



APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS MATEMÁTICOS PARA AJUSTE DA CURVA DE COMPACTAÇÃO EM TRÊS LATOSSOLOS

Edner Betioli Junior¹, Wagner Henrique Moreira¹, Marco Aurélio Teixeira Costa², Camila Jorge Bernabé Ferreira³, Cássio Antônio Tormena⁴

RESUMO: O ensaio de Proctor é uma técnica eficaz em avaliar a susceptibilidade dos solos à compactação. Esta consiste em relacionar, para uma mesma energia de compactação, valores de densidade (D_s) obtidos com seus respectivos valores de umidade do solo, obtendo-se a curva de compactação do solo, da qual calcula-se a umidade crítica para compactação (U_c) e a densidade máxima (D_{max}) correspondente. O objetivo deste trabalho foi comparar a aplicação dos modelos polinomial de segundo grau e exponencial na determinação da curva de compactação do solo, U_c e D_{max} de três Latossolos Vermelhos. O ensaio de Proctor foi realizado com amostras deformadas de três Latossolos Vermelhos do Estado do Paraná, sob diferentes sistemas de manejo, coletadas nas cidades de Maringá, Campo Mourão e Paranavaí. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em diferentes teores de água, com intervalos de cerca de 0,015 a 0,025 $kg\ kg^{-1}$ de umidade gravimétrica. Os resultados da D_s em função do teor de água foram ajustados pelos modelos polinomial de segundo grau e exponencial. A U_c e a D_{max} foram calculadas para os dois modelos. Os coeficientes do modelo polinomial de segundo grau foram testados pelo teste t de Student ($\alpha = 0,05$) e os coeficientes do modelo exponencial foram avaliados pelo intervalo de confiança da média. Os resultados mostraram que apenas o modelo polinomial pode ser empregado para descrever as curvas de compactação dos solos estudados, pois a análise estatística do modelo exponencial apresentou coeficientes não significativos.

PALAVRAS-CHAVE: Densidade máxima, ensaio de proctor, umidade crítica para compactação.

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais causas da compactação do solo é o trânsito de máquinas ou de animais em condições inadequadas de umidade do solo, o que resulta em perda da sua qualidade física e redução de produtividade das culturas.

O ensaio de Proctor é uma técnica eficaz em avaliar a susceptibilidade dos solos à compactação. Através do ensaio de Proctor, para uma mesma energia de compactação, é possível relacionar valores de densidade obtidos com seus respectivos valores de umidade do solo, de modo que a densidade aumenta com o incremento do teor de água até determinado valor e, depois, torna-se decrescente (Braidá et al., 2006). Com a relação de diferentes valores de densidade obtidos em função da umidade de compactação

¹ Mestrando do Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Avenida Colombo, 5790. CEP 87020-900 Maringá (PR). e-mail: betioli.jr@gmail.com; wh.moreira@hotmail.com

² Doutorando do programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. e-mail: marcoatcosta@hotmail.com

³ Acadêmica do curso de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. e-mail: kmilaphi@hotmail.com

⁴ Professor associado do Departamento de Agronomia, UEM. Bolsista do CNPq. e-mail: catormena@uem.br

obtém-se a curva de compactação do solo, a partir da qual é possível calcular a umidade crítica para compactação (U_c) bem como a densidade máxima (D_{max}) correspondente.

Na literatura são encontradas duas maneiras distintas de determinação da curva de compactação do solo. A primeira, utilizada por Dias Junior & Miranda (2000) e Marcolin & Klein (2011), é a mais difundida e trata-se do ajuste dos dados a um modelo polinomial de segundo grau. A U_c e a D_{max} são obtidas, neste caso, a partir da primeira e segunda derivada da equação, respectivamente. A segunda, utilizada por Braida et al. (2006) consiste no ajuste dos dados a um modelo exponencial, ou seja, um modelo não linear, cuja determinação dos coeficientes da equação requer cálculos computacionais específicos.

O objetivo deste trabalho foi comparar a aplicação dos modelos polinomial de segundo grau e exponencial na determinação da curva de compactação do solo, umidade crítica para compactação e da densidade máxima de três Latossolos Vermelhos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solo com estrutura alterada foram coletadas em Latossolos Vermelhos de três cidades do Estado do Paraná, para a determinação das respectivas curvas de compactação a partir do ensaio de Proctor.

