

Relação entre propriedades físicas e elasticidade do solo obtida em compressibilidade cíclica.

Alan Ébano de Oliveira⁽¹⁾; José Miguel Reichert⁽²⁾; Deonir Secco⁽³⁾; Patricia Pértile⁽⁴⁾; Paulo Ivonir Gubiani⁽²⁾.

⁽¹⁾ Estudante de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria (PPGCS – UFSM); Santa Maria, RS; alanebano.oliveir@hotmail.com

⁽²⁾ Professor; PPGCS - UFSM; Santa Maria; Rio Grande do Sul; reichert@ufsm.br; paulogubiani@gmail.com

⁽³⁾ Professor; Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste); Cascavel; Paraná; deonir.secco@unioeste.br

⁽⁴⁾ Estudante de Doutorado; PPGCS - UFSM; Santa Maria; Rio Grande do Sul; patricia_pertile@hotmail.com

RESUMO: A manutenção da estrutura do solo é fundamental no manejo sustentável de sistemas de produção agrícola. Nesse sentido, a elasticidade do solo representa a capacidade que a estrutura tem de readquirir um estado mais próximo possível do original após cessada a compressão do solo. Assim objetivou-se relacionar propriedades físicas com parâmetros de elasticidade do solo. Foram realizados ensaios de compressibilidade cíclica em amostras, com estrutura preservada das camadas de 0 - 0,03 e 0,2 - 0,23 m de um Argissolo e de um Latossolo. Os ensaios consistiram de seis cargas sucessivas e crescentes, aplicadas por 36 s, intercaladas por períodos de descarga de 5 min. Com a deformação das amostras foram calculadas as variáveis recuperação da deformação (Rec), redução na densidade (ReDs) e índice de relaxação (Ir). Além disso, foram determinadas a densidade do solo (Ds), a porosidade total (Pt), a macro (Mac) e a microporosidade (Mic). Foi realizada análise de correlação simples entre os parâmetros de elasticidade e as variáveis Ds, Pt, Mac e Mic. As amostras de solo menos denso e mais poroso apresentaram maior capacidade de recuperarem-se das deformações sofridas na compactação. A correlação entre Ir e propriedades físicas variou de acordo com a pressão de carga e a propriedade avaliada.

Termos de indexação: recuperação da deformação, redução na densidade, índice de relaxação.

INTRODUÇÃO

A estrutura do solo influi fortemente nos fluxos de ar e água do solo, suprimindo com água e nutrientes o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a produção agrícola (HARTGE & STEWART, 1995). Segundo Klein (2008), as alterações no arranjo estrutural afetam importantes propriedades físico-hídricas, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência à penetração.

Entre os sistemas de manejo do solo agrícola, o plantio direto contribui na manutenção da estrutura do solo, ao eliminar o preparo periódico necessário em sistemas convencionais (DERPSCH et al., 2010). Porém, a ausência de revolvimento pode ocasionar, em longo prazo, o surgimento de camadas compactadas, devido à pressão exercida pelos rodados de máquinas agrícolas, especialmente quando a umidade do solo facilita a compactação (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994).

Apesar disso, a manutenção de cobertura vegetal no solo sob plantio direto propicia o aumento dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994). Devido as suas propriedades intrínsecas, a MOS aumenta a resistência do solo à compactação por aumentar a coesão entre as partículas (SOANE, 1990). Além disso, a MOS incrementa a elasticidade do solo, ou seja, permite que o solo, após a aplicação de uma carga, recupere parcialmente sua estrutura original (SOANE, 1990).

A elasticidade do solo pode ser expressa pelo índice de relaxação (Ir), que relaciona a densidade da amostra sob determinada pressão com a densidade da mesma amostra após cessada essa pressão (SOANE, 1990). Realizando ensaios de compressibilidade em consolidômetro, Braida et al. (2008) obtiveram maior elasticidade em amostras de Nitossolo e Argissolo com maiores teores de MOS. Segundo estes autores, isso se deve ao maior teor de água retido nesses solos, que foi responsável por um “aprisionamento” de bolhas de ar, provocando a expansão do volume de solo quando cessada a compressão (PERDOK et al., 2002).

