



## Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta

**José P. Molin<sup>1</sup>, Carlos T. dos S. Dias<sup>1</sup> & Lucelha Carbonera<sup>1</sup>**

### RESUMO

O indicador mais comumente utilizado para o diagnóstico de compactação do solo é o Índice de Cone (IC), obtido a partir de penetrômetros. No mercado estão disponíveis vários modelos, com diferentes princípios de funcionamento; ressalta-se que a comparabilidade de resultados entre eles precisa ser suficientemente conhecida. Neste trabalho objetivou-se comparar três penetrômetros com princípios diferentes de funcionamento e estabelecer um número ideal de repetições para cada ponto amostrado. Utilizaram-se um penetrômetro de impacto, um penetrômetro de registro eletrônico de dados e de acionamento manual e um de acionamento hidráulico, em três ambientes. De maneira geral, os equipamentos não produziram valores de IC comparáveis em tendências e em magnitude; no entanto não é claro se essas diferenças são relevantes para o diagnóstico de compactação do solo e a partir de 15 repetições o erro amostral dos valores de IC não sofreu decréscimo significativo, variando entre 5 e 15% entre os penetrômetros avaliados.

**Palavras-chave:** penetrômetro, compactação do solo, densidade amostral

## Penetrometer studies: New equipments and correct sampling

### ABSTRACT

The most commonly used indicator for soil compaction diagnose is the Cone Index (CI) obtained from penetrometers. Several models are available in the market with different operating principles and comparability of results among them is not sufficiently known. This study aimed to compare three cone penetrometers with different operation principles and to establish an optimal number of replications for each sampling point. The equipment used were an impact penetrometer, an electronic penetrometer manually operated and an electronic penetrometer hydraulically operated, in three environments. The equipment, in general, did not produce comparable CI values in magnitude and in tendency. However it is not clear whether these differences are relevant for diagnosis of soil compaction. It is possible yet, to affirm that after 15 replications, the sampling errors of CI values did not decrease significantly, ranging between 5 to 20% for the three penetrometers in each plot.

**Key words:** penetrometer, soil compaction, sampling density

## INTRODUÇÃO

A compactação do solo é atributo físico amplamente estudado. Vários autores citam seu impacto na produção e produtividade agrícola, nas propriedades físicas do solo e na distribuição e crescimento de raízes (Foloni et al., 2006; Schaffer et al., 2007; Taboada & Alvarez, 2008). Dentre as propriedades físicas afetadas pela compactação, a resistência à penetração é uma das mais estudadas, sendo investigada através da penetrometria (Beutler et al., 2007). Os principais fatores externos que interferem na compactação do solo são a carga aplicada ao solo através da utilização de maquinários (Cavaliere et al., 2009), pisoteio animal, revolvimento do solo por equipamentos de preparo do solo como grades, arados e escarificadores (Costa et al., 2009). Entre os fatores internos, o teor de água (Lima et al., 2007) e principalmente a fração argila no solo (Tavares Filho & Ribon, 2008a) são os que mais interferem na intensidade da compactação no solo.

Para o diagnóstico da compactação o método indireto adotado é o Índice de Cone (IC), que mede a resistência que o solo exerce em relação à penetração de uma ponta cônica. Para exercer esta penetração são utilizados equipamentos denominados penetrômetros. Existem no mercado vários tipos e modelos, desde os mais simples, como o penetrômetro de impacto, muito utilizado no Brasil, que mensuram IC através de cálculos indiretos (Beutler et al., 2007); os penetrógrafos mecânicos (Carter, 1967), os penetrômetros mecânicos com manômetro até os mais práticos que coletam e armazenam dados, como os penetrômetros eletrônicos (Molin et al., 2006), operados manual ou hidráulicamente. Esta variedade pode trazer diferença nos dados obtidos e influenciados principalmente pela velocidade de penetração e a forma e área de projeção da ponteira que penetra no solo, normalizadas pela ASABE (2006). Para efeito de comparabilidade de resultados faz-se necessário ter confiança nos dados obtidos pelos diferentes equipamentos disponíveis.

