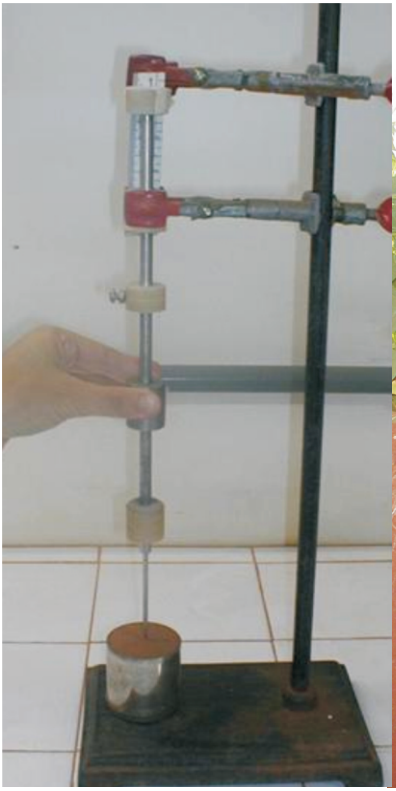
Documentos

ISSN 1517 - 5111
Dezembro, 2007
200

Considerações Teóricas sobre o Cálculo da Resistência Mecânica do Solo à Penetração Determinada com Penetrômetros Dinâmicos



Embrapa

ISSN 1517-5111
Dezembro, 2007

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Documentos 200

Considerações Teóricas sobre o Cálculo da Resistência Mecânica do Solo à Penetração Determinada com Penetrômetros Dinâmicos

Marcos Aurélio Carolino de Sá
João de Deus Gomes dos Santos Junior

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2007

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970 Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
Fax: (61) 3388-9879
http://www.cpac.embrapa.br
sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade
Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*
Secretário-Executivo: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*
Revisão de texto: *Francisca Elijani do Nascimento*
Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*
Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*
Capa: *Jussara Flores de Oliveira*
Fotos: *Marcos Aurélio Carolino de Sá*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Sousa*
Jaime Arbues Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição
1ª impressão (2007): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados
A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados

S111c Sá, Marcos Aurélio Carolino de.

Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos/ Marcos Aurélio Carolino de Sá, João de Deus Gomes dos Santos Junior. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2007.
27 p.— (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111 ; 200)

1. Solo. 2. Classificação. 3. Penetrômetro. I. Santos Junior, João de Deus Gomes dos. II. Título. III. Série.

631.43 - CDD 21

© Embrapa 2007

Autores

Marcos Aurélio Carolino de Sá
Eng. Agrôn., D.Sc.
Pesquisador da Embrapa Cerrados
carolino@cpac.embrapa.br

João de Deus Gomes dos Santos Junior
Eng. Agrôn., D.Sc.
Pesquisador da Embrapa Cerrados
jdsantos@cpac.embrapa.br

Agradecimentos

Aos acadêmicos Raul do Vale Fonseca (Física USP – SP) e Gustavo Borges Cornélio (Agronomia UPIS – DF) pelo auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Apresentação

A resistência mecânica à penetração é um importante parâmetro relacionado com a trafegabilidade, compactação e manejo do solo. O presente trabalho discorre sobre os tipos de penetrômetros mais utilizados na Ciência do Solo – estáticos e dinâmicos, fazendo algumas considerações teóricas sobre o cálculo da resistência à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos, que são equipamentos simples e de custo baixo, quando comparados aos estáticos. Considerações sobre as fórmulas para transformação dos resultados de penetrômetros dinâmicos em força por unidade de área, levando-se em conta a aferição dos componentes dos equipamentos e correções para aceleração da gravidade, são feitas em uma linguagem acessível a estudantes, profissionais e pesquisadores em ciências agrárias que tenham interesse nessa ferramenta.

Roberto Teixeira Alves
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução 11

Considerações gerais 12

Aceleração da gravidade em função da latitude e altitude 12

Relação massa x peso 14

Características dos equipamentos testados e cálculo do IC a partir da fórmula dos holandeses 16

Aferição para o penetrômetro dinâmico de campo modelo Planalsucar-Stolf 17

Correção para aceleração da gravidade 18

Minipenetrômetro dinâmico 19

Aferição dos componentes do penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf 20

Correção para aceleração da gravidade para o penetrômetro Planalsucar-Stolf 23

Minipenetrômetro dinâmico 24

Considerações finais 24

Referências 25

Abstract 27

Considerações Teóricas sobre o Cálculo da Resistência Mecânica do Solo à Penetração Determinada com Penetrômetros Dinâmicos

Marcos Aurélio Carolino de Sá
João de Deus Gomes dos Santos Junior

Introdução

A resistência mecânica que o solo oferece à penetração expressa pelo índice de cone (IC) é utilizada na caracterização de propriedades físicas e mecânicas do solo relacionadas à trafegabilidade, compactação e manejo (CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991), sendo um dos fatores que mais afeta o crescimento radicular e a produtividade (COLLARES et al., 2006). Durante as medições de resistência em um determinado solo, o IC varia em função de atributos como densidade aparente (Ds) e conteúdo gravimétrico (U) ou volumétrico (θ) de água. Entre diferentes solos, a textura passa a exercer influência nos resultados (BUSSCHER, 1990; IMHOFF et al., 2000).

