

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Superior de Agricultura Luiz De Queiróz
Projeto de Iniciação Científica

RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES

PROCESSO FAPESP N. 2008/10862-1

Estudos com Penetrometria – Novos Equipamentos e
Amostragem Correta

Orientada: Lucelha Carbonera

Orientadores: Prof. José Paulo Molin

Prof. Carlos T. dos Santos Dias

Piracicaba, Janeiro de 2010

RESUMO

A compactação do solo é um atributo físico amplamente estudado principalmente pelo fato de gerar queda de produtividade devido ao impedimento mecânico no crescimento de raízes, entre outros fatores. Para o seu diagnóstico o indicador mais comumente utilizado é o Índice de Cone (IC) que, apesar de ser indireto, tem se tornado popular e representa a resistência exercida pelo solo à penetração de uma ponteira cônica, parte ativa dos penetrômetros. No mercado estão disponíveis vários modelos, com diferentes princípios de funcionamento e a comparabilidade de resultados entre eles precisa ser suficientemente conhecida. O presente trabalho teve como objetivo comparar três penetrômetros com princípios diferentes de funcionamento e estabelecer um número ideal de repetições para cada ponto amostrado. Utilizou-se um penetrômetro de impacto, um penetrômetro eletrônico e acionamento manual e um penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico em três ambientes. Os equipamentos, de maneira geral, 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. É possível ainda afirmar que a partir de 15 repetições o erro amostral dos valores de IC não sofre decréscimo significativo, variando entre 5 e 20% entre os penetrômetros em cada parcela.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um atributo físico que tem sido estudado de longa data. Vários autores mencionam o seu impacto na produção e produtividade agrícola e nas

propriedades físicas do solo (BENGOUGH & MULLINS, 1990; MORAES et al., 1995; CAMARGO & ALLEONI, 1997; GOERDET et al., 2002; TABOADA & ALVAREZ, 2008). Estudos mais recentes têm mostrado que a compactação do solo afeta a distribuição e o crescimento das raízes (FOLONI et al., 2006).

Moraes et al. (1995) em seu estudo sobre porosidade total, densidade global e IC, principais propriedades físicas do solo relacionadas com compactação, e os seus efeitos sobre o desenvolvimento radicular de uma lavoura de soja em Nitossolo Vermelho (NV) e Latossolo Vermelho (LV), observaram que os valores de densidade do solo, foram maiores para o NV que apresenta maior valor relativo de argila, na ordem de 75%, enquanto o LV apresenta 67%. O valor ótimo de teor de água para mensuração de IC para o NV foi na ordem de 21% e para o LV na ordem de 30%. Os autores verificaram ainda que a elevação da densidade global no NV para $1,30 \text{ kg m}^{-3}$, acarretou uma diminuição de 39% na massa seca das raízes, já o aumento da densidade para $1,23 \text{ kg.m}^{-3}$ no LV promoveu uma redução de 41%.

A compactação do solo é fortemente correlacionada com a resistência do solo à penetração, mensurada por meio da penetrometria (BENGOUGH & MULLINS, 1990), e também a densidade e porosidade do solo. Cavalieri et al. (2009), em seu estudo em Skane no sul da Suécia, sobre a relação da carga aplicada no solo e o efeito desta na compactação em um Cambissolo Háplico sob a cultura da beterraba-açucareira em sistema de preparo de solo convencional e reduzido, afirmam que a pressão exercida por equipamentos que trafegam sobre as lavouras aumenta a densidade do solo, fato evidenciado ao comparar os valores de densidade do solo e IC nas linhas da cultura e nas áreas de tráfego de rodados, variando também com a profundidade, indicando que a carga mecânica favoreceu a compactação em superfície.

Para o diagnóstico da compactação utilizam-se métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos indiretos, o mais conhecido e adotado é o Índice de Cone (IC), que mede a resistência que um determinado solo exerce em relação à penetração de uma ponta cônica. Para exercer esta penetração comumente usam-se equipamentos denominados penetrômetros (FOLEGATTI et al., 1990). Existem no mercado vários tipos e modelos destes equipamentos ou sensores, desde os mais simples como o penetrômetro de impacto (STOLF et al., 1983), largamente utilizado no Brasil, que permite a obtenção do IC a partir de cálculos indiretos (STOLF, 1990); os penetrógrafos mecânicos (CARTER, 1967), os penetrômetros mecânicos equipados com manômetros até os mais práticos que coletam e armazenam dados, como os penetrômetros eletrônicos (JESUS FILHO et al., 2007), operados manual ou hidraulicamente.