O primeiro solo foi coletado em Maringá, numa área conduzida no sistema plantio direto há mais de 30 anos, com rotação de culturas envolvendo milho, aveia, soja, trigo e milho de segunda safra. A análise granulométrica revelou valores de 750 g kg^{-1} de argila, 50 g kg^{-1} de silte e 200 g kg^{-1} de areia. O segundo solo foi coletado em Campo Mourão, num experimento de integração lavoura pecuária pertencente à fazenda experimental da Cooperativa Coamo – Cooperativa Agroindustrial Mourãoense. A área é cultivada com soja no verão e com um consórcio de aveia preta + azevém no inverno. O resultado da análise granulométrica indicou valores de 870 g kg^{-1} de argila, 92 g kg^{-1} de silte e 38 g kg^{-1} de areia. O terceiro solo foi coletado em Paranavaí numa área pertencente ao IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná, cultivada com o consórcio de capim Coastcross + *Arachis pintoi*. A análise granulométrica indicou valores de 130 g kg^{-1} de argila, 10 g kg^{-1} de silte e 860 g kg^{-1} de areia.

O ensaio de Proctor foi realizado conforme Nogueira (1998). Os diferentes solos, coletados na profundidade de 0 – 0,15 m foram secos ao ar, peneirados em malha 4,76 mm e posteriormente compactados em três camadas num cilindro de 1.000 cm^3 , utilizando um soquete com massa de 2,5 kg, em 25 golpes por camada, numa altura de queda de 30 cm. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em diferentes teores de água, com intervalos de cerca de 0,015 a $0,025 \text{ kg kg}^{-1}$ de umidade gravimétrica.

Os resultados da curva de compactação, ou seja, densidade do solo em função do teor de água, foram ajustados pelos modelos polinomial de segundo grau (equação 1) e exponencial (equação 2):

$$D_s = aU^2 + bU + c \quad (1)$$

em que: D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); U = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); a , b e c = coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados;

$$D_s = D_{si} + d \exp\left[-a \exp\left(\frac{U_g - U_{gc}}{e}\right)^2\right] \quad (2)$$

em que: D_{si} = densidade inicial do solo (Mg m^{-3}); a = incremento máximo na densidade inicial do solo (Mg m^{-3}); b = coeficiente de ajuste (kg kg^{-1}); \exp = base do logaritmo

natural; U_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); U_{gc} = umidade crítica de compactação (kg kg^{-1}).

A umidade crítica para compactação (U_c) e a densidade máxima (D_{max}) são obtidas, no modelo polinomial de segundo grau, a partir da primeira e segunda derivada da equação, respectivamente. Já para o modelo exponencial, a U_c corresponde ao coeficiente U_{gc} e a D_{max} à soma dos coeficientes D_{si} e d .

Os coeficientes do modelo polinomial de segundo grau foram testados pelo teste t de Student ($\alpha = 0,05$). Já os coeficientes do modelo exponencial foram avaliados pelo intervalo de confiança da média (Payton, 2000) e foram considerados significativos quando o intervalo não incluiu o valor zero.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do teste F, apresentados na Tabela 1, indicam que ambos os modelos foram significativos para os três solos.

Tabela 1. Resultados do teste F dos modelos exponencial e polinomial para os diferentes solos.

Local	Modelo	F	Pr > F
Paranavaí	Exponencial	135,44	<,0001
	Polinomial	180,720	<,0001
Maringá	Exponencial	15,730	0,060
	Polinomial	34,190	0,009
Campo Mourão	Exponencial	294,210	0,043
	Polinomial	78,000	0,013

No entanto, para uma avaliação mais detalhada do modelo é necessário analisar os coeficientes estimados para a equação e sua significância. Assim a Tabela 2 mostra o resumo estatístico dos coeficientes ajustados para o modelo polinomial. Observa-se que todos os coeficientes ajustados nos três solos são significativos pelo teste t. Os valores de D_{max} e U_c obtidos por esse modelo foram respectivamente: $1,848 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,103 \text{ kg kg}^{-1}$ para o solo de Paranavaí; $1,512 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,296 \text{ kg kg}^{-1}$ para o solo de Maringá e $1,366 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,327 \text{ kg kg}^{-1}$ para o solo de Campo Mourão.