A determinação do IC pode ser feita com o uso de penetrômetros estáticos, os quais podem ser dinamométricos ou eletrônicos. O termo "estático" deve-se ao fato de que esses equipamentos possuem velocidade de penetração constante, que para testes de campo não deve exceder 30 mm s^{-1} (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1999) e para testes de bancada em laboratório, 8,2 mm s^{-1} (LOWERY; MORRISON JR., 2002). No primeiro caso, quando os penetrômetros são operados manualmente, a força física do operador pode interferir na taxa de penetração e, conseqüentemente, nos resultados (VAZ; HOPMANS, 2001; HERRICK; JONES, 2002), sendo muito difícil a realização de medidas em

solos cascalhentos, muito argilosos e/ou secos. Alguns autores propõem sistemas mecânicos para manutenção da velocidade constante em testes de campo (SANTOS; LANÇAS, 1999; BIANCHINI et al., 2002). Para testes de laboratório, são necessários sistemas elétrico-eletrônicos, compostos por atuador linear elétrico com motor de passo, sistema para controle de velocidade e deslocamento, sendo a força registrada em célula de carga e os dados processados em microcomputador, conforme descrito por (TORMENA et al., 1998). Todavia, tais sistemas apresentam custos elevados.

Uma alternativa aos penetrômetros estáticos é a utilização de penetrômetros dinâmicos ou de impacto, os quais apresentam custos mais baixos. Os penetrômetros dinâmicos apresentam princípio de penetração no solo diferente dos estáticos, pois a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico que cai de altura constante em queda livre. Nesse caso, o número de impactos necessários para que a haste atravesse determinada camada de solo varia em função da resistência oferecida pelo mesmo, razão do nome "dinâmico". Tais equipamentos independem da força física do operador e dispensam aparatos eletrônicos sofisticados. A utilização desses equipamentos em condições de campo vem sendo recomendada por vários autores (STOLF, 1991; STOLF et al., 1998; VAZ; HOPMANS, 2001; HERRICK; JONES, 2002) e mais recente, em condições de laboratório (SÁ et al., 2007).

Neste trabalho, são descritas as deduções das fórmulas para transformação dos resultados de penetrômetros dinâmicos em força por unidade de área, levando-se em conta a aferição dos componentes de dois equipamentos testados como exemplo e a correção da aceleração da gravidade para condições locais da Embrapa Cerrados.

Considerações gerais

Aceleração da gravidade em função da latitude e altitude

Na literatura referente a penetrômetros dinâmicos, não foi encontrada nenhuma referência a respeito do efeito da correção da aceleração da

gravidade no cálculo da resistência à penetração, fato que motivou a realização do presente trabalho.

O valor normalmente utilizado para representar a aceleração da gravidade é 9,80665 m s^{-2}, tido como o valor padrão, e foi determinado a 45° de latitude, ao nível do mar em 1901 pelo Comitê Geral de Pesos, de acordo com a Sociedade Astronômica Brasileira (SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA, 2007). Entretanto, a aceleração da gravidade varia em função da latitude e da altitude. Com relação à primeira, ao nível do mar, varia de 9,78039 m s^{-2} na linha do Equador (0° de latitude), até 9,83217 m s^{-2} nos pólos (90° de latitude). Essa variação em função da latitude pode ser visualizada na Fig. 1A, a qual foi obtida a partir da equação 1:

$$gm = 9{,}7805768 - 0{,}000080234645LAT + 0{,}000021645762LAT^2 - 0{,}00000016004556LAT^3 \quad (1)$$

Onde: gm é a aceleração da gravidade ao nível do mar, em m s^{-2}; LAT é a latitude em graus. Essa equação foi ajustada a partir dos dados apresentados no *Handbook of Chemistry and Physics* (WEAST, 1976), e apresenta $R^2 = 0{,}99$.

Com relação à altitude, ocorre uma diminuição linear de $3{,}86 \times 10^{-6}$ m s^{-2} para cada metro acima do nível do mar (WEAST, 1976), o que pode ser expresso pela equação 2:

$$g = gm - 0{,}00000386ALT \quad (2)$$

Onde g é a aceleração da gravidade em m s^{-2}, calculada pela equação 1, e ALT é a altitude, em metros.

Rearranjando as equações 1 e 2, obtemos a equação 3 para estimativa da aceleração da gravidade local, que pode ser utilizada em qualquer latitude e altitude:

$$g = [9{,}7805768 - 0{,}000080234645LAT + 0{,}000021645762LAT^2 - 0{,}00000016004556LAT^3] - (0{,}00000386ALT) \quad (3)$$

O território brasileiro está situado entre as latitudes 5º 16′ 20" N e 33º23′22" S e possui altitudes que variam desde o nível do mar até 2993,7 m, valor representado pelo Pico da Neblina (IBGE, 2004). Para ilustrar a variação da aceleração da gravidade em nossas condições, tendo por base a equação 3, é apresentada a Fig. 1B.

