



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Tormena, Cássio Antonio; Fidalski, Jonez; Rossi Junior, Waldemar
RESISTÊNCIA TÊNSIL E FRIABILIDADE DE UM LATOSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE
USO

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 32, núm. 1, 2008, pp. 33-42

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214230004>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

RESISTÊNCIA TÊNSIL E FRIABILIDADE DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO⁽¹⁾

Cássio Antonio Tormena⁽²⁾, Jonez Fidalski⁽³⁾ & Waldemar Rossi Junior⁽⁴⁾

RESUMO

Diferentes propriedades físicas têm sido utilizadas para avaliar a qualidade física do solo. Nesse contexto, a resistência tênsil e a friabilidade são indicadores da qualidade estrutural e física de um solo. O objetivo deste estudo foi quantificar a resistência tênsil e a friabilidade de um Latossolo Vermelho distrófico em diferentes sistemas de uso: floresta nativa, pousio e cultivado. A amostragem de solo foi realizada em 2006, na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá, Estado do Paraná, em três áreas contíguas sob mata nativa, pousio e cultivo de culturas anuais. A amostragem de solo consistiu da coleta de 10 blocos de solo (15 x 20 x 10 cm) na profundidade de 0-15 cm. Em cada sistema de uso do solo, determinou-se a resistência tênsil de 400 agregados com diâmetro entre 12,5 e 19,0 mm. Também foram feitas determinações do teor de carbono orgânico do solo (CO) e da densidade deste. A friabilidade foi estimada pelo coeficiente de variação da resistência tênsil. Para o solo estudado, tendo a mesma classe taxonômica e textural, mas sob diferentes sistemas de uso, a resistência tênsil de agregados aumentou proporcionalmente com a redução dos teores de CO. O solo foi classificado como friável independentemente do sistema de uso, e a friabilidade foi maior no solo sob mata, comparado com pousio e cultivado. A resistência tênsil de agregados, a friabilidade, o teor de CO e a densidade do solo caracterizaram a redução da qualidade do solo proporcionalmente à intensidade da sua utilização. A resistência tênsil dos agregados e a friabilidade do solo retrataram os efeitos dos sistemas de uso nas condições físicas e estruturais do solo.

Termos de indexação: carbono orgânico, densidade do solo, manejo do solo, qualidade do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em janeiro de 2007 e aprovado em setembro de 2007.

⁽²⁾ Professor Associado do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

⁽³⁾ Pesquisador do Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR. Área de Solos. Caixa Postal 564, CEP 87701-970 Paranavaí (PR). E-mail: fidalski@iapar.br

SUMMARY: TENSILE STRENGTH AND FRIABILITY OF AN OXISOL UNDER DIFFERENT LAND USE SYSTEMS

Different physical properties are used to evaluate the soil physical quality. In this context, soil tensile strength and friability are indicators of the soil physical and structural quality. The objective of this study was to quantify the tensile strength and friability of an Oxisol under different soil use systems: forest, fallow and cultivated. Soil samples were collected from three contiguous areas of an Experimental Farm of the State University of Maringá. Two areas were cultivated: one with annual crops under conventional tillage (disk plow and harrowing) and another under fallow with forage grass. Soil without cultivation under native forest (semideciduous seasonal forest) was used as reference. In 2006, ten blocks (undisturbed soil samples) were collected in each treatment at 0–0.15 m depth. In each treatment, the tensile strength of 400 aggregates with 12.5–19.0 mm diameter was measured, as well as soil organic carbon and bulk density. Soil friability was estimated by the variation coefficient of tensile strength. In this soil, tensile strength increased proportionally with the decrease in soil organic carbon. Soil friability was classified as independent of the soil use system. Soil friability was higher under forest than in fallow and cultivated soils. The tensile strength, friability, soil organic carbon and soil bulk density expressed the decrease of soil quality associated with more intensive soil use systems. Tensile strength and soil friability demonstrated the effects of soil use systems in the soil physical and structural properties.

Index terms: soil bulk density, soil management, soil organic carbon, soil quality.

