

Ensaio de Proctor normal – análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo

Proctor compaction test – methodology analysis and worksheet to calculate the maximum soil density and optimum moisture content

Vilson Antonio Klein^{1*}, Tiago Madalosso¹, Matheus Baseggio¹

Recebido em 25/06/2010; aprovado em 27/03/2013.

RESUMO

A definição de limites críticos de densidade do solo para o desenvolvimento das plantas é muito complexa, uma vez que é dependente da textura e do teor de matéria orgânica. A densidade relativa, que é a relação entre a densidade do solo no campo e a densidade do solo máxima obtida pelo ensaio de Proctor normal, tem sido apresentada como um parâmetro capaz de padronizar e delimitar esses limites críticos. O objetivo deste trabalho é descrever os procedimentos que devem ser adotados para a realização de um ensaio de Proctor normal e disponibilizar uma planilha eletrônica Excel. A planilha auxilia no cálculo do teor de água que as amostras a serem compactadas devem atingir, além de calcular a densidade do solo máxima e o teor de água do solo ótimo para compactação a partir de equação de 2º grau obtida de forma analítica a partir de um conjunto de dados não balanceados.

PALAVRAS-CHAVE: compactação do solo, densidade relativa.

SUMMARY

The definition of critical limits of soil density for development of plants is very complex, since it is dependent on the texture and organic matter content. The relative compaction, that is the percentage ratio of the bulk density to the maximum dry density as determined by the

Proctor compaction test, has been presented as a parameter capable of standardizing and delimiting these critical limits. The aim of this study is to describe the procedures that have to be used for the implementation of a Proctor compaction test and make available an Excel worksheet that assists in the calculation of water content that the samples to be compacted must reach, besides calculating maximum dry density and optimum moisture content of soil from equation of degree 2 obtained by analytical form from an unbalanced data set.

KEY WORDS: soil compaction, relative density.

A compactação é uma das maiores causas da degradação de solos agrícolas, com consequências sobre o desenvolvimento das plantas e a preservação do ambiente. A compactação é um processo que ocorre devido a uma ação mecânica, por meio da qual há redução da porosidade, aumento da resistência ao cisalhamento e redução da compressibilidade e da permeabilidade (BUENO e VILAR, 1998). Determinar o grau de compactação identificando níveis críticos é necessário.

Em 1933, o engenheiro americano, Ralf Proctor publicou uma série de artigos, nos quais pela primeira vez se enuncia um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos: a compactação do solo é dependente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação (VARGAS, 1977).

¹ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAMV, Universidade de Passo Fundo - UPF, Caixa Postal 611, 99001-970, Passo Fundo, RS, Brasil. Email: vaklein@upf.br. *Autor para correspondência.

O processo da compactação pode ser explicado levando-se em conta a grande influência que a água intersticial exerce sobre as partículas dos solos. Na parte seca da curva de compactação, onde o solo possui baixa umidade, a água dos seus poros está retida por forças de absorção e pelo efeito capilar e a tensão da água tende a aglutinar o solo mediante a coesão (solo-solo), dificultando sua desagregação e o movimento das partículas para um novo rearranjo e redução da porosidade. À medida que aumenta o teor de água, esta lubrifica as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto. A partir de certo teor de água a compactação não consegue mais expulsar o ar dos poros, bem como, a presença de água livre, que absorve parte considerável da energia aplicada e dificulta a compactação (BUENO e VILAR, 1988; PINTO, 2002)

A densidade dos solos varia de 0,9 a 1,8 g cm⁻³, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica. Solos argilosos, apresentam grande quantidade de micro-agregados extremamente estáveis, o que não permite a acomodação das partículas. A porosidade interna desses micro-agregados é responsável pela menor densidade. A matéria orgânica apresenta densidade menor do que 1 g cm⁻³, o que reduz a densidade do solo (KLEIN, 2008).

Para obter um indicador da qualidade física de solos agrícolas, capaz de eliminar o efeito da textura e matéria orgânica na densidade do solo, Klein (2006) apresenta a densidade relativa. Para que esse parâmetro possa ser utilizado, é fundamental que se tenha uma densidade do solo referência, obtida a partir de um ensaio padrão. Pela facilidade e simplicidade na execução, além do baixo custo, o mesmo autor propõe que o ensaio de Proctor normal (560 kPa) seja utilizado para esta determinação. Este ensaio já é utilizado em âmbito mundial por vários autores (CARTER, 1990; ARAGÓN et al., 2000; FERRERAS et al.; 2001; BEUTLER et al., 2005; NHANTUMBO e CAMBULE, 2006).

O objetivo deste trabalho é descrever os procedimentos que devem ser adotados para a realização do ensaio de Proctor normal,

demonstrar a forma de obtenção dos parâmetros empíricos da equação polinomial de segundo grau e disponibilizar uma planilha eletrônica Excel que auxilia na definição do teor de água que as amostras a serem compactadas devem atingir, além de calcular a densidade do solo máxima e o teor de água do solo ótimo para compactação.

