



Densidade referência do solo e grau de compactação como parâmetro indicador do crescimento das plantas

LUIS EDUARDO AKIYOSHI SANCHES SUZUKI⁽¹⁾, JOSÉ MIGUEL REICHERT⁽²⁾ & DALVAN JOSÉ REINERT⁽²⁾

RESUMO – O estudo da compactação dos solos pode ser facilitada pelo conhecimento do grau de compactação. Esse parâmetro considera a densidade atual do solo com uma densidade referência obtida em laboratório. Objetivou-se relacionar a densidade referência do solo obtida por diferentes métodos e verificar limites de grau de compactação para o crescimento de plantas sob plantio direto. Para cálculo do grau de compactação, a densidade do solo foi estimada por três estratégias: densidade quando o Intervalo Hídrico Ótimo é igual a zero (D_{sc} IHO); densidade restritiva ao crescimento radicular ou rendimento de culturas (D_{sc} Rest); equação existente na literatura (D_{sc} Jones). A densidade referência do solo ($D_{s_{ref}}$) foi estimada por seis metodologias diferentes: teste de Proctor normal; carga de 200 kPa no teste de compressão uniaxial com amostras de solo com estrutura não preservada, e cargas de 200, 400, 800 e 1600 kPa no teste de compressão uniaxial com amostras de solo com estrutura preservada. Os valores estimados de D_{sc} Rest são superiores aos valores da D_{sc} IHO. Os maiores valores estimados de $D_{s_{ref}}$ bem como os menores valores de grau de compactação foram obtidos pela carga de 1600 kPa. Conclui-se que a D_{sc} IHO não necessariamente restringe o crescimento radicular ou rendimento de culturas sob plantio direto; a carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial é promissora para determinar a $D_{s_{ref}}$ em solos sob plantio direto; o grau de compactação calculado com base no Proctor foi menos influenciado pelo teor de argila, contudo, a estrutura do solo não é considerada nessa metodologia.

Introdução

Para facilitar a comparação entre solos no estudo da compactação, tem-se relacionado a densidade atual do solo com uma densidade referência. Dentre as possibilidades de obtenção da densidade referência, tem-se utilizado a densidade máxima obtida no teste de Proctor normal [1,2] ou a densidade alcançada no teste de compressão uniaxial com uma carga de 200 kPa e amostras de solo com estrutura não preservada [3,4].

A comparação desses métodos bem como sua relação com o crescimento de plantas ainda tem sido pouco estudada. Além disso, o grau de compactação foi desenvolvido para caracterizar a compactação de solos freqüentemente revolvidos, não sendo testado ainda para solos não revolvidos (Håkansson & Lipiec [4]).

O objetivo desse estudo foi sintetizar dados publicados e não publicados relacionando a densidade referência do solo pelos diferentes métodos e verificar limites de grau de compactação para o crescimento de plantas sob plantio direto.

Palavras-Chave: plantio direto, densidade do solo, intervalo hídrico ótimo

Material e métodos

O grau de compactação (GC) relaciona a densidade do solo obtida no campo (D_s) com uma densidade obtida por um teste de compactação no laboratório ($D_{s_{ref}}$), como segue:

$$GC = \frac{D_s}{D_{s_{ref}}} \times 100$$

A densidade do solo foi estimada através de três estratégias: a) definiu-se a densidade crítica quando o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é igual a zero (D_{sc} IHO). Os dados utilizados são apresentados na Tabela 1; b) considerou-se como densidade crítica aquela que restringe o crescimento radicular ou reduz o rendimento de culturas, com dados obtidos no campo (D_{sc} Rest), conforme a Tabela 2; c) utilizou-se a equação desenvolvida por Jones [5] obtida sob condições controladas (D_{sc} Jones). O autor considerou como densidade crítica quando as raízes tiveram seu crescimento reduzido em 20% comparado com o crescimento máximo na capacidade de campo. Consideraram-se as densidades estimadas por essas três estratégias como sendo crítica para as plantas (D_{sc}).

Para estimar a $D_{s_{ref}}$ pelo teste de Proctor normal ($D_{s_{ref}}$ Proctor) foram utilizados dados da literatura nacional [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Dados de $D_{s_{ref}}$ pelo teste de compressão uniaxial com carga de 200 kPa e utilizando amostras de solo com estrutura não preservada ($D_{s_{ref}}$ 200 kPa def) foram obtidos da literatura internacional [3,12,13,14].