INTRODUÇÃO

As avaliações da qualidade física e estrutural dos solos em diferentes sistemas de uso e manejo geralmente são realizadas por meio do estudo de propriedades ligadas à forma e estabilidade estrutural do solo, como a densidade e a porosidade do solo (Albuquerque et al., 1995; Stone & Silveira, 2001; Bertol et al., 2004), a resistência do solo à penetração (Hill, 1990; Tormena et al., 1998) e a distribuição dos agregados em tamanhos ou sua estabilidade em água (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Castro Filho et al., 1998). Em adição a essas propriedades, a resistência tênsil de agregados do solo também pode ser utilizada como indicador dos efeitos do manejo na qualidade do solo, devido à resposta do solo aos processos físicos e mecânicos ligados a manipulação dos solos, como o preparo, a formação de crostas superficiais, a emergência de plântulas e a penetração radicular.

Vários fatores influenciam a resistência tênsil, como ciclos de umedecimento e secamento (Utomo & Dexter, 1981; Kay & Dexter, 1992), composição química e concentração da solução do solo (Rahimi et al., 2000), teor de argila e mineralogia (Bartoli et al., 1992; Imhoff et al., 2002), teor de argila dispersa (Shanmuganathan & Oades, 1982) e matéria orgânica do solo (Causarano, 1993; Perfect et al., 1995; Imhoff et al., 2002). Em razão disso, a resistência tênsil dos agregados é uma medida sensível aos efeitos de sistemas de uso e manejo na estrutura do solo (Chan, 1995; Watts & Dexter, 1997; Munkholm et al., 2001; Munkholm &

A resistência tênsil dos agregados é definida como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados (Dexter & Watts, 2000). De acordo com Dexter & Kroesbergen (1985), a resistência tênsil é provavelmente a mais útil medida da resistência individual dos agregados do solo, porque ela pode ser determinada por um teste simples numa ampla variação de tamanhos de agregados e pode consistir em um indicador muito sensível da condição estrutural do solo. A resistência tênsil dos agregados é uma propriedade dinâmica sob condições de campo (Kay & Dexter, 1992) e, em determinado solo, reflete os efeitos de fatores naturais e do uso e manejo na organização hierárquica dos agregados na estrutura do solo. Desse modo, durante a medida da resistência tênsil, a ruptura dos agregados ocorre nos planos de fraqueza derivados das fissuras e microfissuras que formam zonas de menor resistência dentro dos agregados. Detalhes em relação aos métodos de medida da resistência tênsil são descritos em Dexter & Kroesbergen (1985), Watts & Dexter (1998) e Dexter & Watts (2000).

A friabilidade do solo pode ser definida como a tendência de uma massa de solo de se desfazer em menores tamanhos de agregados sob aplicação de um estresse ou carga (Watts & Dexter, 1998). Ela é resultante da heterogeneidade da resistência tênsil devido aos planos de fraqueza ou zonas de falhas entre os agregados na estrutura do solo (Braunack et al., 1979; Utomo & Dexter, 1981; Dexter & Watts, 2000) a qual pode ser estimada por meio do coeficiente de variação da resistência tênsil do solo (Watts & Dexter,

friabilidade é sinônimo de qualidade da condição física do solo, também indicativa da condição estrutural do solo, como salientam Watts & Dexter (1998). A organização hierárquica da estrutura de um solo bem estruturado apresentada por Dexter (1988) fornece os fundamentos do conceito da friabilidade do solo (Dexter & Watts, 2000), a qual é considerada uma importante propriedade física dos solos agrícolas, uma vez que a condição de friabilidade é desejável para adequado estabelecimento das plantas (Snyder et al., 1995; Watts & Dexter, 1998). Valores elevados de friabilidade indicam que agregados maiores possuem menor resistência à ruptura do que agregados menores e, desse modo, poderão ser quebrados mais facilmente numa ampla distribuição de tamanhos, produzindo adequada distribuição do tamanho de agregados. Macks et al. (1996) sugerem a utilização da friabilidade como indicador da restrição da condição estrutural do solo para o estabelecimento das culturas no plantio direto. Nesse estudo, estes autores também verificaram que a friabilidade é significativamente relacionada com outras propriedades estruturais do solo, como a densidade do solo, a condutividade hidráulica e a estabilidade de agregados.