O ensaio de Proctor normal com 560 kPa, padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86), pode ser realizado com ou sem reuso de material. O primeiro necessita de menor volume de material (PINTO, 2002), no entanto, para casos em que os agregados são pouco estáveis, apresenta resultados pouco fiéis, uma vez que para o segundo ponto a amostra se mostra diferente da original. O ensaio sem reuso de material descrita em Nogueira (1998) é mais rápida e simples de ser realizada.

Uma vez obtidos os resultados de densidade em função do teor de água do solo a base de massa, os dados são ajustados minimizando a soma dos quadrados dos desvios, obtendo-se uma equação polinomial de 2º grau. Isto é obtido utilizando-se uma planilha eletrônica de cálculo como o Excel, fazendo-se um gráfico de dispersão e ajustando uma linha de tendência do tipo polinomial de 2ª ordem. Equivalendo a equação de 2º grau a zero e tirando a derivada primeira, obtém-se o teor de água do solo ótimo de compactação e, substituindo este na equação, a densidade do solo máxima.

A planilha eletrônica disponibilizada em <http://www.upf.br/lafas> calcula a densidade do solo e a umidade gravimétrica das amostras compactadas e, por meio de um modelo matemático, determina de forma analítica o teor de água do solo ótimo para compactação e a densidade do solo máxima. Para tal, utilizou-se o software Excel e ajustou-se o polinômio ortogonal de 2º grau de dados não balanceados (densidade do solo em função do teor de água). Por meio de equações matemáticas apresentadas por Mischan e Pinho (1996) obtém-se, após a inserção dos dados, a equação que melhor se ajusta e, com os coeficientes deste polinômio ortogonal, obtém-se o teor de água do solo ótimo para compactação e a densidade do solo máxima.

A seguir está apresentada a demonstração analítica para cálculo dos polinômios ortogonais de segunda ordem a partir de dados não balanceados de um conjunto de cinco pares de dados obtidos para um Latossolo Vermelho Distrófico húmico.

Primeiramente, devem-se obter os

U(kg kg ⁻¹)	Ds (kg.m ⁻³)	X _{1i}	n _i	x _{1i}	k _{1i} = n _i x _{1i}
0,189	1492	0,189	1	-0,039	-0,039
0,213	1545	0,213	1	-0,015	-0,015
0,234	1538	0,234	1	0,006	0,006
0,245	1512	0,245	1	0,017	0,017
0,260	1460	0,260	1	0,032	0,032
		Média	Total		
		0,228	5		

O k_{2i} é obtido através de diversos cálculos apresentados nas tabelas abaixo:

X ₂ =(U ²)	x _{2i}
0,0357	-0,0170
0,0454	-0,0073
0,0548	0,0021
0,0600	0,0073
0,0676	0,0149
Média	
0,053	

X _{1i} X _{1i}	X _{1i} X _{2i}
0,00154	0,00067
0,00023	0,00011
0,00003	0,00001
0,00028	0,00012
0,00101	0,00047
A ₁₁	A ₁₂
0,00309	0,00139

k _{1i}	k _{2i}
-0,0392	0,0006
-0,0152	-0,0005
0,0058	-0,0005
0,0168	-0,0002
0,0318	0,0007

coeficientes k_{1i} e k_{2i} através dos dados do experimento.

O coeficiente de ordem 1 (k_{1i}) é obtido multiplicando-se o número de repetições por tratamento (n_i) pela diferença entre cada nível de tratamento e a média destes (x_{1i}).

Primeiramente, calcula-se a diferença entre cada nível de tratamento e a média destes, resultando no x_{2i}.

Após, multiplica-se x_{1i} por x_{1i} e x_{1i} por x_{2i} e somam-se todos os resultados de cada coluna, obtendo-se A₁₁ e A₁₂.

Com estes dados, pode-se calcular o k_{2i} através da fórmula:

$$k_{2i} = \left(\frac{-A_{12}}{A_{11}} \right) k_{1i} + x_{2i}$$

Após calcular os três coeficientes (o k_{0i} é o próprio n_i), multiplica-se cada coeficiente pela média dos tratamentos (y_i) e, somando-

se o produto de cada coeficiente, obtêm-se os valores 7547; -1,2204 e -0,0773 para L_0 , L_1 e L_2 , respectivamente.

X_i ou U	y_i ou Ds	$n_i = k_{0i}$	k_{1i}	k_{2i}	$k_{0i} y_i$	$k_{1i} y_i$	$k_{2i} y_i$
0,189	1492	1	-0,0392	0,0006	1492	-58,4864	0,8655
0,213	1545	1	-0,0152	-0,0005	1545	-23,4840	-0,8016
0,234	1538	1	0,0058	-0,0005	1538	8,9204	-0,8234
0,245	1512	1	0,0168	-0,0002	1512	25,4016	-0,2903
0,260	1460	1	0,0318	0,0007	1460	46,4280	0,9726
					L_0	L_1	L_2
					7547	-1,2204	-0,0773

Então se calcula o quadrado de cada coeficiente os quais são divididos pelo número de repetições por tratamento. Após é feita a soma destes resultados para cada coeficiente

k_0^2/n_i	k_{1i}^2/n_i	k_2^2/n_i
1	1,54E-03	3,36E-07
1	2,31E-04	2,69E-07
1	3,36E-05	2,87E-07
1	2,82E-04	3,69E-08
1	1,01E-03	4,44E-07
Total		
5	3,09E-03	1,37E-06

(5; $3,09e^{-3}$; $1,37e^{-6}$). Tendo estes dados, divide-se o L_0 , L_1 e L_2 pela soma obtida anteriormente e obtêm-se os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 .