Essa variedade de tipos e modelos pode trazer grande variação nos dados obtidos, influenciados principalmente por componentes importantes como a velocidade de penetração e a forma e área de projeção da ponteira que penetra no solo, que são normalizadas pela ASABE (ASAE S 313.1, 2004). Dessa forma, faz-se necessário ter confiança nos dados obtidos por diferentes sensores, especialmente para efeito de comparabilidade de resultados.

Alguns autores têm estudado a semelhança entre variados aparelhos. Beutler et al. (2007) verificaram diferença significativa entre o penetrômetro de impacto e um penetrômetro eletrônico, sendo que os valores obtidos pelo primeiro foram maiores que o do segundo. Por outro lado, Folegatti et al. (1990) compararam um penetrômetro de impacto e um penetrógrafo mecânico e observaram que os aparelhos comparados se mostraram estatisticamente iguais. Verificaram ainda, certa dificuldade na identificação dos valores máximos de IC obtidos pelo penetrógrafo mecânico. Também Roque et al.

(2003) verificaram semelhança entre os resultados obtidos com um penetrômetro de impacto e um penetrômetro equipado com um manômetro para leitura de pressão.

Outro aspecto importante na utilização em campo do indicador IC para diagnóstico e monitoramento da compactação do solo é a grande variabilidade entre as leituras dos valores obtidos com os diferentes penetrômetros. Domsch et al. (2006) utilizaram um penetrômetro com quatro hastes para obter leituras simultâneas de IC e observaram que a variação entre os valores obtidos pelas quatro hastes em um mesmo ponto amostrado mostrou-se elevada, sendo que a maior relação entre os valores obtidos pelas hastes, comparação em par, resultou em $R=0,57$. Porém, quando expressa a média das quatro leituras, foi possível mapear com maior confiabilidade a variabilidade do IC na área amostrada.

Oliveira et al. (2008) em um estudo sobre IC em área comercial de cana-de-açúcar utilizando um penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico, observaram que o coeficiente de variação (CV) dos dados obtidos de IC compostos por 3 repetições para cada ponto amostrado, foi superior a 30%. Souza et al. (2004) em seu estudo sobre dependência espacial de atributos físicos de solo, inclusive IC, em solo sob a cultura de cana-de-açúcar, em Guariba-SP, afirmam que o CV de IC mostrou-se muito alto, na ordem de 39 % na profundidade de 0 a 0,20 m e classificado como alto na profundidade de 0,20 a 0,40 m , na ordem de 28%.

O uso de penetrômetros para fins de diagnóstico em grandes áreas exige tempo e dispêndio com mão-de-obra e com o advento das práticas de agricultura de precisão essa amostragem passa a ser georreferenciada e em grande quantidade. No entanto, normalmente não são coletadas repetições ou subamostras em cada ponto amostral. Tavares Filho & Ribon (2008) afirmam que pesquisas que citam número de amostras representativas para estudos de compactação utilizando-se o penetrômetro de impacto

são escassas e as repetições feitas em campo são variáveis e na maioria das vezes baseadas na relação custo-benefício, o que pode levar as repetições não suficientes para avaliação e conseqüentes resultados não representativos. Os autores estudaram aspectos relativos ao número ideal de repetições para cada ponto amostrado utilizando a média do IC e o intervalo de confiança da população amostrada e por meio da estatística clássica considerando o número de amostras e o desvio padrão da população amostrada. O número de repetições representativas para IC variou com o sistema de manejo, a profundidade de amostragem e o tipo de amostragem (aleatória e sistemática); 10 repetições por ponto amostrado na profundidade de 0 até 0,60 m permitiu homogeneidade dos dados com erro amostral na ordem de 10%, tornando os dados por eles obtidos muito mais confiáveis.

Recentemente têm sido disponibilizados novos modelos de penetrômetros com coleta de dados automatizada e o seu uso tende a se popularizar. Apesar de alguns trabalhos compararem o desempenho de penetrômetros, se faz necessários estudos que abranjam a diversidade de equipamentos de mercado, com seus diferentes princípios de funcionamento, alguns deles com alguma forma de controle da velocidade de deslocamento, que sabidamente influencia nos valores de IC (LINS & SILVA, 1999).

A comparação de diferentes princípios de penetrometria é possível em mesmas condições de solo e quanto maior número de repetições maior e a confiabilidade nos dados obtidos. Assim, esse trabalho foi conduzido, com o objetivo de comparar equipamentos com seus distintos princípios de funcionamento e determinar um número recomendável de repetições para a caracterização de um ponto amostral de IC.

MATERIAL E MÉTODOS

Os penetrômetros 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, faz-se necessário o uso de fórmulas para transformar os valores de impactos e profundidade de penetração em leituras expressas em pressão. A equação 1, comumente utilizada, considera algumas variáveis como o peso do êmbolo e altura de queda do mesmo, o peso total do equipamento, área de projeção da ponteira, entre outras (STOLF, 1990).