A friabilidade do solo foi classificada por Utomo & Dexter (1981) a partir de medidas obtidas, utilizando o método do volume dos agregados. Essa classificação, quando comparada com a friabilidade estimada pelo método do coeficiente de variação (Watts & Dexter, 1998), resulta em menores valores de friabilidade. Nesse sentido, Chan et al. (1999) constataram haver uma razão média próxima a 2 entre a friabilidade medida pelo método do coeficiente de variação e pelo método do volume dos agregados. Imhoff et al. (2002) utilizaram a classificação da friabilidade do solo proposta por Utomo & Dexter (1981) multiplicada por dois, definindo as classes e os valores de friabilidade.

Em solos tropicais e subtropicais brasileiros, tanto a resistência tênsil quanto a friabilidade não têm sido utilizadas em estudos dos impactos de sistemas de uso e manejo do solo na condição física e estrutural dos solos. Particularmente, desconhece-se o impacto do uso intensivo do solo por longo prazo na resistência tênsil e na friabilidade do solo tendo como referência um solo não cultivado sob mata nativa. O objetivo deste estudo foi avaliar a resistência tênsil e a friabilidade de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de uso, especificamente com mata nativa, e uso do solo por mais de 20 anos sob pousio com a forrageira braquiária e cultivado com exploração intensiva de culturas anuais.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá, localizada no município de Maringá, região noroeste do Paraná

de 570 m). O solo utilizado é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006), com teores de argila, silte e areia na camada superficial do solo, respectivamente, de 230, 10 e 760 g kg⁻¹. O material de origem deste solo provém de resíduos intemperizados do Arenito Caiuá da série São Bento do período Cretáceo. Nesta região, o tipo climático dominante é subtropical (Cfa), pela classificação de Köppen.

Selecionaram-se três áreas contíguas, sendo uma sob mata nativa (floresta estacional semidecidual) e as outras duas cultivadas por cerca de 20 anos, utilizando um sistema de pousio com *Brachiaria decumbens* manejada com três a quatro roçadas anuais e cultivo com culturas – milho, aveia, sorgo, soja e mandioca – por meio de preparo convencional do solo com aração a 25 cm de profundidade e gradagem leve. Esses sistemas de uso do solo foram denominados de tratamentos mata, pousio e cultivo.

A amostragem de solo foi realizada em fevereiro de 2006, coletando-se aleatoriamente, em cada um dos tratamentos, 10 blocos de solo (15 x 20 x 10 cm, respectivamente altura, comprimento e largura) na camada de 0–15 cm de profundidade, com auxílio de uma pá reta. Os blocos de solo foram individualmente identificados, envolvidos em filmes plásticos para manutenção da umidade e da estrutura e, posteriormente, encaminhados para manuseio em laboratório. Em seguida, os blocos de solo foram manualmente fragmentados em seus agregados naturais, em cujo processo tomou-se o cuidado de se estabelecer a força mínima necessária para que eles se fragmentassem em seus planos de fraqueza naturais.

Os agregados foram secos ao ar por 36 h e em estufa a uma temperatura de 60 °C por 24 h, para secagem final e homogeneização da umidade. Na sequência, os agregados foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura, com diâmetro médio de 15,75 mm (Imhoff et al., 2002) e armazenados em sacos de papel devidamente identificados, até o momento da realização dos testes para determinação da sua resistência tênsil.

Para as medidas de resistência tênsil, foram utilizados 40 agregados de cada bloco de solo, totalizando 400 agregados por tratamento. Cada agregado foi pesado em balança analítica e em seguida submetido, individualmente, a um teste de tensão indireta em atuador eletrônico linear, que empregava velocidade constante de 0,03 mm s⁻¹ (Imhoff et al., 2002). Para o teste de tensão indireta, cada um dos agregados de solo foi colocado em posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior fixa e outra superior móvel ligada a uma célula de carga com capacidade de 20 kgf. A célula de carga é acoplada à extremidade inferior do êmbolo do atuador eletrônico linear e a um microcomputador, que registra o valor da força aplicada para ruptura tênsil de cada agregado. No final de cada teste, uma subamostra dos agregados foi pesada em balança analítica e submetida

determinação da umidade residual da amostra de solo. Os valores médios de umidade em base de massa dos agregados dos solos sob mata, pousio e cultivado foram de 0,92, 0,65 e 0,72 %, respectivamente.