Amostras com estrutura preservada foram coletadas em seis solos do Rio Grande do Sul, classificados como Argissolo Vermelho distrófico arênico, Argissolo Vermelho distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico, Latossolo Vermelho distrófico típico, Latossolo Vermelho aluminoferrico típico e Latossolo Vermelho distroferrico típico (EMBRAPA [15]). A amostragem foi realizada com cilindros de 0,025 m de altura e 0,061 m de diâmetro, na camada de 0,08-0,13 m, sendo, geralmente, a camada com maior densidade e

resistência à penetração em solos sob plantio direto (Suzuki [16]). As amostras foram saturadas e equilibradas na tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial para obter a curva de compressão do solo, com aplicação de carga sequencial de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Considerou-se como $D_{s_{ref}}$ as densidades obtidas com a aplicação das cargas de 200 kPa ($D_{s_{ref}}$ 200 kPa indef), 400 kPa ($D_{s_{ref}}$ 400 kPa indef), 800 kPa ($D_{s_{ref}}$ 800 kPa indef) e 1600 kPa ($D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef). Em um teste prévio observou-se que a aplicação sequencial das cargas ou aplicando cargas individuais de 200, 400, 800 e 1600 kPa, em uma única amostra de solo, resultaram em densidades similares para essas cargas.

Resultados e discussão

A D_{s_c} diminuiu com aumento do teor de argila (Fig. 1). Os maiores valores de D_{s_c} foram estimados quando considerou-se restrições ao crescimento radicular ou rendimento (D_{s_c} Rest), e os menores valores foram estimados considerando o IHO (D_{s_c} IHO). A D_{s_c} estimada por Jones [5] (D_{s_c} Jones) para solos sob preparo convencional esteve entre a D_{s_c} Rest e D_{s_c} IHO (Tabela 3). O coeficiente angular é semelhante para as três equações e estas foram altamente significativas.

Os limites do IHO são definidos pelo conteúdo de água quando a aeração é menor que 10%, resistência à penetração superior a 2 MPa, umidade maior que a capacidade de campo (umidade no potencial matricial de 0,10 MPa), e umidade menor que o ponto de murcha permanente (umidade no potencial matricial de 1,5 MPa) (Silva *et al.* [2]). Esses limites parecem não ser apropriados para o plantio direto, pois as plantas não seriam capazes de crescer quando o IHO=0.

Restrições ao crescimento radicular não necessariamente refletem em redução do crescimento ou rendimento da cultura; além disso, a tolerância do sistema radicular das culturas à compactação é variável. Taylor & Brar [17] dizem que as raízes com reduzido comprimento podem continuar a fornecer água e nutrientes às plantas. As plantas respondem aos valores críticos de compactação antes que seu crescimento seja restringido (Silva *et al.* [18]). Silva *et al.* [19] demonstraram experimentalmente que os valores críticos de porosidade de aeração (10%) e resistência à penetração (2 MPa) não interrompem o crescimento da planta, a cultura continua crescendo mas a uma menor taxa.

A $D_{s_{ref}}$ decresceu com aumento do teor de argila (Fig. 2), com um elevado coeficiente de determinação (r^2) e equações significativas a 5% (Tabela 4).

Entre as diferentes estratégias para definir a $D_{s_{ref}}$, os maiores valores estimados foram alcançados pela carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial ($D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef), seguido pelo teste de Proctor normal ($D_{s_{ref}}$ Proctor) para solos com baixo teor de argila e pela carga de 800 kPa com amostras de solo com estrutura preservada ($D_{s_{ref}}$ 800 kPa indef) para

solos com maior teor de argila. Os menores valores estimados de $D_{s_{ref}}$ foram obtidos com a carga de 200 kPa utilizando amostras de solo com estrutura não preservada ($D_{s_{ref}}$ 200 kPa def).

Ao definir uma metodologia para obter a $D_{s_{ref}}$, o valor obtido não deve ser muito elevado, resultando em um grau de compactação menor do que o observado no campo, nem muito baixo, produzindo um elevado grau de compactação para a maioria das situações no campo. A Fig. 2 demonstra claramente que as diferentes estratégias para obter a $D_{s_{ref}}$ resultam em distintos valores para um dado teor de argila, tanto de $D_{s_{ref}}$ quanto de grau de compactação (Tabela 5).