O Bioma Cerrado está localizado entre 2º 21′ e 24º 41′24" S, onde as principais regiões agrícolas situam-se entre 100 m e 1.200 m. Considerando a latitude da Embrapa Cerrados 15º35′30" S (15,5916º) e a altitude 1.100m, pela equação 3, a aceleração da gravidade calculada para esse local é 9,77974 m s^{-2}, portanto uma diferença de 0,02691 m s^{-2}.

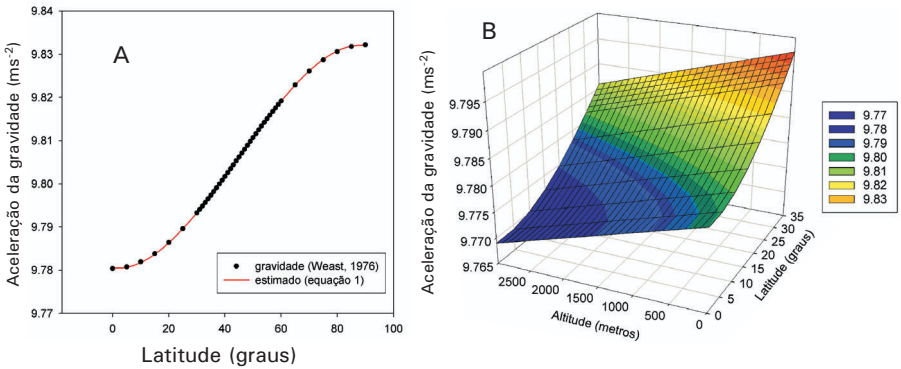


Fig. 1. Variação da aceleração da gravidade em função da latitude ao nível do mar (A) e em função da latitude e altitude, no território brasileiro, estimada pela equação 3 (B).

Relação massa x peso

A unidade adotada para massa é o kg (kilograma). As unidades adotadas para força são o nilton (N) ou o kilograma-força (kgf). No presente trabalho, serão adotadas as relações universalmente utilizadas entre essas unidades de medida independente do valor utilizado para aceleração da gravidade corrigida em função da latitude e altitude pela equação 3. Assim, 1 N corresponde a 0,101972 kgf e 1 kgf corresponde a 9,80665 N.

A força expressa em N corresponde ao produto da massa pela aceleração da gravidade (Equação 4).

$$F = Mxg \qquad (4)$$

Onde F é a força (N), M é a massa (kg) e g a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

Considerando essa relação para os valores de massa dos equipamentos utilizados, apresentados na Tabela 1, temos como exemplo para um valor de massa M = 4 kg:

$$F = Mxg$$
$$F = 4{,}0000x9{,}80665$$
$$F = 39{,}2266N$$

Convertendo-se o valor em N para kgf:

$$39{,}2266N \times 0{,}101972 = 4{,}00001kgf$$

Assim, considerando-se como aceleração da gravidade o valor padrão, temos que um objeto de massa 4 kg corresponde a 4 kgf, uma vez que a diferença na quinta casa decimal deve-se a arredondamentos. Porém, quando se leva em conta o valor corrigido para aceleração da gravidade, estimada para latitude e altitude da Embrapa Cerrados (9,77974 m s^{-1}), temos:

$$F = Mxg$$
$$F = 4{,}0000 \times 9{,}77974$$
$$F = 39{,}11896N$$

Convertendo-se o valor em N para kgf:

$$39{,}11896N \times 0{,}101972 = 3{,}989031kgf$$

Tabela 1. Características dos penetrômetros dinâmicos utilizados.

Característica	Penetrômetro Planalsucar-Stolf		Minipenetrômetro dinâmico de bancada
	Fabricante[1]	Aferido[2]	
M (kg)	4,0000	3,9828	0,10139 ou 0,08403 ou 0,06586 ou 0,05051
Mg (kgf)[3]	4,0000	3,9828	0,10139 ou 0,08403 ou 0,06586 ou 0,05051
Mg (kgf) [4]	3,9890	3,9719	0,10111 ou 0,08380 ou 0,06568 ou 0,05037
m (kg)	3,2000	3,5611	0,14690
mg (kgf) [3]	3,2000	3,5611	0,14690
mg (kgf) [4]	3,1912	3,5513	0,14650
A (cm^2)	1,2900	1,2600	0,11642
h (cm)	20,0 ou 40,0	20,0 ou 40,2	10,0

[1] Valor fornecido pelo fabricante do equipamento.
[2] Valor aferido em balança de precisão.
[3] Valor calculado com base na aceleração da gravidade padrão (9,80665 m s^{-2}).
[4] Valor calculado com base na aceleração da gravidade na Embrapa Cerrados corrigida pela equação 3 (9,77974 m s^{-2}).