Alguns autores têm estudado a semelhança entre penetrômetros. Beutler et al. (2007) verificaram diferença significativa entre um penetrômetro de impacto e um penetrômetro eletrônico, sendo que os valores obtidos pelo primeiro foram maiores. Roboredo et al. (2010) afirmam a diferença entre um penetrômetro de impacto e um penetrômetro eletrônico automático em que os valores do penetrômetro de impacto foram maiores e a correlação com a densidade do solo foi positiva, muito forte ( $r = 0,91$ ); já os valores obtidos pelo penetrômetro eletrônico automático resultaram em correlação positiva moderada ( $r = 0,42$ ).

Outro aspecto importante na utilização em campo do IC para diagnóstico e monitoramento da compactação do solo é a grande variabilidade entre as leituras. Domsch et al. (2006) utilizaram um penetrômetro com quatro hastes visando obter leituras simultâneas de IC e constataram que a variação entre as leituras das quatro hastes em um mesmo ponto mostrou-se elevada, sendo que a maior relação entre as leituras, comparação em par, foi de  $R = 0,57$  porém, quando expressa a média das quatro leituras, foi possível mapear com confiabilidade a variabilidade do IC na área estudada.

O uso de penetrômetros para fins de diagnóstico de compactação do solo em grandes áreas exige tempo e dispêndio de mão-de-obra e, com as práticas de agricultura de precisão, a amostragem passa a ser georreferenciada e em grande quantidade. No entanto, normalmente não são coletadas repetições ou subamostras no ponto amostral. Tavares Filho & Ribon (2008a) citam que pesquisas sobre número de amostras representativas para estudos de compactação utilizando-se penetrômetro de impacto, são escassas e as repetições feitas em campo são variáveis e baseadas na relação custo-benefício, o que pode tornar as repetições insuficientes para avaliação, gerando resultados não representativos. Os autores calcularam o número ideal de repetições para cada ponto amostrado, utilizando a média do IC entre outros parâmetros da estatística clássica. O número de repetições variou com o sistema de manejo, a profundidade e o tipo de amostragem (aleatória e sistemática); 10 repetições por ponto amostrado na profundidade de 0 a 0,60 m permitiram homogeneidade dos dados com erro amostral de 10%, tornando os dados mais confiáveis.

A comparação de diferentes princípios de penetrometria é possível nas mesmas condições de solo e quanto maior o número de repetições maior também a confiabilidade. Assim, este trabalho foi conduzido com o objetivo de comparar equipamentos com distintos princípios de funcionamento e determinar um número ideal de repetições para caracterização de um ponto amostral de IC.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os equipamentos utilizados foram um penetrômetro de impacto (PI), um penetrômetro de registro eletrônico de dados e de acionamento manual (PE) e um penetrômetro com registro eletrônico dos dados e acionamento hidráulico (PEH). O penetrômetro de impacto utilizado foi do modelo IAA-PLANALSUCAR/STOLF (Stolf et al., 1983), que tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste com ponteira, através do impacto de um êmbolo de massa conhecida a uma altura constante. A cada impacto mede-se a penetração da haste no solo; no caso do penetrômetro de impacto como as leituras não são diretas torna-se conveniente o uso de transformação dos valores de impactos e profundidade de penetração em leituras expressas em pressão. A Eq. 1, comumente utilizada, considera algumas variáveis como peso do êmbolo e sua altura de queda, o peso total do equipamento e área de projeção da ponteira, entre outras (Stolf, 1990).

$$RP(\text{MPa}) = 0,10135(6,383 + 15,827N) \quad (1)$$

em que:

RP - resistência à penetração

N - número de impactos necessários para penetrar 0,05 m

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, por outro lado, também avisa ao usuário se a velocidade está fora do padrão, anulando a medição. Mencionado penetrômetro possui uma CPU que armazena os dados coletados e possui interface direta para computadores, além de um visor que possibilita ao usuário fazer configurações e visualizar as medições feitas.