Entretanto, o ensaio de compressibilidade estática não permite representar o processo de compactação do solo como ele ocorre no campo, onde as cargas tendem a ser aplicadas por menos de um segundo (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994). Além disso, as cargas aplicadas ao longo de um ciclo de produção não são as mesmas, variando de 100 a mais de 300 kPa de acordo com o tipo de máquina ou implemento (HAKANSSON et al., 1988).

Equipamentos com controle automatizado de parâmetros para ensaios de compressibilidade e armazenamento automático de dados permitem fazer análises mais realistas da elasticidade do solo. Brandt (2009) realizou ensaios de compressibilidade cíclica em amostras de um Latossolo e dois Argissolos usando uma prensa com armazenamento automático de dados e ensaios com dez ciclos de 30 s de carga e 30 s de descarga totalizando 5 min de carregamento. Assim, esse autor observou a ocorrência de deformações plásticas, com compactação do solo e posterior expansão de seu volume.

O objetivo deste trabalho foi relacionar a densidade e a porosidade com a elasticidade do solo de um Argissolo e de um Latossolo, obtida em ensaios de compressibilidade cíclica sob cargas crescentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados um Argissolo Vermelho-Amarelo sob uso agrícola em sistema de cultivo mínimo e um Latossolo Vermelho sob pastagem cultivada. As amostras com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0 - 0,03 e 0,2 - 0,23 m, em cilindros de 0,03 m de altura e 0,1 m de diâmetro.

Em amostras com estrutura alterada, foram determinadas a granulometria (EMBRAPA, 2011), densidade de partículas (Dp) (GUBIANI et al., 2006) e carbono orgânico (CO) em autoanalisador CHNS, sendo convertido em MOS pela multiplicação com o fator 1,724. A caracterização dos solos quanto a composição granulométrica, Dp e MOS é mostrada na **Figura 1** e na **Tabela 1**.

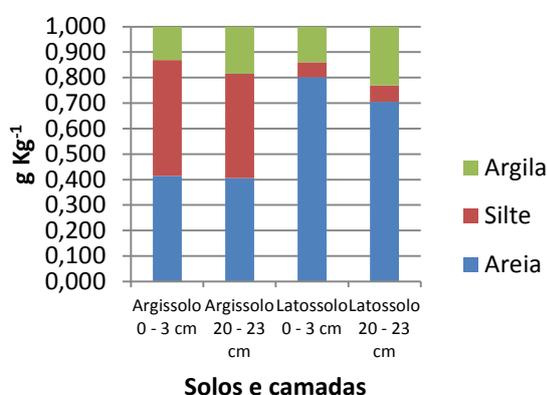


Figura 1. Composição granulométrica média dos solos avaliados.

As amostras com estrutura preservada foram

submetidas à saturação com água por capilaridade por aproximadamente 24 h. Após isso, foram pesadas e drenadas nas tensões de 6 kPa, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e de 10 kPa em câmara de Richards.

Tabela 1. Teor de matéria orgânica (MOS) e densidade de partículas (Dp) dos solos e camadas avaliadas.

Camadas (m)	Argissolo		Latossolo	
	0 - 0,03	0,2 - 0,23	0 - 0,03	0,2 - 0,23
MOS (%)	5,84	1,67	1,86	1,17
Dp (Mg m ⁻³)	2,38	2,56	2,53	2,58

Depois de equilibradas na tensão de 10 kPa, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressibilidade cíclica em uma prensa modelo "Multistep – Soil Shear Strength", fabricada na Alemanha por Dr.-Ing. Georg Wazau Mess - und Pruefsysteme GmbH (DR.-ING.GEORG WAZAU, 2009). Os ensaios compreenderam ciclos sucessivos de carga e descarga, sendo aplicadas as cargas de 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Cada ciclo consistiu da aplicação da carga por 36 s, seguido de descarga até 10 kPa (mínimo permitido pelo equipamento) por 5 min. Os dados de pressão e deformação obtidos durante os ensaios foram gerados e armazenados automaticamente através de um software específico.

Com base nos dados de deformação, foram determinados os parâmetros de elasticidade do solo em cada ciclo de carga e descarga. Entre os parâmetros medidos, a recuperação da deformação (Rec) consistiu da diferença entre a mínima deformação, medida na descarga, e a máxima deformação da carga anterior, em valores absolutos; a redução na densidade (ReDs) foi obtida pela relação entre a variação da densidade, da carga a descarga, e a densidade do solo inicial (Ds), em %; e o índice de relaxação (Ir) foi calculado com base na seguinte equação (BRAIDA, 2004):

$$I_r = 100(\Delta e_d / \Delta e_c)$$

onde Ir é o índice de relaxação (%), Δe_d a variação do índice de vazios durante o descarregamento e Δe_c a variação do índice de vazios durante o carregamento.