Características dos equipamentos testados e cálculo do IC a partir da fórmula dos holandeses

Um estudo dedutivo das principais equações para transformação dos resultados de penetrômetros dinâmicos em força por unidade de área foi feito por Stolf (1991), cuja conclusão foi que a equação denominada "fórmula dos holandeses" (Equação 5) é mais adequada para tal finalidade, em sua forma completa. A dedução dessa expressão foi também apresentada em um estudo de aplicação da técnica em solos pedregosos (STOLF et al., 1998) e em um comentário teórico (STOLF et al., 2005) de validação de sua utilização:

$$IC = \left(\frac{Mg + mg}{A}\right) + \left[\left(\frac{M}{M + m}\right) \times \left(\frac{Mg \times h}{A \times P}\right)\right] \qquad (5)$$

Em que IC é o índice de cone (kgf cm^{-2}); A é a área da base do cone (cm^2); M é a massa que provoca o impacto (kg); m é a massa dos demais componentes do penetrômetro (kg); Mg e mg são os pesos das massas consideradas (kgf); h é a altura de queda de M (cm); P é medida de

penetração unitária ocasionada por um impacto (cm). Para expressar o IC em MPa, basta multiplicar o valor obtido pela equação (em kgf cm^{-2}) por 0,0980665.

As características e os valores calculados para os componentes dos penetrômetros utilizados no presente estudo, levando-se em conta a aceleração da gravidade padrão e corrigida, são apresentados na Tabela 1 e Fig. 2.

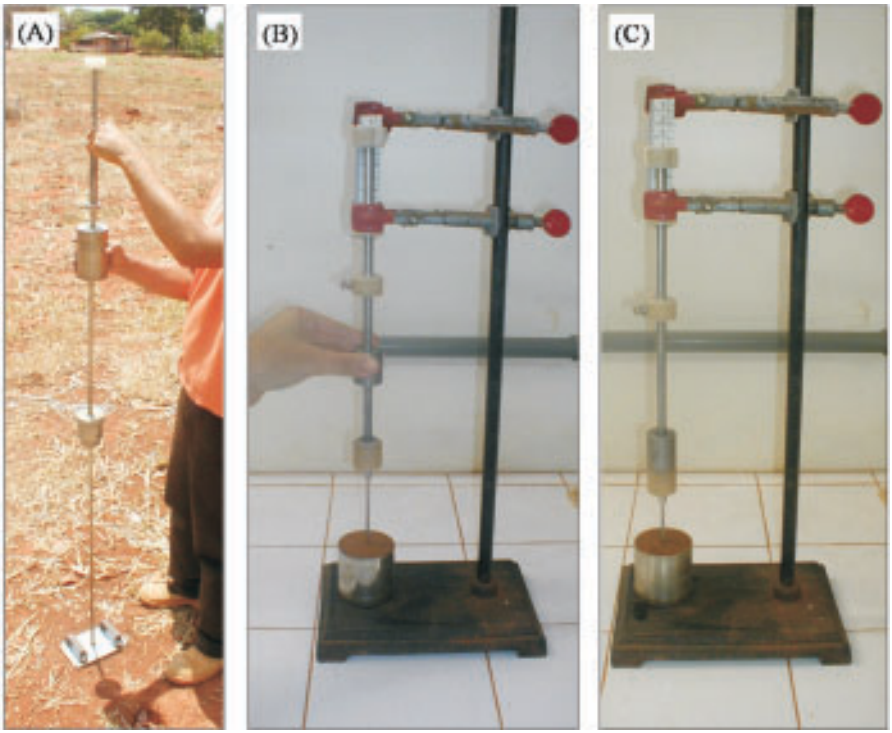


Fig. 2. Penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf (A) e minipenetrômetro dinâmico, antes do impacto (B) e depois do impacto (C).

Aferição para o penetrômetro dinâmico de campo modelo Planalsucar-Stolf

Os valores de massa dos componentes do equipamento foram aferidos em balança com precisão de 0,1 grama, o diâmetro da ponta foi aferido com

paquímetro e altura de queda com régua graduada em milímetros. Aplicando-se na Equação 5 os valores aferidos (Tabela 1), e com base na aceleração da gravidade padrão, temos:

$$IC = \left(\frac{3{,}98281 + 3{,}56111}{1{,}26}\right) + \left[\left(\frac{3{,}98280}{3{,}98280 + 3{,}56110}\right) \times \left(\frac{3{,}98281 \times 40{,}2}{1{,}26 \times P}\right)\right]$$

$$IC = 5{,}98723 + \frac{67{,}08693}{P} \qquad (6)$$

Considerando que P (penetração em cm/impacto) é uma unidade de condutância, utiliza-se na prática o número de impactos (NI) dividido pela profundidade em cm de camada penetrada (P), ou seja, NI/P, conforme proposto por Stolf (1991), o que é expresso pela equação7:

$$IC = 5{,}98723 + \frac{67{,}08693 \times NI}{P} \qquad (7)$$

Dessa forma, IC refere-se agora ao IC médio da camada P que requereu NI impactos para ser transpassada. Para o mesmo equipamento, a equação 8 deduzida por Stolf (1991) se aplica aos dados fornecidos pelo fabricante, os quais podem ser observados na Tabela 1.

$$IC = 5{,}6 + \frac{68{,}9 \times NI}{P} \qquad (8)$$

Quando se procede à aferição das massas dos componentes do equipamento, bem como da área da base do cone, podem ser observados valores diferentes para o IC, conforme expresso pelas equações 7 e 8.