A resistência tênsil foi calculada conforme descrito por Dexter & Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 (P/D^2) \quad (1)$$

em que RT é a resistência tênsil; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade, resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P , a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D , o diâmetro efetivo (m).

O diâmetro efetivo (D) foi calculado conforme Dexter & Kroesbergen (1985):

$$D = Dm (M/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

em que M é a massa do agregado individual (g); M_0 , a massa média dos agregados em cada tratamento (g); e Dm , o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras [(12,5 + 19,0)/2 = 15,75 mm]. Usualmente, a medida da resistência tênsil dos agregados de solo é representada em kPa.

A friabilidade do solo foi estimada pelo método do coeficiente de variação proposto por Watts & Dexter (1998). Neste método os valores da friabilidade do solo (F) são obtidos através do coeficiente de variação dos valores medidos de resistência tênsil dos agregados em cada tratamento:

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} \pm \frac{\sigma_Y}{Y\sqrt{2n}} \quad (3)$$

em que F é friabilidade do solo; σ_Y , o desvio-padrão dos valores medidos da resistência tênsil; Y , a média dos valores medidos de resistência tênsil; e n , o número de repetições. O segundo termo é o erro-padrão do coeficiente de variação.

Para caracterizar a friabilidade do solo entre os três tratamentos, foram utilizadas as classes de friabilidade do solo adotadas por Imhoff et al. (2002), que também utilizaram o método de determinação da friabilidade segundo o coeficiente de variação: não friável ($< 0,01$), ligeiramente friável (0,10–0,20), friável (0,20–0,50), muito friável (0,50–0,80) e mecanicamente instável ($> 0,80$).

Paralelamente à amostragem dos blocos de solo, foram coletadas amostras de solo indeformadas com anéis metálicos com 5 cm de altura e diâmetro, no centro da camada de 0–15 cm de profundidade, destinadas à obtenção da densidade do solo. Em seguida, essas amostras foram secas em estufa a 105–110 °C por 24 h, e a densidade do solo foi determinada conforme Grossman & Reinsch (2002). Uma subamostra dos blocos de solo de cada tratamento foi utilizada para determinação dos teores de C orgânico do solo pelo mé-

Os valores originais de resistência tênsil, friabilidade (limite inferior, média e limite superior) C orgânico e densidade do solo foram submetidos às análises de variância e teste para comparação de médias, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos (mata, pousio e cultivado) e 10 repetições (blocos de solo). Foram estabelecidas correlações simples de Pearson entre as variáveis, com significância obtida pelo teste t. Essas análises de variâncias atenderam às pressuposições básicas de distribuição normal dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk e homocedasticidade das variâncias pelo teste de Levene, ambos significativos acima de 5 %. As análises estatísticas foram realizadas com o programa estatístico SAS Institute (2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No solo sob mata, verificou-se maior coeficiente de variação em todas as variáveis medidas (Quadro 1). A dispersão dos dados da resistência tênsil do solo foi homogênea entre os tratamentos mata, pousio e cultivado (Quadro 1), confirmada pelo teste de homocedasticidade de Levene ($p < 0,05$) (Vieira, 1999). Os valores dos coeficientes de variação da resistência tênsil são similares aos obtidos por Barral et al. (1998). Essa amplitude dos dados mostra que em todos os tratamentos houve grande variação dos valores da resistência tênsil do solo, em acordo com Watts & Dexter (1998) e Imhoff et al. (2002). A maior variação da resistência tênsil do solo sob mata também se deve à elevada variabilidade na forma dos agregados do solo, verificada por ocasião das medidas, diante da dificuldade em definir a posição mais estável dos agregados, bem como avaliar o momento exato em que ocorre a ruptura de cada um dos agregados durante a aplicação da carga. De acordo com Kay & Dexter (1992), o maior número de ciclos de secagem e umedecimento do solo tem relação com a variabilidade da resistência tênsil, o que poderia justificar também o maior CV no solo sob mata. Independentemente dos tratamentos, os valores de resistência tênsil deste solo são bem menores do que aqueles verificados por Bartoli et al. (1992) e Imhoff et al. (2002) para Latossolos tropicais, provavelmente em função das diferenças texturais e mineralógicas entre os solos.