O penetrômetro de acionamento hidráulico e registro eletrônico dos dados foi desenvolvido na USP/ESALQ (Silva Júnior et al., 2000) e é acoplado ao engate de três pontos do trator; o deslocamento da haste é dado por um cilindro hidráulico através do fluxo de óleo do trator. Este equipamento possui uma célula de carga que mede a força exercida pela haste, ao penetrar no solo, e a profundidade é calculada através de um potenciômetro linear solidário ao cilindro hidráulico. Os dados são coletados por computadores convencionais com o auxílio de um programa dedicado.

Coletas de leituras foram feitas em três áreas distintas, situadas nos limites da ESALQ/USP (22° 42' 34" S e 47° 37' 55" O). As áreas de trabalhos possuem 36 m<sup>2</sup> (6 x 6 m e nelas foram coletadas, em cada penetrômetro 40 leituras, aleatoriamente, em uma amostra composta por quatro subamostras para determinação do teor de água em camadas de 0,10 m e análise granulométrica em duas camadas, de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,50 m.

A área 1 é marginal a uma lavoura de grãos e nela é comum o tráfego de tratores e colhedoras; o solo é identificado como Nitossolo Vermelho Eutroférrico típico de textura argilosa e horizonte A moderado. Na área 2 havia sido executado preparo convencional com aração e gradagem a aproximadamente quatro semanas, a uma profundidade média de 0,10 e 0,15 m onde, anteriormente, se encontrava uma lavoura de milho. O solo da área foi identificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, A moderado e textura argilosa. A área 3 se encontrava sob preparo convencional, cultivada com milho antecedido de café, arada, escarificada e gradeada. A mensuração de IC na área foi feita dois meses após o preparo convencional. O solo da área 3 foi identificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, textura argilosa a muito argilosa. A identificação e classificação dos solos foram extraídas do levantamento feito por Soares et al. (2002).

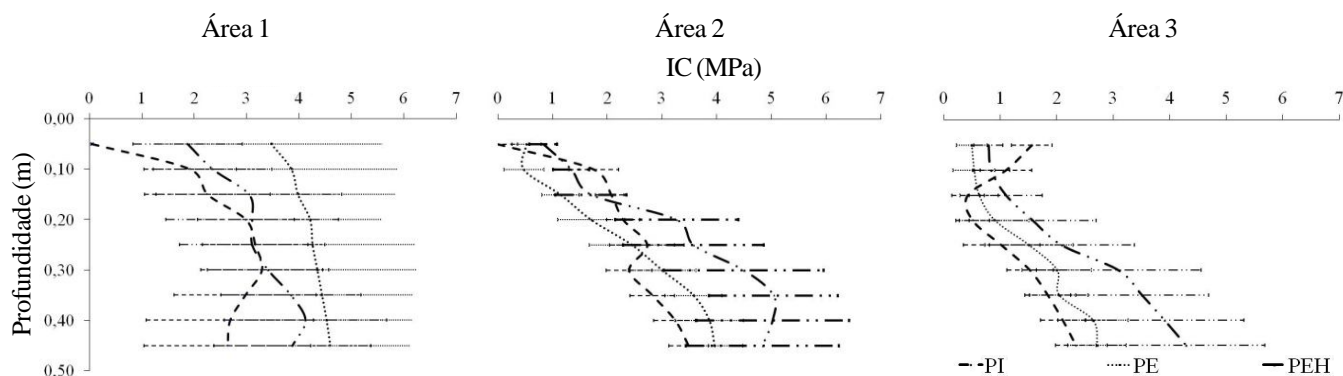
Para determinação granulométrica e de teor de água nas áreas foram retiradas quatro amostras de solo para compor

uma amostra composta. A análise granulométrica foi feita por meio do método de dispersão com NaOH, agitação de alta rotação e sedimentação (EMBRAPA, 1997). Obteve-se o teor de água por método gravimétrico e as amostras de solo foram colocadas em estufa a 105 °C durante 24 h.