Correção para aceleração da gravidade

Aplicando-se na equação 5 os valores em kgf corrigidos para a aceleração da gravidade local, teremos:

$$IC = \left(\frac{3{,}97189 + 3{,}55134}{1{,}26}\right) + \left[\left(\frac{3{,}98280}{3{,}98280 + 3{,}56110}\right) \times \left(\frac{3{,}97189 \times 40{,}2}{1{,}26 \times P}\right)\right]$$

$$IC = 5{,}98724 + \frac{66{,}90295 \times NI}{P} \qquad (9)$$

Minipenetrômetro dinâmico

Sá et al. (2007) propuseram um minipenetrômetro dinâmico de bancada (Fig. 2) para amostras indeformadas de solo. O equipamento possui quatro opções de peças para impacto (M), cujas características são apresentadas na Tabela 1. Nesse caso, as equações deduzidas para esse equipamento, considerando-se as quatro opções de massa de impacto, altura de queda constante a 10 cm e correção para aceleração da gravidade local, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Equações deduzidas para o minipenetrômetro dinâmico, considerando-se as características apresentadas na Tabela 1 e as diferentes massas que provocam o impacto (M) em kg e o seu peso calculado com base na aceleração da gravidade padrão e local.

M (kg)	Mg (kgf)	Equação	
		.... Aceleração da gravidade padrão	
0,10139	0,10139	$IC = 2{,}13272 + \frac{3{,}55635 \times NI}{P}$	(10)
0,08403	0,08403	$IC = 1{,}98360 + \frac{2{,}62641 \times NI}{P}$	(11)
0,06586	0,06586	$IC = 1{,}82753 + \frac{1{,}75117 \times NI}{P}$	(12)
0,05051	0,05051	$IC = 1{,}69568 + \frac{1{,}11009 \times NI}{P}$	(13)
		..... Aceleração da gravidade local	
0,10139	0,10111	$IC = 2{,}12686 + \frac{3{,}54660 \times NI}{P}$	(14)
0,08403	0,08380	$IC = 1{,}97816 + \frac{2{,}61920 \times NI}{P}$	(15)
0,06586	0,06568	$IC = 1{,}82251 + \frac{1{,}74636 \times NI}{P}$	(16)
0,05051	0,05037	$IC = 1{,}69102 + \frac{1{,}10705 \times NI}{P}$	(17)

Os trabalhos foram conduzidos em área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, DF, latitude 15°35'30" S, longitude 47°42"30" W e altitude 1.100 m. Foram avaliadas duas parcelas cultivadas com feijão, em sistema de preparo convencional com arado de discos e semeadura direta.

Em cada parcela, foram feitos ensaios de resistência à penetração com penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf, com quatro repetições. O índice de cone (IC) expresso em MPa foi calculado pela equação 8, que considera os dados fornecidos pelo fabricante do equipamento e pela equação 7, deduzida após aferição das massas e dimensões do mesmo, considerando-se a aceleração da gravidade padrão e pela equação 9, que leva em conta os dados aferidos e aceleração da gravidade local. Para cada equação, os dados de IC foram posteriormente analisados para cálculo das médias para cada cm de profundidade no perfil do solo, conforme procedimento descrito em Stolf et al. (1983). Em todos os casos, a penetração estática causada apenas pelo peso do equipamento foi desprezada (SÁ et al., 2007).

Foi avaliada a distribuição estatística (média, desvio-padrão, erro-padrão, mínimo e máximo) das diferenças (desvios) entre os resultados calculados pelas equações 7 e 8, bem como 8 e 9 em MPa e em porcentagem.

Para o minipenetrômetro dinâmico, foi demonstrada a maneira de se efetuar o cálculo, com e sem correção para aceleração da gravidade. Foram coletadas duas amostras indeformadas (anéis cilíndricos de 100 cm^3) em cada sistema, na camada 0 cm-5 cm de profundidade. As amostras foram saturadas e submetidas às tensões de 6 e 100 kPa, em câmaras de pressão com placa porosa. Atingido o equilíbrio, as amostras foram submetidas ao teste de resistência à penetração. Em cada amostra, foram feitos três ensaios (repetições), conforme sugerido por Leão et al. (2004). Para o cálculo do IC, foram utilizadas as equações 13 e 17 (M = 0,05051 kg) para as amostras equilibradas à tensão 6 kPa e as equações 10 e 14 (M = 0,10139 kg), para as amostras equilibradas na tensão 100 kPa.