Os valores médios da resistência tênsil dos agregados do solo distinguiram-se estatisticamente entre os tratamentos (Figura 1). Outros estudos confirmam a menor resistência tênsil do solo sob mata (Blanco-Canqui et al., 2005) e de pastagem em relação ao solo cultivado (Chan, 1989; Watts & Dexter, 1997; Munkholm et al., 2001). No caso específico do tratamento pousio sob manejo com roçadas mecânicas, o aumento da resistência tênsil em relação à mata também se deve ao tráfego do conjunto do trator e roçadura utilizados três a quatro vezes por ano. Os

Quadro 1. Momentos estatísticos para resistência tênsil do solo, friabilidade, carbono orgânico e densidade do solo para tratamentos mata, pousio e cultivo

Tratamento	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	CV (%)
Resistência tênsil do solo (kPa)				
Mata	7,75	102,39	13,09	41,66
Pousio	18,25	165,71	22,70	34,94
Cultivo	18,54	233,00	27,69	35,57
Friabilidade do solo (adimensional)				
Mata	0,29	0,61	0,08	20,24
Pousio	0,24	0,43	0,04	12,90
Cultivo	0,22	0,48	0,05	15,34
Carbono orgânico do solo (g dm ⁻³)				
Mata	8,58	17,59	2,63	20,18
Pousio	8,58	12,87	1,54	15,07
Cultivo	5,58	9,44	0,99	12,60
Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
Mata	1,26	1,52	0,07	5,21
Pousio	1,67	1,75	0,03	1,54
Cultivo	1,68	1,86	0,07	3,86

tratamento mata foram 150 % menores do que aqueles sob os tratamentos pousio e cultivo. Maiores valores de resistência tênsil implicam leito de semeadura formado por agregados de maior tamanho em oposição a uma ampla distribuição de tamanho de agregados, o que é desejável para otimizar as condições físicas do solo próximo às sementes e raízes.

Os teores de CO do solo diferenciaram-se estatisticamente entre os tratamentos (Figura 2), em acordo com Tan et al. (2007). Para Cambardella & Elliot (1993), a redução dos teores de C em solos cultivados está associada com a deterioração da estrutura física do solo. Constatou-se que os teores de C nos tratamentos são inversamente proporcionais aos valores da resistência tênsil do solo (Figura 1), comportamento também verificado por Chan (1995) e Blanco-Canqui et al. (2005). Esses resultados são distintos daqueles de Bartoli et al. (1992), obtidos em Latossolos tropicais, os quais verificaram aumento da resistência tênsil em função do CO do solo, associado ao efeito de cimentação entre as partículas minerais. Essas duas variáveis correlacionaram-se negativamente ($r = -0,72$; $p < 0,0001$), indicando que o aumento de CO do solo implica redução da resistência tênsil dos agregados do solo. Por outro lado, a resistência tênsil do solo correlacionou-se positivamente com a densidade do solo ($r = 0,85$; $p < 0,0001$). A densidade do solo diminui ou, alternativamente, a porosidade do solo aumenta com

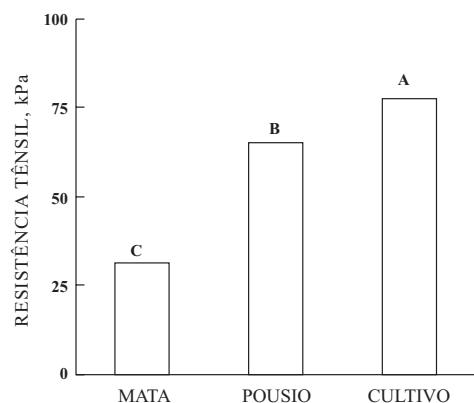


Figura 1. Valores médios de resistência tênsil dos agregados do solo para os tratamentos mata, pousio e cultivo. Médias seguidas de letras iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

a resistência tênsil dos agregados, a exemplo dos resultados de Zhang (1994) e Barral et al. (1998). Neste solo, a referência da densidade é de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ sob mata (Embrapa, 1984), observando-se (Figura 3) o aumento significativo da densidade do solo nos tratamentos pousio e cultivo em relação à mata, que