Fez-se a avaliação inicial dos dados por meio de estatística descritiva dos valores obtidos nos 40 pontos com cada penetrômetro, em camadas de 0,05 m. Os dados foram submetidos à comparação entre as médias obtidas pelos equipamentos a partir do teste de comparação de médias Tukey utilizando-se o programa estatístico SAS 9.1.3 (Statistical Analysis Systems®). Também foram analisadas as médias obtidas com diferentes números de repetições necessárias para caracterizar adequadamente um ponto de leitura de IC utilizando-se, como parâmetro, o valor do erro amostral em porcentagem calculado através do desvio padrão dividido pela média, para 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 repetições.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Figura 1 mostram o valor de IC no perfil de cada área, no intervalo de 0,05 m, gerados a partir da média das 40 leituras, para cada equipamento. Observa-se que, de maneira geral, as curvas de IC geradas por cada penetrômetro, dentro de uma mesma área seguem a mesma tendência, ao longo do perfil, especialmente nas áreas 2 e 3, nas quais os três equipamentos foram capazes de identificar a camada de maiores valores de IC, diagnosticando uma possível camada compactada, embora haja defasagens de grandeza, sobremaneira na área 1, entre o PE de acionamento manual e os outros dois. O tráfego intenso de maquinários na área em que foi alocada a área 1, pode explicar os elevados valores de IC mensurados pelos PE de acionamento manual e PEH nas primeiras camadas. O PE de acionamento manual não conseguiu identificar mudanças acentuadas de IC ao longo do perfil e os valores foram muito parecidos em todas as camadas, seguindo uma tendência diferente dos outros equipamentos. O PI apresentou, na camada de 0 a 0,05 m, IC nulo devido principalmente ao fato de que este penetrômetro não consegue mensurar a primeira camada já que seu peso resulta numa penetração da haste no solo sem haver acionamento do êmbolo, interferindo na primeira leitura. Ainda na área 1 pode-se notar



**Figura 1.** Índice de cone - IC (MPa) e desvio padrão no perfil das três áreas para o penetrômetro de impacto (PI), penetrômetro eletrônico de acionamento manual (PE) e penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico (PEH)

que cada equipamento diagnosticou a camada mais compactada em profundidades distintas. O PEH identifica uma provável camada compactada na profundidade próxima a 0,40m, diferentemente do que o PI, entre 0,20 e 0,30 m. No PE de acionamento manual o maior valor de IC está a 0,20m, na maior profundidade.

Na área 2 os três penetrômetros diagnosticaram a camada de maior compactação por volta de 0,35 a 0,45 m, e a tendência das curvas de IC ao longo do perfil se mostra semelhante, especialmente entre PI e PEH, porém o PI apresenta redução no valor do IC aos 0,30 m de profundidade. O PI mensurou IC nulo na primeira camada (entre 0 a 0,05 m), assim como ocorreu para a área 1. O PE apresentou redução de IC na camada de 0,10 m.

Na área 3 os três equipamentos apresentaram curvas de IC com a mesma tendência de aumento do valor de IC com o aumento da profundidade, sendo que o PI apresentou valor decrescente na camada entre 0,05 a 0,10 m, diferentemente da tendência das curvas de IC para os outros dois penetrômetros. A curva de IC do PEH apresentou a característica de um solo revolvido, com menores valores nas camadas superficiais, com tendência de aumento dos valores com o aumento da profundidade e uma abrupta mudança entre a camada de 0,25 a 0,30 m, caracterizando a ocorrência de possível “pé-de-grade”.

A Tabela 1 apresenta os valores de teor de água obtidos, expressos em porcentagem. Observa-se que os teores de água não variaram ao longo dos perfis não servindo, então, como indicador de mudança de tendências nos valores de IC, com exceção da área 2, em que o teor de água tem leve crescimento onde as curvas de IC apresentaram redução da tendência de crescimento dos valores de IC com a profundidade. Orlando et al. (2000) confirmam haver tendência de diminuição dos valores de IC com o aumento do teor de água, na faixa de 25 a 45%. Os autores citam, ainda, que a maior homogeneidade dos valores de IC ocorre na faixa de 35% devido, provavelmente, a esse valor estar na faixa de friabilidade do solo e, tanto acima quanto abaixo dessa faixa, a tendência é que o CV dos valores de IC aumente.