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

onde,

RP – resistência a penetração

N - número de impactos necessários para penetrar-se 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. Este equipamento possui um sensor tipo sonar que indica a profundidade e calcula velocidade de penetração avisando ao usuário se a

velocidade está fora do padrão, anulando a medição. Este penetrômetro possui uma CPU interna que armazena os dados coletados e possui interface direta com o computador; 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 Jr. 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 instalado no cilindro hidráulico. Esses dados são transferidos para um software para um computador portátil.

Foram feitas coletas de leituras em três áreas distintas, situadas nos limites da ESALQ/USP (22°42'34"S e 47°37'55"O). As parcelas de trabalhos possuem 36 m² (6 m por 6 m), e nelas foram coletadas 40 leituras com cada penetrômetro aleatoriamente e foi coletada 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 da parcela 1 é uma área marginal a uma lavoura de grãos, sendo comum o tráfego de colhedoras e tratores na área; o solo desta parcela é identificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico léptico de textura argilosa e horizonte A moderado. Na parcela 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 havia uma lavoura de milho. O solo da área foi identificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, A moderado e textura argilosa. A parcela 3 encontra-se em uma área com preparo convencional, cultivada com milho antecedido de café arada,

escarificada e gradeada. A mensuração de IC na área foi feita dois meses após a gradagem da área. O solo da parcela 3 foi identificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, textura argilosa a muito argilosa. A identificação e classificação dos solos foram extraídas do levantamento feito por Vidal Torrado & Sparovek (1993).

Para determinação granulométrica e de teor de água nas parcelas foram retiradas quatro amostras de solo para compor uma amostra composta em camadas de 0,10 m. O método utilizado para a determinação do teor de água foi o gravimétrico. As amostras de solo foram colocadas em estufa à 105°C por 24 horas. A análise granulométrica foi feita através do método de sedimentação para aferir a proporção em porcentagem da presença de areia, argila e silte e determinar a classe textural do solo das parcelas estudadas.

A avaliação inicial dos dados foi feita por meio de estatística descritiva dos valores obtidos nos 40 pontos com cada penetrômetro, em camadas de 0,05 m. Esses dados posteriormente foram submetidos à comparação entre as médias obtidas pelos equipamentos para verificar se há diferença significativa entre suas leituras pelo teste de Tukey utilizando-se o programa estatístico SAS 9.1.3 (Statistic Analysis Systems[®], 2002-2003). Também foi feita a determinação do número de repetições necessárias para caracterizar adequadamente um ponto de leitura de IC utilizando-se como parâmetro o valor erro amostral para 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 repetições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos pelas leituras. Os gráficos mostram o valor de IC no perfil de cada parcela, no intervalo de 0,05 m, gerados a partir da média

das 40 leituras, para cada equipamento. Observa-se que as curvas de IC gerada por cada penetrômetro, dentro de uma mesma parcela e de maneira geral, seguem a mesma tendência ao longo do perfil. Especialmente nas parcelas 2 e 3, observa-se que os três equipamentos foram capazes de identificar a camada de maiores valores de IC, diagnosticando assim uma possível camada compactada. No entanto há defasagens de grandezas, especialmente na parcela 1, entre o PE de acionamento manual e os outros dois. O tráfego intenso de maquinários na área onde foi alocada a parcela 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, 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. Isto se deve, principalmente ao fato de que este penetrômetro não consegue mensurar esta primeira camada já que o seu peso resulta numa penetração da haste no solo sem haver acionamento do embolo, interferindo na primeira leitura. Ainda na parcela 1 pode-se notar que cada equipamento diagnostica a camada mais compactada em profundidades distintas. O PEH identifica como uma possível camada compactada na profundidade entre 0,10 a 0,15 m e 0,35 a 0,45 m, diferentemente do que o PI, que a identifica entre 0,20 e 0,30 m. No PE de acionamento manual o maior valor de IC está a 0,45 m, na maior profundidade.

