetro eletrônico, penetrógrafo e penetrômetro eletrônico hidráulico.

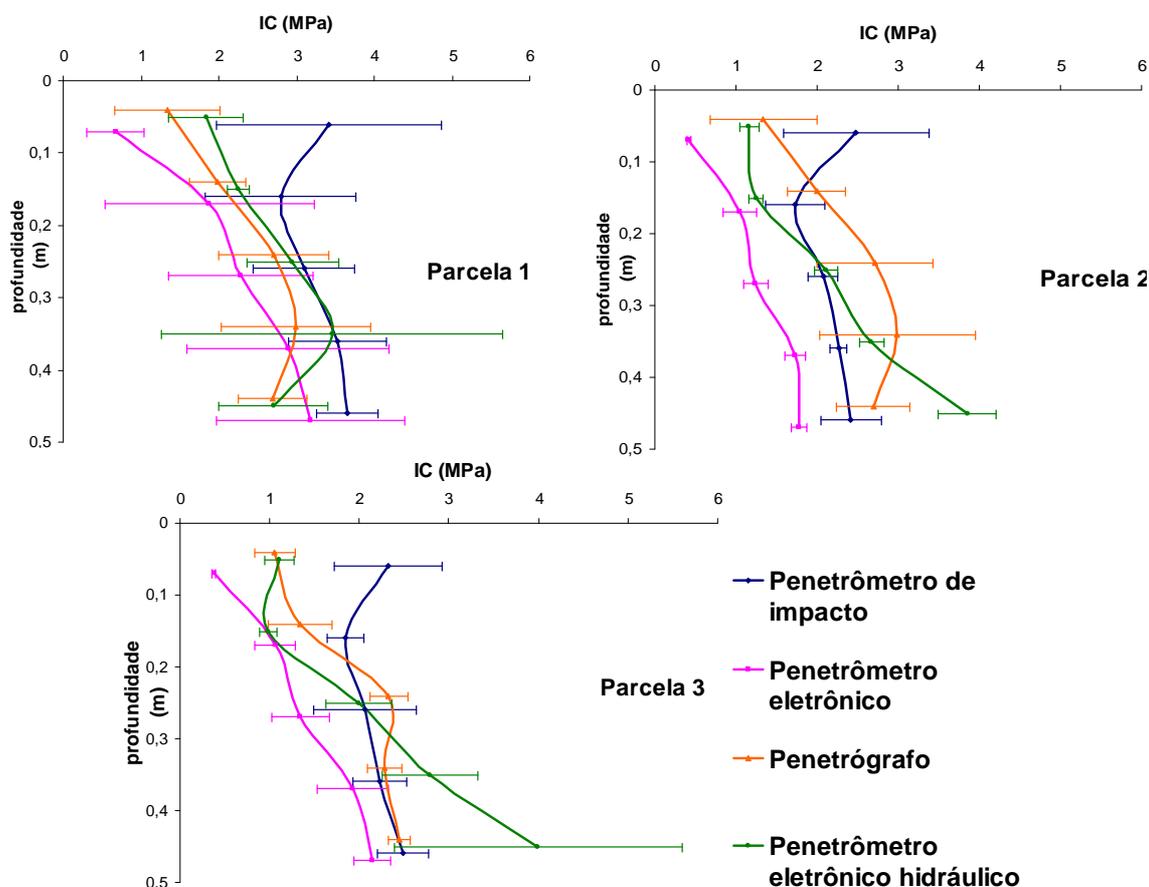


Tabela 2. Teste t ( $\alpha= 0,05$ ) comparando estatisticamente as médias obtidas pelos quatro equipamentos: PI (Penetrômetro de Impacto), PE (Penetrômetro Eletrônico), Pen (Penetrógrafo) e PEH (Penetrômetro Eletrônico Hidráulico) em camadas de 0,1 m nas parcelas 1, 2 e 3.

Prof. (m)	Índice de Cone (MPa)											
	Parcela 1				Parcela 2				Parcela 3			
	PI	PE	Pen	PEH	PI	PE	Pen	PEH	PI	PE	Pen	PEH
0,1	3,42 a	0,62 d	1,34 c	1,83 b	2,48 a	0,42 c	1,06 b	1,17 b	2,33 a	0,35 d	0,88 c	1,11 b
0,2	2,80 a	1,88 b	2,00 b	2,25 b	1,73 a	1,05 c	1,33 b	1,25 b	1,81 a	0,80 c	1,35 b	0,98 c
0,3	3,10 a	2,29 b	2,71 a	2,95 a	2,08 b	1,24 c	2,33 a	2,11 a	2,06 a	0,99 b	1,91 a	2,00 a
0,4	3,52 a	2,89 b	2,99 b	3,46 a	2,26 b	1,73 c	2,28 b	2,67 a	2,23 b	1,41 c	2,30 b	2,79 a
0,5	3,66 a	3,18 a	2,69 b	2,77 b	2,42 b	1,78 c	2,44 b	3,85 a	2,49 c	1,50 d	2,81 b	4,00 a

Letras iguais não diferem estatisticamente ao nível de 5%. Valores em MPa..