**Tabela 1.** Valores de teor de água do solo (%) nas áreas

Prof. (m)	Área1	Área2	Área3
0 a 0,1	10,0	14,1	12,0
0,1 a 0,2	9,7	15,1	12,4
0,2 a 0,3	10,7	15,1	12,9
0,3 a 0,4	10,6	15,7	13,2
0,4 a 0,5	9,4	16,9	13,1

Os valores de umidade apresentados na Tabela 1 se mostram abaixo dos valores do intervalo considerado ideal para mensuração de IC, entre 20 e 40 % de teor de água o que, sem dúvida, pode explicar a grande variação de valores de IC obtidos. Teores de água abaixo do nível ótimo para mensuração tendem a tornar os valores de IC maiores do que realmente são, além de diminuir a homogeneidade dos dados obtidos (Orlando et al., 2000; Freddi et al., 2006; Lima et al., 2007).

A Tabela 2 apresenta os teores de argila, areia e silte da análise granulométrica do solo das três áreas. Observa-se que

a partir dos valores de argila e silte os solos das áreas 2 e 3 são argilosos e da área 1, muito argiloso (EMBRAPA, 1999). A presença de elevados teores de argila confere, ao solo, maior densidade e, por consequência, também maior nível de resistência à penetração.

**Tabela 2.** Teores de argila, areia e silte (%) das três áreas em duas camadas (0 a 0,20 m e 0,20 a 0,50 m)

Área	Profundidade (m)	Argila	Areia	Silte
		(%)		
1	0 a 0,20	57,4	12,3	30,3
	0,20 a 0,50	64,4	11,9	23,7
2	0 a 0,20	40,4	13,8	45,8
	0,20 a 0,50	43,4	13,3	43,4
3	0 a 0,20	52,9	15,0	32,1
	0,20 a 0,50	56,3	15,1	28,6

Quanto maior o teor de argila no solo mais este estará suscetível à compactação (Folegatti, et al., 1990; Moraes et al., 1995; Souza et al., 2004; Tavares & Ribon, 2008b); contudo, não existem estudos que indiquem os níveis de argila no solo que determinem uma relação direta entre teor de argila e compactação. A presença da argila influencia na formação dos agregados e na macroporosidade, o que está diretamente relacionado à compactação do solo (Folegatti et al., 1990). Moraes et al. (1995) afirmam que menores teores de argila no solo resultaram em níveis mais baixos de compactação haja vista que a capacidade de agregação da areia é muito menor do que a da argila.

Ajayi et al. (2009) afirmam que para uma avaliação criteriosa de parâmetros físicos do solo, mensurados a partir de penetrômetros, tornam-se imprescindíveis a identificação e a separação de diferentes tipos de solo quanto às suas classes texturais.

A Tabela 3 apresenta o resultado do teste de Tukey para os valores de IC (MPa) para cada equipamento nas três áreas e diferentes profundidades avaliadas. Observa-se que na área 1 o valor de IC obtido com o penetrômetro PI e o PEH não diferem estatisticamente entre 0,10 e 0,30 m de profundidade, da mesma forma que o PE e o PEH entre 0,10 e 0,15 m e a partir de 0,30 m. Entre 0 e 0,10 m os valores de IC obtidos com os três penetrômetros diferem entre si, indicando ser esta uma região de maior dificuldade de mensuração, caracterizada por se tratar de uma área de tráfego de máquinas. Na área 2 os valores de IC obtidos com o PI e com o PEH são estatisticamente diferentes em todo o perfil, tal como o resultado obtido com o PEH difere daquele do PE de acionamento manual, com exceção da região entre 0,10 e 0,20 m; já os valores de IC obtidos com o PE diferem daqueles do PI, apenas entre 0,30 e 0,35 m. Na área 3 os valores de IC obtidos com o PEH diferem em todo o perfil com aqueles obtidos com o PE de acionamento manual. Apenas na primeira camada os valores de IC obtidos pelo PI não diferem estatisticamente com os valores obtidos pelo PEH e os valores de IC obtidos com o PE e com o PI não diferem na camada entre 0,10 e 0,30 m.