Usando as equações para estimar a D_{s_c} Rest (Tabela 3) e a $D_{s_{ref}}$ pelas seis metodologias (Tabela 4), é possível calcular um grau de compactação crítico (GCC) para o crescimento das plantas, considerando restrições ao crescimento radicular e rendimento de culturas, para solos com variação no teor de argila, como segue:

$$GCC = \frac{D_{s_c} \text{ Rest}}{D_{s_{ref}}} \times 100$$

Embora trabalhos tenham demonstrado independência entre grau de compactação e teor de argila [3, 4], esse fato não foi observado nesse estudo (Tabela 5). De modo geral o grau de compactação obtido pelo teste de Proctor normal e pelas cargas de 200, 400 e 800 kPa apresentaram elevado grau de compactação, sendo esses valores muito elevados para indicar restrições ao crescimento das plantas. Portanto, seria necessário uma maior carga no teste de compressão uniaxial, como a de 1600 kPa, ou uma maior energia no teste de Proctor, mas para essa última mais estudos são necessários.

Quando a $D_{s_{ref}}$ foi obtida pelo teste de Proctor normal, observou-se uma menor variação do grau de compactação, atribuído ao coeficiente angular similar das equações para estimar a $D_{s_{ref}}$ Proctor e D_{s_c} Rest.

O valor de D_{s_c} é crítico ou restritivo para o crescimento e desenvolvimento das plantas, enquanto que a $D_{s_{ref}}$ não é considerada crítica para as plantas, mas sim um valor limite ou máximo que o solo pode alcançar. Contudo, um valor de grau de compactação crítico para as plantas e qualidade do solo pode ser definido a partir da $D_{s_{ref}}$.

Embora a D_{s_c} e a $D_{s_{ref}}$ são quantificados independentemente, esses dois valores devem estar relacionados. Se o solo alcança uma D_{s_c} , o grau de compactação correspondente necessariamente deveria ser crítico para a planta. A vantagem do grau de compactação é que diferentes solos podem ser comparados, enquanto que pela D_{s_c} a comparação entre solos pode levar a conclusões errôneas.

Embora o uso da $D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef seja uma alternativa promissora para o estudo do grau de compactação em solos sob plantio direto, houve uma grande variação do grau de compactação de acordo com a mudança no teor de argila, atribuído aos distintos coeficientes angulares nas equações para estimar a D_{s_c} Rest e $D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef. Observando a distribuição dos dados de $D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef em função do teor de argila na Fig. 2, há três pontos para o solo com menor teor de argila que contribuíram para o decréscimo do coeficiente

angular. Mais solos, principalmente de textura arenosa, deveriam ser testados para contrastar com essa equação predefinida.

Alternativamente ao uso da $D_{s,ref}$ 1600 kPa indef, poderiam ser consideradas as pressões causadas pelas máquinas. Contudo, as cargas aplicadas por máquinas agrícolas é em torno de 100 e 200 kPa [20,21], e superior a 600 kPa para carretas de grãos (Carpenedo [20]). Em colheita florestal, Horn *et al.* [22] mediram valores aplicados pelas colheitadeiras entre 400 a 600 kPa. Considerando que valores de 600 kPa ou até mesmo superiores podem ser aplicados no campo e que essas pressões forneceriam valores muito elevados de grau de compactação, confirma-se a $D_{s,ref}$ 1600 kPa indef como promissora.

Conclusões

A $D_{s,c}$ IHO não necessariamente restringe o crescimento radicular ou rendimento de culturas sob plantio direto, pois valores mais elevados de densidade do solo indicaram restrições às culturas ($D_{s,c}$ Rest). A $D_{s,c}$ IHO pode ser um alerta de que as condições físicas do solo não são ideais e a densidade restritiva às culturas ($D_{s,c}$ Rest) está próxima de ser alcançada.

A carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial utilizando amostra de solo com estrutura preservada é promissora para determinar a $D_{s,ref}$ em solos sob plantio direto.

O grau de compactação calculado com base na $D_{s,ref}$ Proctor foi menos influenciado pelo teor de argila, contudo, nessa metodologia a estrutura do solo não é considerada e esse teste fornece um GCc elevado.