A compactação do solo pode ter provocado também a coalescência dos agregados, aumentando a densidade individual e reduzindo o espaço poroso intra-agregado, culminando com o aumento da resistência dos agregados, em acordo com Blanco-Canqui et al. (2005). Evidências nesse sentido foram constatadas, neste solo, por Araújo et al. (2000).

Os resultados de Zhang (1994) indicam que há dois efeitos contrários da matéria orgânica do solo sobre a resistência tênsil dos agregados: aumento no número e na força das ligações entre as partículas e o efeito de diluição que implica redução da densidade do solo ou aumento da porosidade do agregado. O aumento de matéria orgânica no solo resulta em maior porosidade do agregado, o que diminui o número de ligações entre as partículas; neste caso, se a força destas ligações

não for incrementada, então se verifica redução da resistência tênsil. A predominância de um ou outro mecanismo vai determinar a direção da correlação entre resistência tênsil dos agregados e matéria orgânica do solo, como verificado nos estudos de Chenu & Guérif (1991), Causarano (1993), Watts & Dexter (1997), Rahimi et al. (2000) e Bartoli et al. (1992). Zhang (1994) verificou que a redução da resistência tênsil dos agregados do solo com o aumento da matéria orgânica deste decorreu do aumento da porosidade dos agregados – e este é o provável mecanismo envolvido no comportamento da resistência tênsil no presente estudo. Além da quantidade de matéria orgânica do solo, ressalta-se que o seu grau de humificação influencia a resistência tênsil dos agregados, como verificado por Zhang (1994), demonstrando que, quanto mais humificada a matéria orgânica do solo, menor será o seu efeito em reduzir a resistência tênsil dos agregados.

Além dos efeitos anteriormente mencionados, no solo sob os tratamentos pousio e cultivo, a redução nos teores de matéria orgânica do solo pode implicar aumento no teor de argila dispersa, o qual, segundo Kay & Dexter (1992), atua como material cimentante por ocasião do secamento do solo, promovendo incremento na resistência tênsil dos agregados, como verificado por Shanmuganathan & Oades (1982). Watts et al. (1996) e Watts & Dexter (1997). Por outro lado, sob secagem e umedecimento do solo pode ocorrer decréscimo na resistência tênsil devido à formação de zonas de baixa resistência, como atestado pelos resultados de Kay & Dexter (1992). A maior freqüência dos ciclos de secagem e umedecimento associados à transpiração das plantas e à menor produção de argila dispersa por ocasião do umedecimento do solo podem ter contribuído para os menores valores de resistência tênsil no tratamento sob mata, tendo em conta os resultados de Utomo & Dexter (1981) e Kay & Dexter (1992). Também conforme Kay & Dexter (1992), a redução nos teores de CO do solo resulta em menor estabilidade estrutural deste, que, por um lado, aumenta os teores de argila dispersa e, por outro, aumenta a suscetibilidade da estrutura dos agregados ao fraturamento diante dos ciclos de secagem e umedecimento, exercendo controle sobre a resistência tênsil nos solos sob o tratamento cultivo.