Aferição dos componentes do penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf

Os valores de IC observados foram em geral elevados nos dois sistemas de manejo (Fig. 3), em consonância com o baixo conteúdo de água existente no solo durante as medições. O sistema de semeadura direta apresenta valores

de IC mais elevados do que sob preparo convencional. Os perfis de resistência à penetração em cada sistema de manejo avaliado, calculados a partir da equação 7 e 8, considerando-se ou não a ferição do penetrômetro, foram muito próximos. Visualmente, as diferenças observadas entre os valores calculados, tomando por base as duas equações foi maior para os valores mais elevados de resistência à penetração, que ocorreram na camada entre 10 cm e 30 cm.

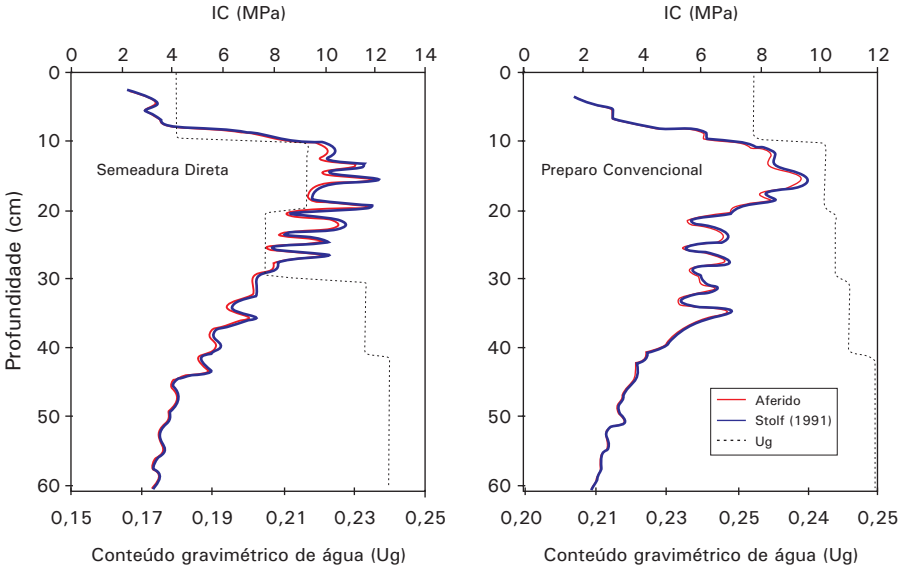


Fig. 3. Conteúdo de água gravimétrico no perfil do solo durante a realização dos ensaios (linha pontilhada) e resistência à penetração expressa pelo índice de cone (IC) no perfil do solo em sistema de semeadura direta e preparo convencional, calculada pela equação original (Equação 8) e pela equação deduzida após aferição (Equação 7). Média de quatro ensaios.

Considerando-se as quatro repetições em cada sistema de manejo, os valores foram em média mais elevados no sistema de semeadura direta, variando de 0,124 a 0,178 MPa, e entre 0,079 e 0,139 MPa no preparo convencional. Isso corresponde a uma diferença percentual média que varia de aproximadamente 1,5 % a 1,9% no preparo convencional, com valores máximos de 2,7 %. Na semeadura direta, a variação percentual média situa-se entre

1,9 % a 2,1 %, com valores máximos de 2,8 %. Os desvios médios ao longo do perfil do solo em cada sistema podem ser observados na Fig. 4.

Com relação à aferição dos componentes do penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf, é importante que seja definido qual será o propósito da medição da resistência à penetração. Se o objetivo for a caracterização do perfil do solo visando apenas identificar a existência e a profundidade de camadas compactadas, operação normalmente realizada em talhões de produção comercial, a equação 8 atenderá plenamente a esse objetivo. Nesse caso, um erro de aproximadamente 3 % no cálculo do IC em MPa pode ser considerado desprezível. Contudo, se o objetivo for a obtenção de resultados de pesquisa, com o objetivo de se comparar sistemas de manejo do solo ou mesmo diferentes equipamentos (CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991), onde normalmente os resultados obtidos são também confrontados com os resultados publicados em literatura, a aferição dos componentes do equipamento (massas e dimensões) é necessária, principalmente pelo fato de que os desvios não são uniformes ao longo do perfil, conforme pode ser observado na Fig. 4.