Referências

- [1] CARTER, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70:425-433.
- [2] SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781.
- [3] HÅKANSSON, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, 16:105-120.
- [4] HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53:71-85.
- [5] JONES, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal*, 47:1208-1211.
- [6] SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. & SOUZA, C.R. 1998. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. *Scientia Florestalis*, 54:9-16.
- [7] KLEIN, V.A. 1998. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, USP, Piracicaba. 150p.
- [8] FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. 2000. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:487-493.
- [9] BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. 2005. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:843-849.
- [10] MARCOLIN, C.D. 2006. *Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolos argilosos sob plantio direto*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UPF, Passo Fundo. 110p.
- [11] MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; WILLIS, J.A. & ROSA, D.P. 2006. Compactação de diferentes solos pelo ensaio de Proctor. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16, Aracaju, 2006, *Resumos...* Aracaju: SBCS, 2006. (CD-ROM)
- [12] LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S. & KOSSOWSKI, J. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Research*, 19:307-317.
- [13] COMIA, R.A.; STENBERG, M.; NELSON, P.; RYDBERG, T. & HÅKANSSON, I. 1994. Soil and crop responses to different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 29:335-355.
- [14] ETANA, A.; HÅKANSSON, I.; ZAGAL, E. & BUCAS, S. 1999. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil & Tillage Research*, 52:129-139.
- [15] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1999. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, EMBRAPA – Embrapa Produção de Informação. 412p.
- [16] SUZUKI, L.E.A.S. 2005. *Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFSM, Santa Maria. 149p.
- [17] TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research*, 19:111-119.
- [18] SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. 2000. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:191-199.
- [19] SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, B. 2004. Plant response to mechanical resistance and air filled-porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Scientia Agricola*, 61:451-456.
- [20] CARPENEDO, V. 1994. *Compressibilidade de solos em sistemas de manejo*. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre. 106 p.
- [21] SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. 2000. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:239-249.
- [22] HORN, R. 2004. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68:1131-1137.

Tabela 1. Densidade crítica considerando o Intervalo Hídrico Ótimo (D_{sc} IHO) para diferentes culturas e solos.

Fonte	Cultura	Textura			D_{sc} IHO Mg m ⁻³
		Areia (2-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm) g kg ⁻¹	Argila (<0,0002 mm)	
Tormena et al. (1998)	Milho	50	150	800	1,28
Tormena et al. (1999)	Milho	50	150	800	1,27
Imhoff et al. (2001)	Cana-de-açúcar	730	80	190	1,70
Silva (2003)	Sem cultura	660	220	120	1,80
		250	250	500	1,43
		100	300	600	1,40
Beutler et al. (2004)	Arroz	687	42	271	1,63
Leão et al. (2004)	Pastagem	535	66	399	1,43
Collares (2005)	Feijão preto	622	295	83	1,75
Marcolin (2006)	Sem cultura	537	136	327	1,63
		363	168	469	1,43
		295	135	570	1,44
		48	294	658	1,27
		12	231	757	1,16

Tabela 2. Densidade do solo considerando restrições ao crescimento radicular e/ou redução do rendimento (D_{sc} Rest) para diferentes culturas e solos.

Fonte	Cultura	Textura			D_{sc} Rest Mg m ⁻³	Restrição
		Areia (2-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm) g kg ⁻¹	Argila (<0,0002 mm)		
De Maria et al. (1999)	Soja	50	200	750	1,21	1
Streck (2003)	Feijão preto	614	297	89	1,79	1/2
	Soja				1,81	
Secco (2003)	Trigo/Soja/ Milho	221	224	555	1,62	2 (trigo)
		100	290	610	1,54	2 (milho e trigo)
Beutler et al. (2004)	Arroz	687	42	271	1,63	1/2
Beutler & Centurion (2004)	Soja	687	42	271	1,68	1
		217	176	607	1,49-1,53	1/2
Collares (2005)	Feijão preto	614	297	89	1,76	1
					1,84	1/2
Suzuki (2005)	Soja	391	331	278	1,66	
		143	457	400	1,52	1
		114	341	546	1,39	
		86	261	654	1,36	1/2

1 = crescimento radicular; 2 = rendimento.

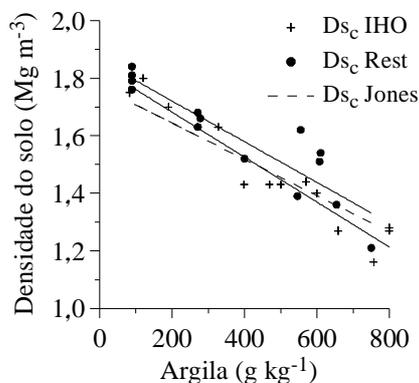


Figura 1. Densidade do solo considerando o Intervalo Hídrico Ótimo (D_{sc} IHO), restrição ao crescimento radicular e/ou redução do rendimento (D_{sc} Rest) e considerando a equação de Jones[5] (D_{sc} Jones), em função do teor de argila.