$\frac{7547}{5}$	$\frac{-1,2204}{3,09E-03}$	$\frac{-0,0773}{1,37E-06}$
a_0	a_1	a_2
1509,400	-394,339	-56290,395

Com os coeficientes “a” na equação 1 teríamos:

$$y_{ij} = \frac{1}{n_i} [a_0 k_{0i} + a_1 k_{1i} + a_2 k_{2i}] \quad [1]$$

A decodificação, isto é, a passagem da equação anterior para uma com y em função de x pode ser feita. Para isto, utilizam-se as equações 2, 3 e 4.

$$k_{0i} = n_i \quad [2]$$

$$k_{1i} = n_i x_{1i} \text{ sendo que } x_{1i} = X_i - \overline{X}_i \quad [3]$$

$$k_{2i} = (-A_{12}/A_{11}) n_i x_{1i} + n_i x_{2i}, \text{ sendo que } x_{2i} = X_i^2 - \overline{X}_i^2 \quad [4]$$

Utilizando-se os dados demonstrados anteriormente, obtêm-se a equação 5:

$$y = 1509 + [-394,34 \times (X_i - 0,23)] + \left\{ -56290,39 \times \left[(-A_{12}/A_{11}) \times (X_i - 0,23) + X_i^2 - 0,053 \right] \right\} [5]$$

em que, y é a densidade do solo máxima (DS-max) e x é a umidade gravimétrica (UG):

Simplificando, obtém-se a equação 6:

$$y = -56290X_i^2 + 24812X_i - 1186,5 = DS \max = -56290UG^2 + 24812UG - 1186,5 \quad [6]$$

Os valores de a, b e c são encontrados na figura 1. A partir desses parâmetros calculam-se o teor de água no solo ótimo para compactação e a densidade do solo máxima.

Para o cálculo do teor de água no solo ótimo para compactação faz-se a derivada primeira da equação de 2º grau, como demonstrado a seguir:

$$ax^2 + bx + c \quad 2ax + b = 0 \quad U_g \text{ ótima} = \frac{-b}{2a}$$

Já para obter a densidade do solo máxima, substitui-se o valor de U_g na equação:

$$y = a\left(\frac{-b}{2a}\right)^2 + b\left(\frac{-b}{2a}\right) + c \quad y = \frac{b^2}{4a} + \frac{-b^2}{2a} + c \quad D_{\max} = \frac{-b^2 + 4ac}{4a}$$

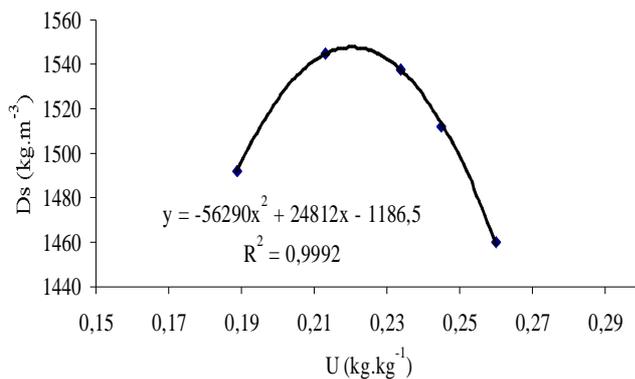


Figura 1 - Densidade do solo (DS) em função da umidade gravimétrica (U) obtida através do ensaio de Proctor normal para um Latossolo Vermelho distrófico húmico.

A planilha de cálculos apresenta a forma analítica de obtenção do teor de água do solo ótimo para compactação e da densidade do solo máxima, utilizando modelos matemáticos descritos por Mischan e Pinho (1996).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÓN, A. et al. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water

content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.56, p.197-204,2000.

BEUTLER, A.N. et al. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.843-849, 2005.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos, EESC-USP,1998. 131p.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine loamy sands. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.70, p.425-433, 1990.

FERRERAS, L.A. et al. Parâmetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.161-170, 2001.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.5, p.26-32, 2006.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: EDIUPF, 2008. 212p.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. **Experimentação Agrônômica: Dados Não-Balanceados**. Botucatu, SP: FUNDIBIO, 1996. p. 141-175.

NHANTUMBO, A B.J.C.; CAMBULE, A.H. Bulk density by proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.87, p.231-239, 2006.

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos. Ensaio de Laboratório**. São Carlos, EESC-USP,1998. 248p.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 2ª Ed. Oficina de textos. São Paulo. 2002, 355p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, USP, 1977. 509p.