Também foram determinadas a densidade do solo (Ds), a porosidade total (Pt), a macroporosidade (Mac) e a microporosidade (Mic), após secagem das amostras em estufa a 105°C, por ± 24 h.

Os dados foram submetidos à análise de correlação simples usando o programa estatístico Assisat (SILVA; AZEVEDO, 2009). A correlação

entre propriedades físicas (Ds, Pt, Mac e Mic) e parâmetros de elasticidade do solo (Rec, ReDs, Ir) foi realizada para cada ciclo de carga e descarga aplicado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo (Ds) foi maior nas camadas de 0,2 a 0,23 m de ambos os solos (**Tabela 2**) e a porosidade total (Pt), a macro (Mac) e a microporosidade (Mic) foram maiores na camada superficial dos dois solos, o que está de acordo com a relação inversa entre Ds e porosidade.

Tabela 2. Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac) e microporosidade (Mic) nas camadas avaliadas do Argissolo e do Latossolo.

Camadas (m)	Argissolo		Latossolo	
	0 - 0,03	0,2 - 0,23	0 - 0,03	0,2 - 0,23
Ds (Mg m ⁻³)	1,21	1,54	1,32	1,45
Pt (m ³ m ⁻³)	0,49	0,40	0,48	0,44
Mac (m ³ m ⁻³)	0,13	0,09	0,20	0,12
Mic (m ³ m ⁻³)	0,40	0,27	0,25	0,25

Houve correlação significativa entre a recuperação da deformação (Rec) e as variáveis Ds, Pt e Mic (**Tabela 3**). A Rec teve alta correlação positiva com a microporosidade, possivelmente devido ao teor de água retida nas amostras na tensão de 10 kPa estar próximo ao limite superior da faixa de tamanho de microporos (6 kPa). Isso indica um efeito de “aprisionamento” de bolhas de ar, responsáveis pela expansão do volume de solo, como observado por Braida et al. (2008).

Tabela 3. Coeficientes de correlação linear simples entre atributos físicos (Ds, Pt, Mac e Mic) e a recuperação da deformação (Rec), para cada ciclo de carga/descarga aplicado.

Carga (kPa)	Ds	Pt	Mac	Mic
25	-0,7257**	0,5993*	ns	0,8351**
50	-0,7931**	0,6642**	ns	0,935**
100	-0,8209**	0,6972**	ns	0,9413**
200	-0,8276**	0,7003**	ns	0,9539**
400	-0,7884**	0,6487**	ns	0,9699**
800	-0,7624**	0,6214**	ns	0,973**

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$);

ns: não significativo ($p \geq 0.05$).

A Rec teve correlação negativa com a Ds (**Tabela 3**). Nesse sentido, Braida et al. (2008) observaram maior recuperação percentual do volume em solos mais densos, porém isto se deveu a menor deformação sofrida por estes solos.

Em relação às pressões, os menores coeficientes de correlação entre Rec e Ds/Pt foram observados na carga de 25 kPa. Nas cargas de 100

e 200 kPa ocorreram as correlações mais altas da Rec com Ds e Pt. Para a Mic, os coeficientes de correlação aumentaram com o aumento das cargas. Mentges et al. (2013), analisando amostras de um Gleissolo Háplico, obtiveram relação diretamente proporcional entre parâmetros de elasticidade e a porosidade do solo. McBride; Watson (1990) relacionaram as curvas de carregamento estático e de recuperação de 33 solos diferentes e observaram correlação significativa destas com os teores de argila, MOS e água, e com a densidade inicial do solo.

A correlação da redução na densidade (ReDs) com as propriedades físicas do solo teve valores similares às correlações da Rec (**Tabela 4**). Isso pode ser atribuído ao fato da ReDs ser obtida a partir das densidades calculadas com as deformações relacionadas na Rec, conforme indicado pelo coeficiente de correlação simples entre esses dois parâmetros (0,9935). Apenas os coeficientes foram maiores que os da Rec, o que se deve a forma de cálculo dessa variável, que é uma diferença em valor absoluto, enquanto que a ReDs é uma diferença relativa. Dessa forma, a Rec quantifica melhor a elasticidade de solos com variações em suas propriedades físicas.