Na Figura 1 pode-se observar que as curvas originadas a partir das médias dos trinta pontos para cada equipamento, nas cinco camadas de 0,1 m, não seguem a mesma tendência ao longo do perfil para as três parcelas. Porém, na parcela 1, os quatro

equipamentos detectaram uma camada mais compactada entre 0,3 e 0,4 m de profundidade. Nota-se também que o desvio padrão é maior até 0,1 m para o penetrômetro de impacto em relação às outras camadas, principalmente nas parcelas 1 e 2. Também, na primeira camada mensurada percebe-se um deslocamento dos valores para o penetrômetro de impacto e por consequência estes valores são diferentes estatisticamente dos outros equipamentos como mostra a Tabela 2. Isto pode ser explicado pela baixa resolução de leitura que este equipamento apresenta até 0,1 m, devido ao seu peso que força certa penetração durante as mensurações antes de provocar o primeiro impacto, o que não é mais evidente após o primeiro impacto.

Na segunda camada, entre 0,1 e 0,2 metros de profundidade os valores de IC do penetrômetro de impacto ainda apresentam-se maiores do que os demais aparelhos e se diferem estatisticamente deles, apesar do DP diminuir. Entre 0,2 e 0,4 metros de profundidade os valores de IC tendem a serem menos dispares e mais semelhantes estatisticamente.

Na camada mais profunda, entre 0,4 e 0,5 metros de profundidade, os valores de IC do penetrômetro eletrônico hidráulico mostra-se maior do que os demais aparelhos, principalmente na parcela 2 e 3 (Figura 1), apresentando ainda na parcela 3 um DP relativamente alto.

Roque et al. (2003) também compararam o penetrômetro de impacto e um penetrômetro equipado com manômetro para leitura de pressão. Apesar da diferença de modelo - o penetrômetro estático tem um relógio de leitura de IC, diferente dos penetrômetros aqui testados, e não armazena dados. Os autores verificaram que os penetrômetros por eles avaliados apresentaram resultados semelhantes e correlação significativa.

Já Beutler et al. (2007) verificou diferença significativa entre o penetrômetro de impacto e o penetrômetro eletrônico, que também foram usados neste trabalho, sendo os dados obtidos pelo penetrômetro de impacto maior que os do penetrômetro eletrônico.

Folegatti et al. (1990) comparam os resultados obtidos entre um penetrômetro de impacto e um penetrógrafo para determinar a resistência à penetração e concluíram que os dois equipamentos foram eficientes na caracterização de IC, porém o penetrógrafo

demonstrou uma limitação no valor máximo, não permitindo a delimitação do final de uma camada compactada, apontando apenas o início da mesma.

O penetrômetro de impacto neste trabalho apresentou curvas com tendência bem semelhante nas três parcelas. As médias por camadas obtidas nas parcelas 2 e 3 foram bem próximas. O desvio padrão na primeira camada (até 0,1 m) mostrou-se alto, principalmente na parcela 1. Em relação ao perfil inteiro observa-se que o desvio padrão foi maior na parcela 1. Nessa mesma parcela nenhum penetrômetro apresentou comportamento semelhante e distinto dos demais equipamentos, sendo que nas últimas duas camadas este apresentou um deslocamento acentuado para a direita, demonstrando compactação mais elevada nestas camadas.

Folegatti et al. (1990) verificaram que o maior coeficiente de variação ocorreu quando se utilizou o penetrômetro de impacto em relação ao penetrógrafo, e o penetrógrafo, por sua vez, apresentou valores absolutos de IC maiores do que o penetrômetro de impacto e para os autores, tal comportamento se explica pelo fato de que, apesar de estarem medindo o mesmo parâmetro de solo, os aparelhos têm características distintas, podendo resultar em valores diferentes. O penetrômetro de impacto é um dos mais utilizados para mensuração de IC, talvez por sua facilidade de manuseio e seu custo relativamente baixo.

Pauletto e Pedrotti (1998) avaliaram a resistência mecânica do solo sob diferentes cultivos, sendo o equipamento utilizado para medir a resistência à penetração, o penetrômetro de impacto, que se mostrou eficiente, identificando “pé-de-grade” existente nas áreas estudadas.

Na parcela 1 a curva do penetrômetro eletrônico apresentou semelhança na tendência com o penetrógrafo e o penetrômetro eletrônico hidráulico, apresentando uma diferença mais acentuada apenas na última camada (entre 0,4 e 0,5 m). Nas parcelas 2 e 3 mostrou-se mais semelhante ao penetrógrafo, exceto na terceira camada na parcela 2 (entre 0,2 e 0,3 m), onde o penetrógrafo detectou maior IC.

Os penetrômetros de acionamento manual, nesse caso penetrômetro eletrônico e o penetrógrafo, sofrem influência do operador e tal motivo pode explicar a grande variação entre os resultados obtidos pelos dois equipamentos. Essa variação na velocidade pode afetar no valor de IC medido pelo equipamento. Isso não ocorre no caso do penetrômetro

eletrônico hidráulico que mantém sua velocidade constante durante toda a leitura e no penetrômetro de impacto que independe da velocidade de penetração.