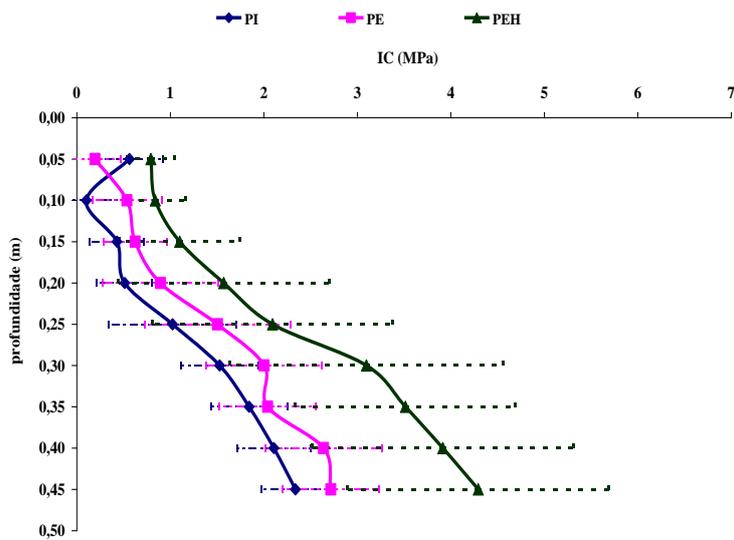
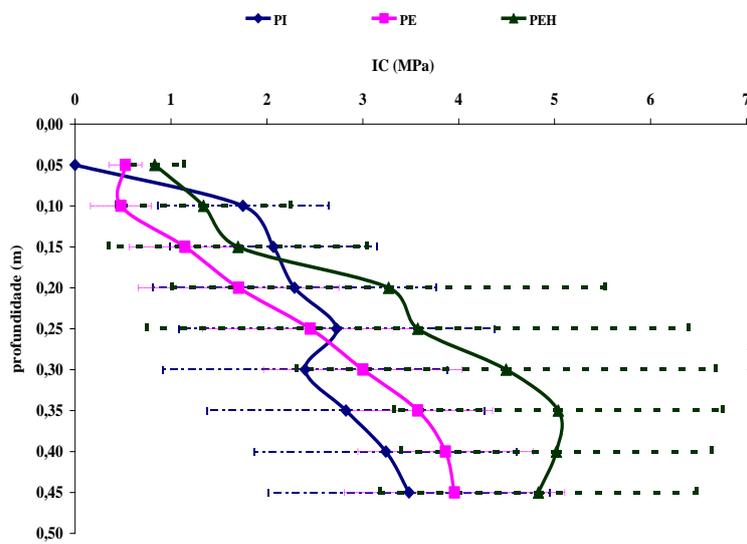
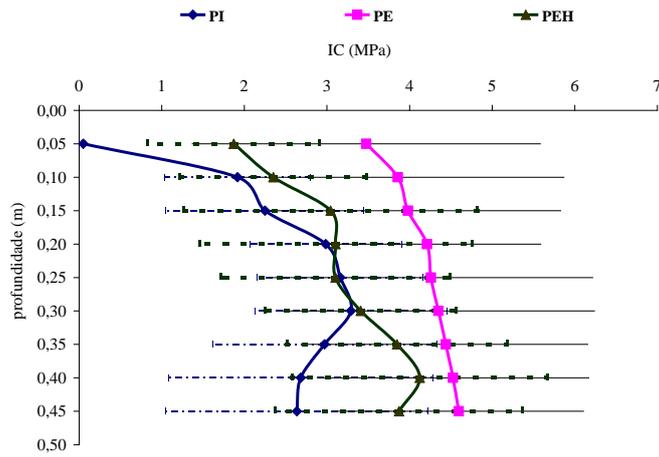


Figura 1. Gráfico de IC (MPa) e desvio padrão no perfil das três parcelas para o penetrômetro de impacto (PI), penetrômetro eletrônico de acionamento manual (PE) e penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico (PEH).

Na parcela 2 os três penetrômetros diagnosticam a camada de maior compactação por volta de 0,35 a 0,45 m. Nesta, a tendência das curvas de IC ao longo do perfil se mostra semelhante, especialmente entre PI e PEH, porém o PI apresenta uma 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 parcela 1. O PE apresentou uma redução de IC na camada de 0,10 m.

Na parcela 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 um valor decrescente na camada entre 0,05 a 0,10 m, diferentemente da tendência das curva 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 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 como indicador de mudança de tendências nos valores de IC, com exceção da parcela 2 onde 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 que há uma tendência de diminuição dos valores de IC com o aumento do teor de água, na faixa de 25% a 45%. Os autores ainda citam

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 desta faixa, a tendência é que o CV dos valores de IC aumente.

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

Prof. (m)	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
0 a 0,10	10,0	14,1	12,0
0,10 a 0,20	9,7	15,1	12,4
0,20 a 0,30	10,7	15,1	12,9
0,30 a 0,40	10,6	15,7	13,2
0,40 a 0,50	9,4	16,9	13,1

Os valores de umidade apresentados na Tabela 1 mostram-se abaixo dos valores do intervalo considerado ideal para mensuração de IC, o que possivelmente 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 o realmente são, além de diminuir a homogeneidade dos dados obtidos (ORLANDO, e al. 2000).