Tabela 4. Coeficientes de correlação linear simples entre atributos físicos (Ds, Pt, Mac e Mic) e a redução na densidade (ReDs), para cada ciclo de carga/descarga aplicado.

Carga (kPa)	Ds	Pt	Mac	Mic
25	-0,7492**	0,6249**	ns	0,8511**
50	-0,8056**	0,6795**	ns	0,9353**
100	-0,8351**	0,7141**	ns	0,9396**
200	-0,8489**	0,7267**	ns	0,9473**
400	-0,8262**	0,6944**	ns	0,962**
800	-0,8132**	0,6808**	ns	0,9672**

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$);

ns: não significativo ($p \geq 0.05$).

Houve correlação significativa entre índice de relaxação (Ir) e Ds apenas nas pressões de 400 e 800 kPa, assim como a Pt que só apresentou correlação significativa em 800 kPa (**Tabela 5**). Quanto à correlação do Ir com a Mac, essa foi significativa para as cargas de 50 e 100 kPa, ao contrário das correlações da Mac com Rec e ReDs, as quais foram não significativas.

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear simples entre atributos físicos (Ds, Pt, Mac e Mic) e o índice de relaxação (Ir), para cada ciclo de carga/descarga aplicado.

Carga (kPa)	Ds	Pt	Mac	Mic
25	ns	ns	ns	ns
50	ns	ns	-0,6908**	ns
100	ns	ns	-0,6528**	0,5845*



200	ns	ns	ns	0,8796**
400	-0,5565*	ns	ns	0,9002**
800	-0,6683**	0,5332*	ns	0,8599**

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$);

ns: não significativo ($p \geq 0.05$).

As correlações do Ir com a Mic foram significativas para as cargas de 100, 200, 400 e 800 kPa, sendo maiores os coeficientes com o aumento das cargas (**Tabela 5**). Segundo Reichert et al. (2010), no processo de compressão do solo os poros maiores, responsáveis pela aeração, são comprimidos primeiro, sendo os poros menores afetados posteriormente com o aumento da carga. Assim, em cargas menores (50 e 100 kPa) o Ir será afetado mais significativamente pela Mac, enquanto que nas cargas maiores (100, 200, 400 e 800 kPa), o Ir está mais relacionado ao volume de microporos do solo.

CONCLUSÕES

A densidade do solo, a porosidade total e a microporosidade afetam a elasticidade do solo, definindo a capacidade de expansão do volume do solo após esse ser submetido a uma carga.

Os parâmetros recuperação da deformação e redução na densidade dependem das propriedades físicas do solo mais do que o índice de relaxação, o qual se relaciona apenas com atributos de porosidade do solo.

REFERÊNCIAS

BRAIDA, J. A. Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob Plantio Direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 126 p. (Tese de Doutorado)

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 32: 477-485, 2008.

BRANDT, A. A. Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 162 p. (Tese de Doutorado)

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Internacional Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3: 1-25, 2010.

DR.-ING.GEORG WAZAU Mess- und Pruefsysteme GmbH. Manual Soil Shear Strength Compression-Test Device. Berlin, 2009. 11 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011. 230 p.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, 11: 239-282, 1988.

HARTGE, K. H.; STEWART, B. A. ed. Soil Structure: Its Development and Function. 1. ed., Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995. 424 p.

KLEIN, V. A. Física do solo. 1. ed. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2008. 212 p.

McBRIDE, R. A.; WATSON, G. C. An investigation of the re-expansion of unsaturated, structured soils during cyclic static loading. *Soil and Tillage Research*, 17: 241-253, 1990.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37: 221-231, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/rbcs/v37n1/v37n1a23.pdf>. Acesso em 19 abr. 2013.

PERDOK, U.D.; KROESBERGEN, B. & HOOGMOED, W.B. Possibilities for modeling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. *Soil and Tillage Research*, 65: 61-75, 2002.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S. et al. Mecânica do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de, ed. Física do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, p. 29-102.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. *Ciência Rural*, Santa Maria, 36: 1931-1935, 2006.

SILVA, F. A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, 16: 179-201, 1990.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. ed. Soil Compaction in Crop Production. 1. ed., Amsterdam: Elsevier, 1994. 662 p.