Observa-se que, com o nível de significância restrito adotado (5%) e para as condições presentes na área 1, onde há tráfego de máquinas e nas áreas 2 e 3, de recorrente mobilização do

**Tabela 3.** Os valores do índice de cone - IC (MPa) obtidos para o penetrômetro de impacto (PI), penetrômetro eletrônico de acionamento manual (PE) e penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico (PEH) nas três áreas e camadas

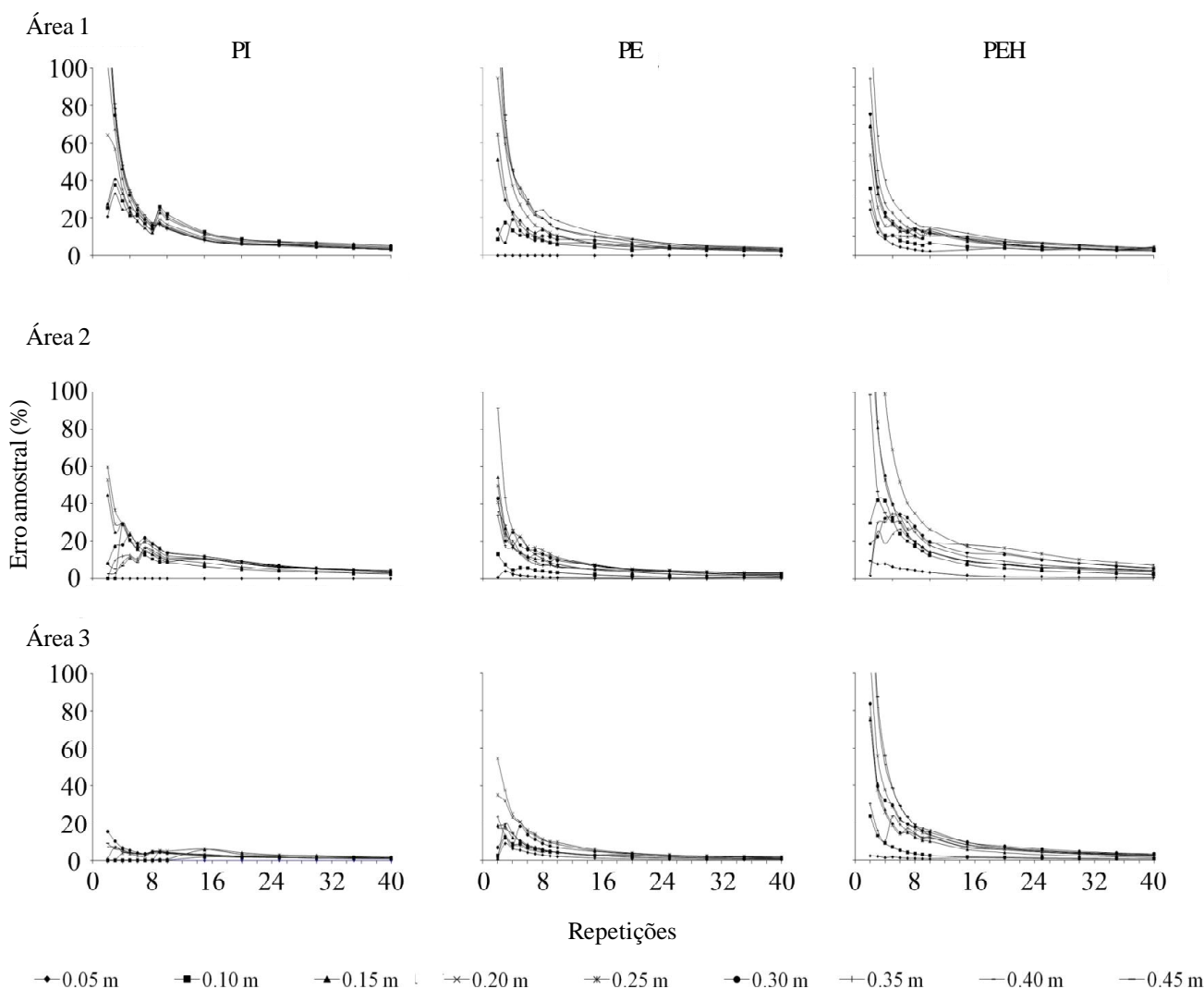
Prof. (m)	IC (MPa)								
	Área 1			Área 2			Área 3		
	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH
0 a 0,05	0,05 c	3,48 a	1,87 b	0 b	0,53 b	0,83 a	0,56 a	0,19 b	0,79 a
0,05 a 0,10	0,92 c	3,86 a	2,35 b	0,75 b	0,48 b	1,34 a	0,10 c	0,54 b	0,84 a
0,10 a 0,15	2,25 b	3,98 a	3,05 ab	1,07 b	1,15 ab	1,70 a	0,43 b	0,62 b	1,10 a
0,15 a 0,20	2,99 b	4,21 a	3,10 b	1,29 b	1,71 ab	2,26 a	0,51 b	0,89 b	1,57 a
0,20 a 0,25	3,16 b	4,26 a	3,10 b	1,73 b	2,45 b	3,57 a	1,02 b	1,50 b	2,09 a
0,25 a 0,30	3,29 b	4,35 a	3,41 b	2,40 b	3,00 b	4,49 a	1,53 b	2,00 b	3,10 a
0,30 a 0,35	2,97 b	4,44 a	3,85 a	2,82 c	3,57 b	5,04 a	1,84 c	2,04 b	3,52 a
0,35 a 0,40	2,68 b	4,53 a	4,12 a	3,24 b	3,86 b	5,02 a	2,11 c	2,64 b	3,91 a
0,40 a 0,45	2,64 b	4,60 a	3,87 a	3,48 b	3,96 b	4,83 a	2,34 b	2,72 b	4,29 a