A Tabela 2 apresenta os teores de argila, areia e silte da análise granulométrica do solo das três parcelas. Observa-se que a partir dos valores de argila e silte, os solos das três parcelas são argilosos, sendo a camada de 0,2 a 0,5 m para a parcela 1 é muito argilosa. A presença de elevados teores de argila conferem ao solo maior densidade e por consequência um maior nível de compactação.

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

Parcela	Profundidade (m)	Argila	Areia (%)	Silte
1	0 a 0,2	57,4	12,3	30,3
	0,2 a 0,5	64,4	11,9	23,7
2	0 a 0,2	40,4	13,8	45,8
	0,2 a 0,5	43,4	13,3	43,4
3	0 a 0,2	52,9	15,0	32,1
	0,2 a 0,5	56,3	15,1	28,6

Quanto maior o teor de argila no solo mais este estará suscetível à compactação (SOUZA et al., 2004; FOLEGATTI, et al., 1990; Moraes et al., 1995), , 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 a compactação do solo (FOLEGATTI, et al., 1990). Moraes et al. (1995) afirmam que menores teores de argila no solo resultaram em níveis mais baixo de compactação, pois a capacidade de agregação da areia é muito menor do que a da argila.

A Tabela 3 apresenta o resultado do teste de Tukey para os valores de IC (MPa) para cada equipamento nas três parcelas e profundidades estudadas. Observa-se que na parcela 1 o valor de IC obtido com o penetrômetro PI e o PEH não diferem estatisticamente entre 0,15 e 0,30 m de profundidade, da mesma forma o PE e o PEH entre 0,30 a 0,45 m. Entre 0 e 0,10 m os valores de IC obtidos com os três penetrômetros diferem entre si, indicando ser essa uma região de maior dificuldade de mensuração, especialmente em solos mobilizados. Na parcela 2 os valores de IC obtidos com o PI e com o PEH são estatisticamente diferentes em todo o perfil, assim como o resultado obtido com o PEH difere daquele do PE de acionamento manual. Já os valores de IC obtidos com o PE diferem daqueles do PI, apenas entre 0,10 e 0,20 m. Na parcela

3 os valores de IC obtidos com o PEH diferem em todo o perfil com aqueles obtidos com o PE de acionamento manual, que apenas não difere estatisticamente aos valores de IC obtidos com o penetrômetro de impacto na primeira camada. Observa-se que com o nível de significância adotado e para as condições estabelecidas nas parcelas, os resultados não são rigorosamente comparáveis. As diferenças significativas indicam que não foram obtidas as mesmas informações. No entanto, para efeitos práticos, seriam necessários estudos mais aprofundados para indicar quais os níveis críticos de IC para as culturas e assim as diferenças aqui observadas seriam relevadas ou não.

Tabela 3. Teste de Tukey para os valores de IC (MPa) para o penetrômetro de impacto (PI), penetrômetro eletrônico de acionamento manual (PE) e penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico (PEH) nas três parcelas e camadas.

Prof. (m)	IC (MPa)								
	Parcela 1			Parcela 2			Parcela 3		
	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH
0,00 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

A Tabela 4 apresenta os valores de coeficiente de variação (CV) do IC obtidos com os três penetrômetros para as três parcelas e camadas.

Tabela 4. Valores de CV(%) dos IC para as três parcelas nas camadas para o penetrômetro de impacto (PI), penetrômetro eletrônico de acionamento manual (PE) e penetrômetro eletrônico de acionamento hidráulico (PEH).