Tabela 3. Equações, coeficiente de determinação (r^2) e probabilidade para a relação entre argila e densidade do solo considerando o Intervalo Hídrico Ótimo (D_{sc} IHO), restrição ao crescimento radicular e/ou redução do rendimento (D_{sc} Rest) e a equação de Jones[5] (D_{sc} Jones).

Método	Equação	r^2	Probabilidade
D_{sc} IHO	$D_{sc} = -0,00078 \text{ argila} + 1,83803$	0,92	<0,0001
D_{sc} Rest	$D_{sc} = -0,00071 \text{ argila} + 1,86180$	0,84	<0,0001
D_{sc} Jones	$D_{sc} = -0,00063 \text{ argila} + 1,77000$	0,82	

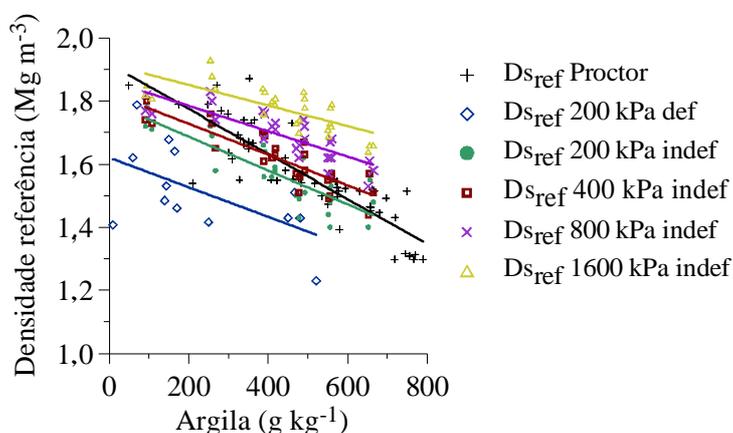


Figura 2. Densidade referência do solo obtida pelo teste de Proctor ($D_{s_{ref}}$ Proctor), carga de 200 kPa em amostras de solo com estrutura não preservada no teste de compressão uniaxial ($D_{s_{ref}}$ 200 kPa def) e carga de 200 kPa ($D_{s_{ref}}$ 200 kPa indef), 400 kPa ($D_{s_{ref}}$ 400 kPa indef), 800 kPa ($D_{s_{ref}}$ 800 kPa indef) e 1600 kPa ($D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef) em amostras de solo com estrutura preservada no teste de compressão uniaxial, em função do teor de argila.

Tabela 4. Equações, coeficiente de correlação (r^2) e probabilidade para a relação entre argila e densidade referência ($D_{s_{ref}}$) obtida pelos seis métodos.

Método	Equação	r^2	Probabilidade
$D_{s_{ref}}$ Proctor	$D_{s_{ref}} = -0,00071 \text{ argila} + 1,91804$	0,75	<0,0001
$D_{s_{ref}}$ 200 kPa def	$D_{s_{ref}} = -0,00047 \text{ argila} + 1,62254$	0,34	<0,0351
$D_{s_{ref}}$ 200 kPa indef	$D_{s_{ref}} = -0,00054 \text{ argila} + 1,79462$	0,72	<0,0001
$D_{s_{ref}}$ 400 kPa indef	$D_{s_{ref}} = -0,00049 \text{ argila} + 1,82586$	0,76	<0,0001
$D_{s_{ref}}$ 800 kPa indef	$D_{s_{ref}} = -0,00040 \text{ argila} + 1,86557$	0,69	<0,0001
$D_{s_{ref}}$ 1600 kPa indef	$D_{s_{ref}} = -0,00033 \text{ argila} + 1,91655$	0,56	<0,0001

Tabela 5. Grau de compactação crítico (GCc) calculado pela densidade do solo considerando restrição ao crescimento radicular e/ou redução do rendimento (D_{sc} Rest) e densidade referência ($D_{s_{ref}}$) pelos seis métodos, para alguns teores de argila.

Argila*	Amostra de solo deformada		Amostra de solo indeformada			
	Proctor	200 kPa	Teste de compressão uniaxial			
			200 kPa	400 kPa	800 kPa	1600 kPa
g kg ⁻¹	GCc (%)					
89	97	114	103	101	98	95
800	96	104	95	90	84	78

* Menor e maior conteúdo de argila das Tabelas 1 e 2.