Médias seguidas por letras iguais na horizontal não diferem estatisticamente entre si ao nível de 0,05 pelo teste de Tukey

solo, resultaram em variações locais acentuadas nos valores de IC principalmente nas primeiras camadas e nas maiores profundidades e, conseqüentemente, a comparação dos resultados indica divergências entre os diferentes equipamentos avaliados. No entanto, para efeitos práticos seriam necessários estudos mais aprofundados para indicar quais os níveis críticos

de IC medidos por diferentes equipamentos e correlacionando o IC com a produtividade obtida por diferentes culturas; assim, as diferenças aqui observadas seriam relevadas ou não.

A Figura 2 apresenta os gráficos de erro amostral em função do número de repetições para cada camada de solo nas três áreas. Pode-se afirmar que, de maneira geral, para todas as



**Figura 2.** Número de repetições e erro amostral calculados para os três penetrômetros nas três áreas e profundidades estudadas

camadas o erro amostral mostrou-se acima de 10% na área 1, até 20 repetições, para os três equipamentos. Na área 2 para o PI esse valor foi atingido com até 25 repetições, para o PE de acionamento manual, até 15 repetições. O PEH sempre apresentou erro amostral acima de 10%; já para a área 3 o erro amostral apresentou-se maior que 10% até 5, 10 e 20 repetições, respectivamente para o PI, PE e PEH. Nota-se também que o erro amostral para até 5 repetições se mostra invariavelmente acima de 10%. Tavares Filho & Ribon (2008b) verificaram que para o nível de 10% de erro amostral o número de repetições ideal seria igual a 10 para o penetrômetro de impacto.

Observa-se que os erros amostrais foram maiores justamente com o equipamento que apresenta maior controle operacional. O penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico permite trabalhar com velocidade de penetração constante, garantindo dados mais confiáveis, o que gera questionamentos sobre a possível atenuação de variação de valores de IC nos demais equipamentos. De maneira geral e observando os gráficos a partir de 15 repetições, conclui-se que a tendência é de que o erro amostral se apresente com valores muito próximos, entre 5 e 15%, sem decréscimos significativos nos seus valores, aumentando o número de repetições.