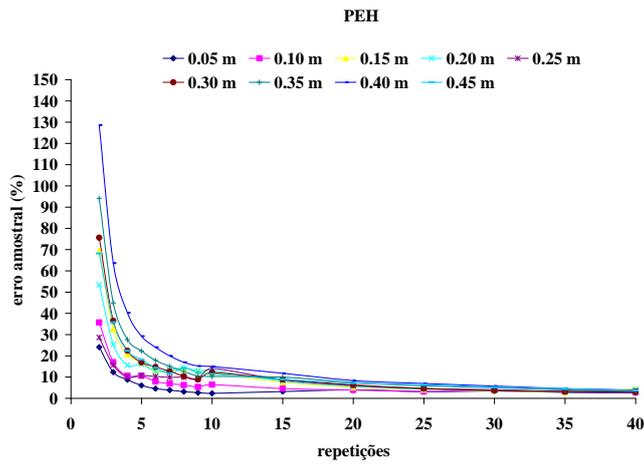
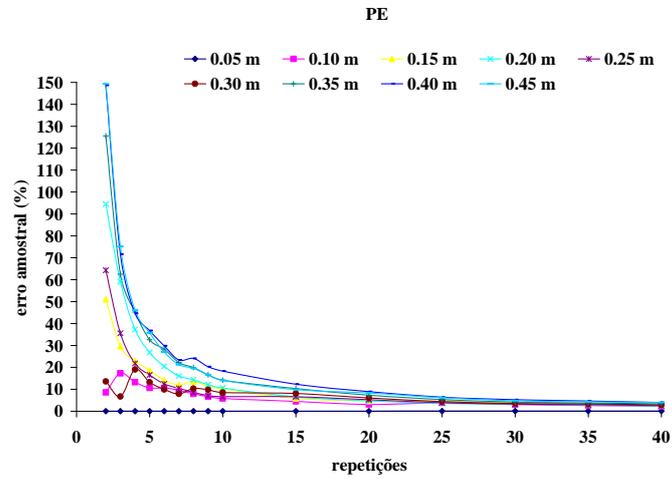
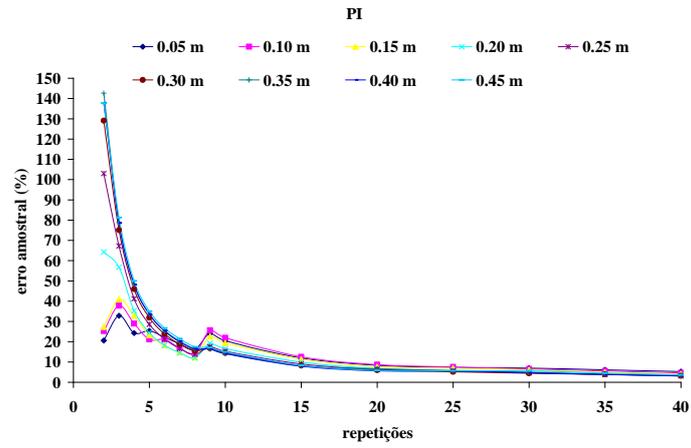
Profundidade (m)	Parcela 1			Parcela 2			Parcela 3		
	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH	PI	PE	PEH
	CV (%)								
0 a 0,05	73,0	55,7	29,3	-	33,9	66,6	-	21,8	23,6
0,05 a 0,10	68,0	48,1	78,0	13,4	63,3	27,9	39,2	30,4	31,0
0,10 a 0,15	60,4	58,4	53,3	32,8	50,9	47,0	25,2	52,1	27,6
0,15 a 0,20	48,9	53,1	30,9	51,2	66,6	53,4	23,3	66,1	51,9
0,20 a 0,25	41,5	44,8	31,8	53,3	66,5	45,8	27,5	55,2	45,5
0,25 a 0,30	41,7	33,9	35,3	62,0	50,7	34,5	27,0	40,0	30,7
0,30 a 0,35	37,1	34,7	45,7	51,1	38,1	21,9	22,1	23,5	21,5
0,35 a 0,40	35,1	37,5	59,5	42,2	38,4	23,7	18,8	20,3	19,4
0,40 a 0,45	33,2	38,6	59,5	42,0	38,5	23,9	15,5	14,5	19,0

Pode-se observar que os valores de CV apresentaram-se quase em sua totalidade acima de 20%, o que é considerado alto (GOMES, 1984). Os menores valores de CV para os três equipamentos ocorreram na parcela 3. Valores aceitáveis de CV, de maneira geral, estão entre 10 e 20% (GOMES, 1984), porém devido à grande variabilidade espacial do IC e por ser alterado facilmente por fatores externos, como a carga mecânica exercida principalmente pelo tráfego de máquinas e o pisoteio de animais, torna a dependência espacial entre os valores irregular e pouco expressiva, o que consequentemente leva a valores de CV elevados.