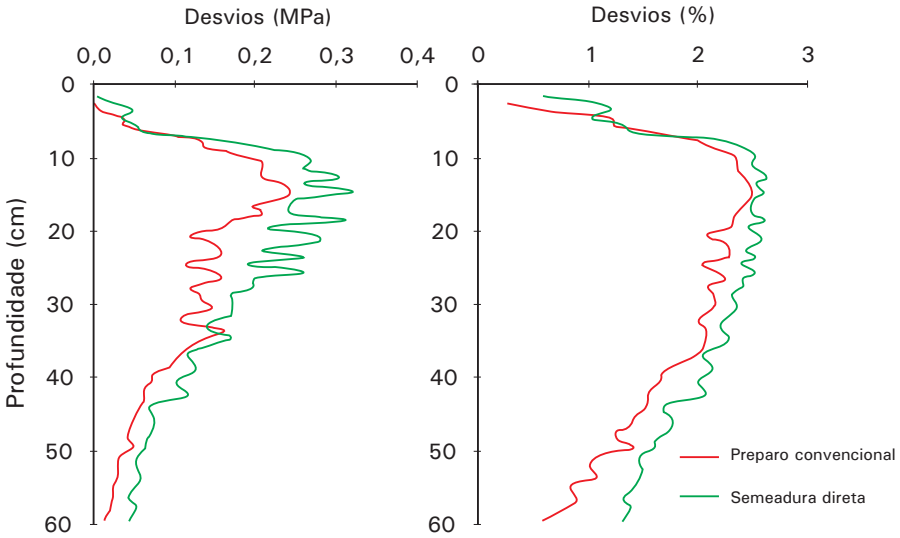


Fig. 4. Distribuição no perfil do solo da média dos desvios (diferenças) entre o índice de cone calculado pela equação original e pela equação deduzida após aferição do penetrômetro para cada sistema de manejo, expressos em MPa e em percentagem. Cada linha cheia representa a média de quatro ensaios.

Correção para aceleração da gravidade para o penetrômetro Planalsucar-Stolf

Nesse caso, os valores calculados pela equação 7, considerando como aceleração da gravidade o valor padrão, foram comparados com os valores calculados pela equação 9, cujos os valores em kgf foram corrigidos pela aceleração da gravidade local (Equação 3). Nos dois casos, os valores calculados pelas duas equações praticamente se sobrepõem em ambos sos sistemas de manejo (Fig. 5). Os valores expressos em MPa são muito baixos, em média de 0,012 a 0,017 MPa, com máximas de 0,026 a 0,038 MPa no preparo convencional e 0,016 a 0,020 na semeadura direta. Percentualmente, essa diferença foi constante, cerca de 0,27 %, que é a própria diferença entre o valor de aceleração da gravidade padrão e o valor corrigido. Essas diferenças podem ser consideradas muito baixas, e, na prática, essa correção dos valores em função da aceleração da gravidade pode ser desconsiderada para ensaios de campo, uma vez que a variabilidade espacial entre repetições num mesmo ensaio é bem maior do que isso (CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991).

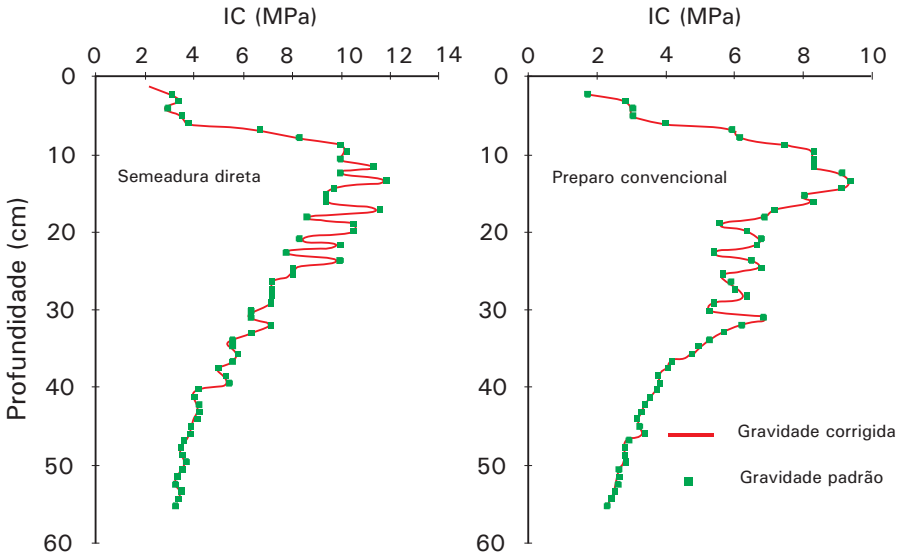


Fig. 5. Resistência à penetração expressa pelo índice de cone (IC) no perfil do solo em sistema de semeadura direta e preparo convencional, calculada, levando-se em conta a aceleração da gravidade padrão e corrigida para cada sistema de manejo. A linha cheia para aceleração da gravidade corrigida e os pontos verdes para aceleração da gravidade padrão representam a média de quatro ensaios.

Minipenetrômetro dinâmico

Na Tabela 3, são apresentadas as características das amostras utilizadas para avaliação da resistência à penetração bem como a distribuição estatística dos valores de IC calculados com e sem correção para aceleração da gravidade. As diferenças de valores entre as amostras, na faixa de 0,002 e 0,009 MPa, podem ser consideradas muito pequenas (0,27 %). Dessa forma, a correção para aceleração da gravidade local pode ser desconsiderada no cálculo da resistência à penetração, pelo fato de essa diferença ser constante e corresponder a diferença entre os valores de aceleração da gravidade padrão e corrigida.