## CONCLUSÕES

1. De maneira geral, os equipamentos não produziram valores de IC comparáveis em tendências e em magnitude.
2. A partir de 15 repetições o erro amostral não sofre decréscimo significativo em seus valores, variando entre 5 e 15% entre os penetrômetros dentro de cada área amostrada, indicando o número de repetições a serem realizadas em cada ponto amostral.

## LITERATURA CITADA

- Ajayi, A. E.; Dias Júnior, M. S.; Curi, N.; Araújo Júnior, C. F.; Aladenola, O. O.; Souza, T. T. T.; Inda Júnior, A. V. Aplicação de diferentes métodos para estimar a resistência de cinco solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.487-495, 2009.
- ASABE - American Society of Agricultural and Biology Engineering. Standards 2006 93: ASABES313.1 FEB 04 Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2006. p.391-398.
- Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Silva, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. *Engenharia Agrícola*, v.27, p.146-151, 2007.
- Carter, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. *Agricultural Engineering*, v.48, p.348-349, 1967.
- Cavaliere, K. M. V.; Silva, A. P. da; Arvidsson, J.; Tormena, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissoloháplico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.477-485, 2009.
- Costa, A.; Albuquerque, J. A.; Mafra, A. L.; Silva, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.235-244, 2009.
- Domsch, H.; Ehlert, D.; Giebel, A. A.; Witzke, K.; Boess, J. Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, v.7, p.309-326, 2006.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. 212p. Documentos, 1.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção de Informações; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- Folegatti, M. V.; Silva, A. P. da; Maria, I. C. de. Avaliação da resistência do solo utilizando penetrômetro e penetrógrafo. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. Anais... Piracicaba: SBEA, 1990. p.525.
- Foloni, J. S. S.; Lima, S. L. de; Bull, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.49-57, 2006.
- Freddi, O. S.; Carvalho, M. P.; Veronesi Júnior, V.; Carvalho, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.113-121, 2006.
- Lima, C. L. R.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Suzuki, L. E. A. S.; Dalbianco, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ciência Rural*, v.37, p.1166-1169, 2007.
- Molin, J. P.; Magalhães, R. P. de; Faulin, G. D. C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.442-452, 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*, v.54, p.393-403, 1995.
- 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, p.182-185, 2000.
- Roboredo, D.; Maia, J. C. S.; Oliveira, O. J. de; Roque, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.2, p.308-314, 2010.
- Schäffer, B.; Attinger, W.; Schulin, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: Soil physical and mechanical aspects. *Soil & Tillage Research*, v.93, p.28-43, 2007.
- Soares, A. R.; Gherardi, B.; Faria, L. E. O. de; Libardi, M. N.; Silva, C. C.; Marçal, F. M.; Vidal-Torrado, P. Levantamento pedológico semidetalhado do Perímetro Urbano de Piracicaba 1:20.000. In: Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 10, 2002, Piracicaba. Anais... Piracicaba: USP, 2002. CD Rom
- Stolf, R. Fórmulas de transformação dos dados do penetrômetro de impacto em força/unidade de área. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. Anais... Piracicaba: SBEA, 1990, v.2, p.823-836.

- Stolf, R.; Fernandes, J.; Furlani Neto, V. Penetrômetro de impacto - Modelo IAA/Planalsucar - STOLF (recomendações para seu uso). Revista STAB, v.1, p.18-23, 1983.
- Silva Júnior, R. L. da; Molin, J. P.; Amaral, J. R. Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29, 2000, Fortaleza. Anais... Jaboticabal: SBEA, 2000. CD Rom
- Souza, J. M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.699-707, 2004.
- Taboada, M. A.; Alvarez, C. R. Abundância de raízes de milho (*Zea mays* L.) em solos de Argentina sob preparo convencional e plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.769-779, 2008.
- Tavares Filho, J.; Ribon, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.487-494, 2008a.
- Tavares Filho, J.; Ribon, A. A. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.1817-1825, 2008b.