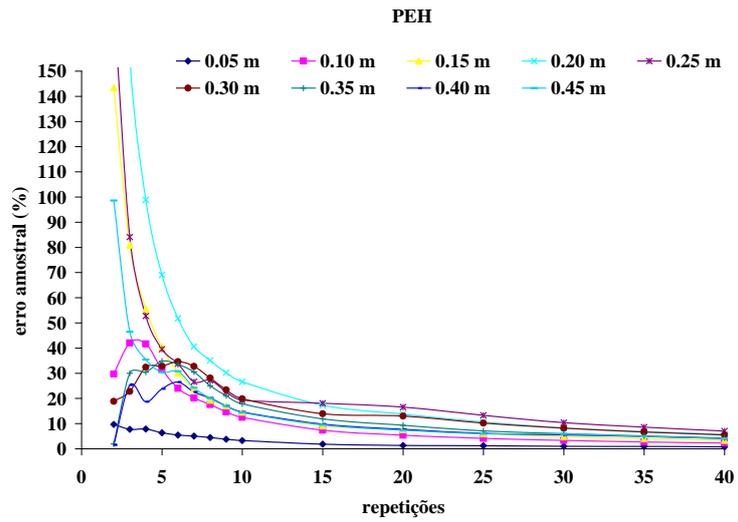
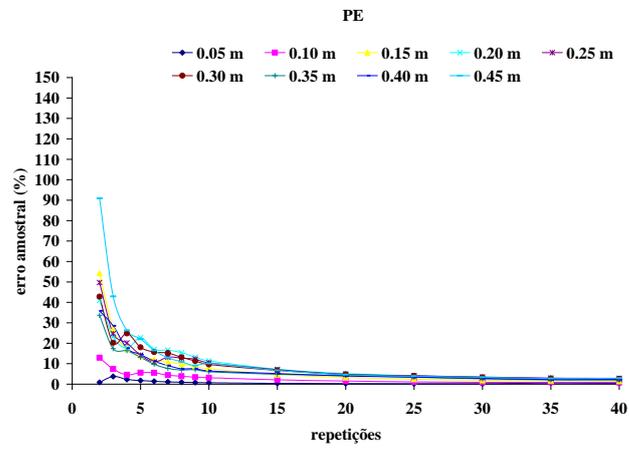
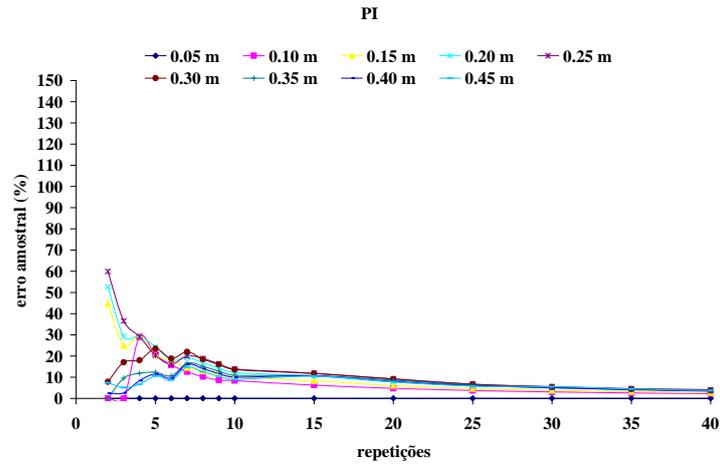
Grego & Viera (2005), em seu estudo sobre a variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho sob preparo convencional, afirmam que dentre as variáveis estudadas, teor de água do solo, porosidade do solo, densidade do solo, IC e retenção de água, o IC foi a propriedade com menor valor de alcance aferido pela análise de semivariogramas, na ordem de 8 m.

A Figura 2 apresenta os gráficos de erro amostral e número de repetições para cada camada para os três penetrômetros nas três parcelas. Pode-se afirmar que, de maneira geral, para todas as camadas, o erro amostral mostrou-se acima de 10% na parcela 1 até 20 repetições e para os três equipamentos. Na parcela 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 parcela 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 mostra-se muito maior. Tavares & Ribon (2005) verificaram que para o nível de 10% de erro amostral o número de repetições ideal seria igual a 10 para o penetrômetro de impacto.