Tabela 3. Densidade, tensão matricial e respectivo conteúdo volumétrico de água das amostras indeformadas durante a realização dos ensaios, valores de índice de cone e respectivos erro e desvio-padrão determinados.

Sistema	Ds	Tensão	θ	IC[1]	erro[3]	Desvio	IC[2]	erro[3]	Desvio
	g cm^{-3}	kPa	cm^3 cm^{-3}	.....	.....	MPa	.....	.....	.....
PD	1,228	6	0,425	3,211	1,043	0,568	3,202	1,040	0,566
PC	1,113	6	0,386	0,804	0,556	0,303	0,802	0,554	0,302
PD	1,317	100	0,341	7,924	1,821	0,992	7,902	1,816	0,989
PC	1,023	100	0,255	1,644	0,664	0,362	1,640	0,663	0,361

[1] Índice de cone calculado conforme valor padrão para aceleração da gravidade.
[2] Índice de cone calculado conforme valor da aceleração da gravidade corrigida para as condições locais.
[3] Valor calculado com base em t ao nível de 5 % de probabilidade.

Considerações finais

Para o penetrômetro dinâmico modelo Planalsucar-Stolf, a aferição das massas dos seus componentes deve ser levada em conta no cálculo do índice de cone quando o objetivo é a obtenção de dados de pesquisa.

Se considerarmos a aceleração da gravidade na linha do equador ao nível do mar (9,78039 m s^{-1}) e nos pólos (9,83217 m s^{-1}), teremos uma diferença de 0,53 % nos cálculos de resistência. Para os equipamentos apresentados, levando-se em conta a aceleração da gravidade padrão (9,80665 m s^{-1}) obtida a 45° de latitude ao nível do mar e o valor corrigido para as condições locais da Embrapa Cerrados (9,77974 m s^{-1}), teremos

uma diferença percentual de 0,27 % nos cálculos de resistência. Se considerarmos a exatidão e a variabilidade das medidas agronômicas no sistema solo-planta, esses valores de 0,27 % e mesmo 0,53 % podem ser considerados muito pequenos. Dessa forma, a correção para aceleração da gravidade nos cálculos de penetrometria pode ser desprezada, assumindo-se como padrão o valor 9,80665 m s^{-1}.

Referências

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE S313.3:** soil cone penetrometer. St. Joseph, 1999. 834 p.

BIANCHINI, A.; MAIA, J. C. S.; MAGALHÃES, P. S. G; CAPPELLI, N; UMEZU, C. K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 332-336, 2002.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a commom water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, p. 519-524, 1990.

CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. The Cone Penetrometer in Relation to Traficability, Compaction and Tillage. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil Analysis**: physical methods. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 339-429.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetratiton resistance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

IBGE. Comunicação Social. **Quatro picos brasileiros têm sua altitude alterada.** Disponível em: <http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=215&id_pagina=1> Acesso em: 19 set. 2007. Publicado em: 13 set. 2004.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 415-423, 2004.

LOWERY, B.; MORRISON JR., J. E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of Soil Analysis:** physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 363-388.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FRANZ, C. A. B. Minipenetrômetro dinâmico para determinação da resistência à penetração em amostras de solo indeformadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n.11, p.1659-1662, nov. 2007.

SANTOS, C. A.; LANÇAS, K. P. Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico. **Energia na Agricultura**, v. 14, p. 55-61, 1999.

SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA. **Glossário**. Disponível em: <http://www.sab-astro.org.br/cesab/newhtml/indice_ad.htm>. Acesso em: 23 out. 2007.

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

STOLF, R.; CASSEL, D. K.; KING, L. D; REICHARDT, K. Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 189-196, 1998.

STOL, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF: recomendação para seu uso. **STAB**, Piracicaba, v. 1, n. 3, p.18-23, janeiro/fevereiro, 1983.

STOLF, R.; REICHARDT, K.; VAZ, C. M. P. Response to "Comments on Simultaneous Measurement of Soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer-TDR Moisture Probe and A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance". **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 927-929, 2005.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. Simultaneous Measurement of soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer-TDR Moisture Probe. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 4-12, 2001.

WEAST, R. C. **Handbook of Chemistry and Physics**. 57th ed. Cleveland, Colorado: CRC, 1976.

Theoretical Considerations about Soil Mechanical Impedance Calculations by Dynamic Penetrometers

Abstract

The aim of this work was to describe equations to calculate the soil mechanical impedance by dynamic penetrometers. The calculations regard two different equipments, including theoretical correction for the gravity aceleration. To obtain precision values of soil mechanics impedance, in research experiments, gauging all mass and weigths of the equipament was necessary. However, the gravity aceleration correction as a function of latitude and altitude was not important.

Index terms: cone index, gravity aceleration, latitude, altitude.