Tabela 2. Resumo estatístico dos coeficientes obtidos no modelo polinomial.

Local	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	t valor	Pr < t	R ²
Paranavaí	a	1,403	0,023	60,280	<,0001	0,984
	b	8,652	0,598	14,470	<,0001	
	c	-42,063	3,459	-12,160	<,0001	
Maringá	a	-2,315	0,463	-5,000	0,015	0,958
	b	25,866	3,221	8,030	0,004	
	c	-43,701	5,524	-7,910	0,004	
Campo Mourão	a	-1,564	0,237	-6,610	0,022	0,987
	b	17,899	1,449	12,350	0,007	
	c	-27,329	2,199	-12,430	0,006	

Em relação aos coeficientes do modelo exponencial, observa-se que o coeficiente d não foi significativo nos três solos (Tabela 3), pois o intervalo de confiança inclui o valor zero. Ainda, não foram significativos os coeficientes e para o solo de Campo Mourão e D_{si} e e para o solo de Maringá.

Uma estratégia para contornar a problemática do coeficiente não significativo seria a sua exclusão, implicando na alteração do modelo. Porém neste caso, a exclusão de d

impossibilita a obtenção da densidade máxima do solo ($D_{max} = D_{si} + d$). Deste modo, para os solos estudados, o modelo polinomial de segundo grau foi eficiente e significativo para descrever a U_c e a D_{max} . Contudo, caso ambos os modelos tivessem sido significativos, o modelo exponencial seria uma boa opção pela praticidade em que os resultados são fornecidos, uma vez que o uso de um software estatístico específico dispensa a necessidade dos cálculos utilizados na obtenção de U_c e D_{max} pelo modelo polinomial de segundo grau.

Os valores de D_{max} e U_c obtidos pelo modelo exponencial, muito semelhantes aos obtidos com o modelo polinomial, foram respectivamente: 1,853 Mg m⁻³ 0,103 kg kg⁻¹ para o solo de Paranaíba; 1,515 Mg m⁻³ e 0,296 kg kg⁻¹ para o solo de Maringá e 1,37 Mg m⁻³ e 0,328 kg kg⁻¹ para o solo de Campo Mourão.

Tabela 3. Resumo estatístico dos coeficientes obtidos no modelo exponencial.

Local	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	IC inf	IC sup
Paranaíba	<i>D_{si}</i>	1,335	0,310	0,537	2,133
	<i>d</i>	0,518	0,307	-0,272	1,308
	<i>U_{gc}</i>	0,103	0,002	0,099	0,107
	<i>e</i>	0,070	0,026	0,003	0,138
Maringá	<i>D_{si}</i>	0,949	1,840	-6,965	8,864
	<i>d</i>	0,566	1,829	-7,303	8,435
	<i>U_{gc}</i>	0,296	0,003	0,284	0,309
	<i>e</i>	0,074	0,141	-0,533	0,682
Campo Mourão	<i>D_{si}</i>	1,249	0,022	0,971	1,527
	<i>d</i>	0,121	0,021	-0,145	0,387
	<i>U_{gc}</i>	0,328	0,001	0,317	0,338
	<i>e</i>	0,036	0,006	-0,037	0,109

4 CONCLUSÃO

Para os solos estudados, apenas o modelo polinomial pode ser empregado para descrever as curvas de compactação dos solos estudados.

REFERÊNCIAS

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.

DIAS JUNIOR, M.S. & MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). **Ciênc. agrotec.** v. 24, p. 337-346, 2000.

MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Sci. Agron.** v. 33, p. 349-354, 2011.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos: ensaios de laboratório**. São Carlos: USP/EESC, 1998.

PAYTON, M.E.; MILLER, A.E. & RAUN, W.R. Testing Statistical Hypotesis using standard error bars and confidence intervals. **Comm. Soil Sci. Plant. Anal.**, v. 31, p. 547-551. 2000.