Parcela 1



Parcela 2



Parcela 3

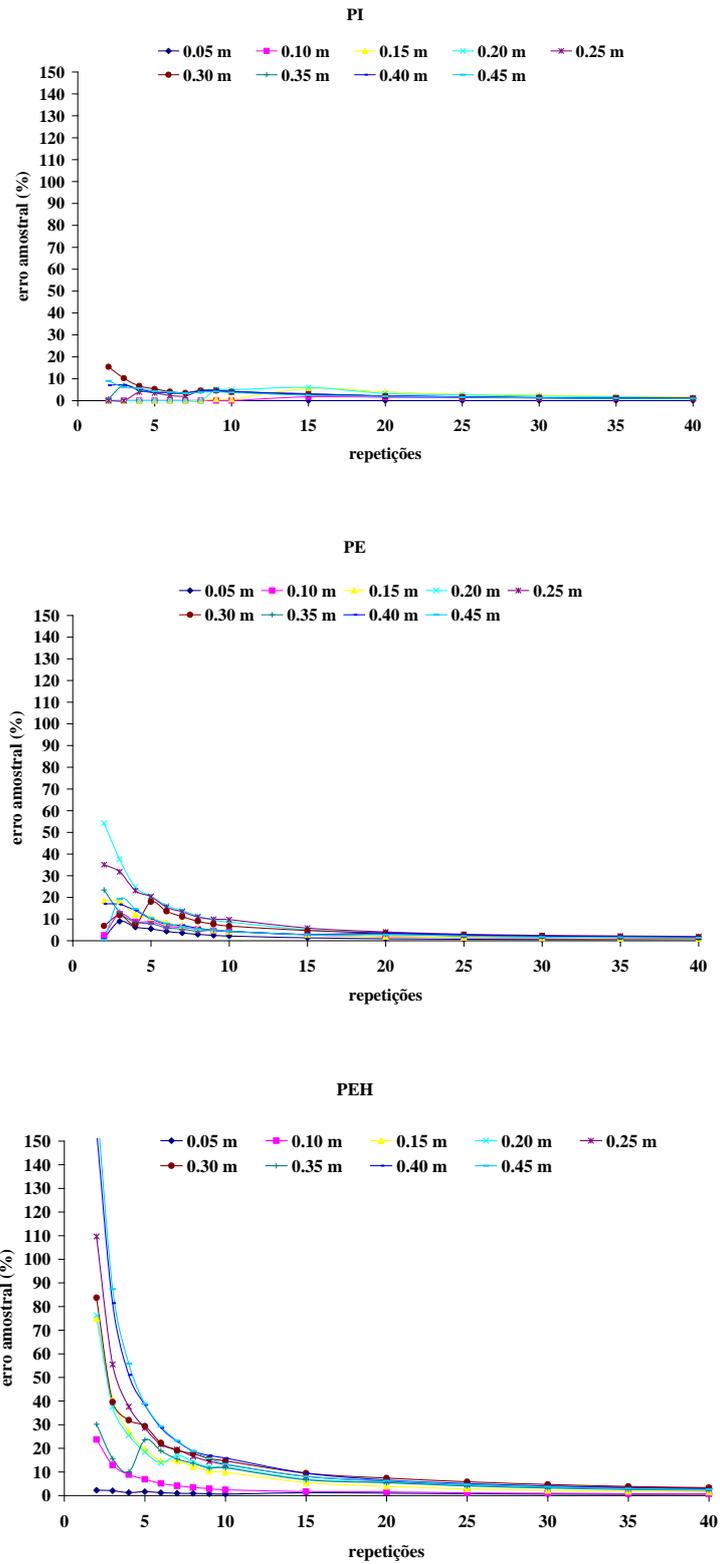


Figura 2. Gráficos de número de repetições e erro amostral calculado para os três penetrômetros nas três parcelas e profundidades estudadas.

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, observando os gráficos, a partir de 15 repetições 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-se o número de repetições.

CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados obtidos pode-se afirmar que os equipamentos, de maneira geral, não produziram valores de IC comparáveis em tendências e em magnitude. No entanto não é claro se essas diferenças são relevantes em diagnóstico de compactação do solo para as culturas. É possível ainda afirmar que 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 parcela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BENGOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, 1990, v.41, n.2, p. 341-358.

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

CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.

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

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P. da; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 2009, v.33, n.3, pp. 477-485.

DOMSCH, H.; EHLERT, D.; GIEBEL, A.; WITZKE, K.; BOESS, J. Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, 2006, vol. 7, n. 5, p. 309-326.

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.

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. 2006, v. 30, n. 1, p. 49-57.

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, 2002, v. 37, n. 2, p. 223-227.

GOMES, F. P. A. Estatística moderna na pesquisa agropecuária. Piracicaba, POTAFOS, 1984. 160p.

GREGO, C. R. & VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma experimental. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2005, v. 29, n. 35, p. 169-177.

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, Pirassununga, 2007.

LINS E SILVA, M.L. Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro, textura argilosa, pelo índice de cone. Campinas: UNICAMP, 1999, 161p. Tese Doutorado.

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, 2006, v.26, n.2, p.442-452.

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, v.54, n.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.

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, Viçosa, 2000, v. 8, n.3, p. 182 a 185.

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, Maringá, 2003, v. 25, n. 1, p. 53-57.

SILVA JUNIOR, R. L. da; MOLIN, J. P.; AMARAL, J. R. Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2000.

SOUZA, J. M.; MARQUES JUNIOR, 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, Viçosa, 2004, v. 28, n.6, p. 699-707.

STABILE, M. C. C. & BALASTREIRE, L. A. Comparação de três receptores GPS para uso em agricultura de precisão. Engenharia Agrícola, 2006, v.26, n.1, p.215-223.

STOLF, R.; Formulas 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, janeiro/fevereiro 1983.

TABOADA, M. A. & ALVAREZ, C. R. Root abundance of maize in conventionally tilled and zero-tilled soils of Argentina. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2008, v.32, n.2, p.769-779.

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*, 2008, v. 32, n. 2, p. 487-494.

VIDAL TORRADO, P. & SPAROVEK, G. Levantamento pedológico detalhado (1:10000) do Campus “Luiz de Queiróz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1993.