## **CONCLUSÕES**

A partir dos dados coletados e nas condições em que foram obtidos pode-se afirmar que a diferenças mais dispare foram notadas principalmente na primeira camada (0 a 0,1 m) e na última (0,4 a 0,5 m), entre os quatro equipamentos. Nas outras camadas as diferenças foram menores.

O penetrômetro de impacto apresentou valores de IC na primeira camada mais divergentes e o penetrômetro eletrônico hidráulico, por sua vez, apresentou valores de IC mais divergentes nas últimas duas camadas, especialmente pra as parcelas 2 e 3.

O penetrômetro de impacto na maioria das vezes se difere dos outros aparelhos, principalmente na primeira camada entre 0 e 0,1 m. Contudo, guardada todos os quatro aparelhos testados se mostraram aptos para determinação de IC, sendo que todos identificaram uma camada mais compactada entre 0,3 e 0,4 m na parcela 1.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGY ENGINEERING. ASABE STANDARTS 1999: ASAE EP542, FEB 99 Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGY ENGINEERING. ASABE STANDARTS 2006 93: ASAE S313.1 FEB 04 Soil cone penetrometer, 2006

BEUTLER, A.. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A.. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. Engenharia Agrícola, Abril 2007, vol.27, no.1, p.146-151.

CARTER, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles, *Agricultural Engineering*. V. 48, n. 6, p. 348-349, 1967.

CHANCELLOR, W. J. *Compaction of soil by agricultural equipment*. Davis: University of California, 1977. 53p. (Bulletin, 1981).

CORRECHEL, V.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A.; SANCHEZ, A. C. Resistência de um latossolo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo de solo. *in Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, p. 20, Rio de Janeiro:1997.

CUNHA, J. P. A R.; VIEIRA, L. C.; MAGALHÃES, A. C.; Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Engenharia na Agricultura*, v.10, n.1-4, Jan./Dez., 2002.

FOLEGATTI, M. V., SILVA, A. P. da, DE MARIA, I. C. Avaliação da resistência do solo utilizando penetrômetro e penetrógrafo *in XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, p.525. Piracicaba: 1990.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C.; Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.

IGUE, T.; CONAGIN, A.; NAGAI, V.; AMBRÓSIO, L. A. Erro adequado para comparação de médias em casos de heterogeneidade das variâncias. *Bragantia*, v.52, n.2, p. 181-186, Campinas 1993.

JESUS FILHO, D. C. de; ALMEIDA, B. G. de; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P. da. Identificação de compactação de solo com uso do penetrômetro eletrônico. *XV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo*, Pirassunga, 2007.

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, dez. 1998.

LÜTTICKEN, R. E. Automation and Standardisation of Site Specific Soil Sampling. Precision Agriculture, 2, p.179-188, 2000

MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. de; FAULIN, G. de C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.2, p.442-452, maio/agosto 2006.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H.; LIBARDI, P. L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. Bragantia, 1995, vol.54, no.2, p.393-403.

OLIVEIRA, A. S.; COELHO, M. F.; FAULIN, M. S. A. R.; SALVI, J. V.; MOLIN, J. P. Variabilidade espacial da compactação do solo nas linhas de cultivo e de tráfego em cana-de-açúcar. III Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, ConBAP: Piracicaba, 2008.

OLIVEIRA JR., E. D., BALASTREIRE, L. A. Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a diferentes pressões. Tese de Mestrado, ESALQ/USP. Piracicaba: setembro 1998.

ORLANDO, R. C.; VIEIRA, L. B.; MARCIANO, C. Análise da variabilidade do índice de cone para diferentes níveis de teor de água do solo. Engenharia na Agricultura, v. 8, n.3, p. 182 a 185. Viçosa, Julho/Setembro2000.

PAULETTO, E. A., PEDROTTI, A. Resistência do solo sob diferentes sistemas de cultivo. *in*: XIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 1998, Fortaleza, p. 187 – 188.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, n. 4, p. 709-715, Abril 2001.

RÍPOLI, T.C.C.; Subsolagem e subsoladores. Piracicaba: CALQ, 1985.34p.

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

SILVA, G. da; Nelson L. CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Métodos probabilístico e determinístico para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.1, p.130-141, janeiro/abril 2004.

SILVA JR, R L da; Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. *in* Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Fortaleza: 2000.

STOLF, R.; Fórmulas de transformação dos dados do penetrômetro de impacto em força/unidade de área. *in* XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, p.824. Piracicaba: 1990.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto – modelo IAA/Planalsucar – STOF (recomendações para seu uso). Revista STAB, jan/fev. 1983.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.

VIDAL TORRADO, P., SPAROVEK, G. Mapa pedológico detalhado do Campus Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba : ESALQ – Departamento de Ciência do Solo, 1993.

VIEIRA, L.B.; SIERRA, J.G. Uso do penetrômetro e programa de computador para traçado de perfil penetrométrico do solo. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, Ilhéus: SBEA, 1993. p.1825-1837.