Distintamente da resistência tênsil dos agregados a friabilidade do solo foi menos sensível para distinguir os efeitos dos tratamentos e os valores médios diferiram estatisticamente no solo sob mata, comparado ao pousio e cultivo (Figura 4). Esses resultados estão em acordo com os de outros estudos que comprovam que os solos sob mata nativa são mais friáveis do que os solos cultivados (Chan, 1989; Macks et al., 1996; Watts & Dexter, 1998). A maior densidade no solo sob os tratamentos pousio e cultivo é compatível com os efeitos do preparo do solo muito úmido e do tráfego de máquinas, que, de acordo com Dexter & Watts

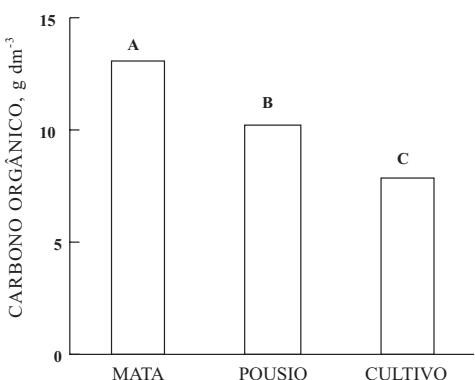


Figura 2. Teores médios de carbono orgânico do solo para os tratamentos mata, pousio e cultivo. Médias seguidas de letras iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

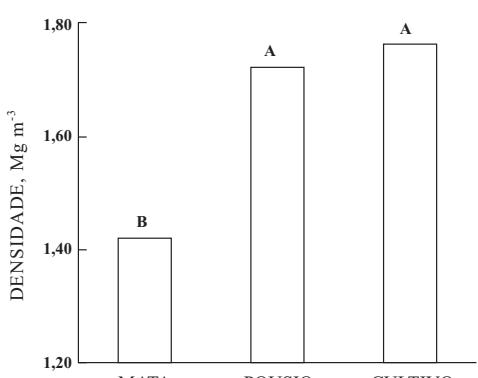


Figura 3. Valores médios de densidade do solo para os tratamentos mata, pousio e cultivo. Médias seguidas de letras iguais entre os tratamentos

à energia mecânica aplicada, que quebra as ligações entre as partículas do solo e aumenta a quantidade de argila mecanicamente dispersável. A amplitude da friabilidade do solo foi de 0,22 a 0,61, com esses valores pertencentes à classe friável e muito friável, respectivamente. Valores de friabilidade maiores que 0,50 ocorreram no solo sob mata nas repetições 1, 4 e 7, as quais se enquadram na classe de muito friável. Esses valores são parecidos com aqueles de Imhoff et al. (2002), que obtiveram valor médio de 0,45 para diferentes classes de Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutroférico, cultivados com cana-de-açúcar no Sudeste do Brasil. A menor amplitude da friabilidade do solo sob os tratamentos pousio e cultivo é explicada pela presença de poucos planos de fraqueza (macroporos) ou microfendas nos agregados, em comparação com o solo sob mata. Esses resultados diferem daqueles de Watts & Dexter (1997) e Chan (1989), que distinguiram o efeito do uso do solo com gramíneas e pastagens permanentes que apresentaram maior friabilidade do que o solo sob cultivo intensivo.

Os valores médios de friabilidade do solo foram inversamente proporcionais à densidade do solo (Figuras 3 e 4), verificando-se correlação negativa entre as duas variáveis ($r = 0,47$; $p < 0,001$). Esses resultados indicam que a menor densidade ou a maior porosidade do solo estabelece uma maior ocorrência de locais com baixa resistência, permitindo que a manipulação mecânica ou fraturamento do solo ocorra com menor dispêndio de energia. Comparando esses valores de densidade do solo com os obtidos por Lima et al. (2005) em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro, constata-se que os tratamentos pousio e cultivo assemelham-se ao perfil de solo coeso ($1,75 \text{ Mg m}^{-3}$) e a mata, ao perfil não-coeso ($1,52 \text{ Mg m}^{-3}$), os quais apresentaram, respectivamente, resistência tênsil de 19 e 77 kPa, determinadas com os mesmos

equipamentos e procedimentos utilizados no presente estudo e descritos por Imhoff et al. (2002) e Dexter & Kroesbergen (1985). Isso corrobora as interpretações equivocadas de compactação do solo verificadas em solos originários da Formação Caiuá, como o do presente estudo, que, quando secos, apresentam horizontes AB, A/B, Bw ou Bt muito duro e friável, quando úmido, similar ao comportamento de solos com caráter coeso descritos por Giarola et al. (2003) e Lima et al. (2005).

A friabilidade do solo não foi influenciada pelo teor de CO, verificada pela ausência de correlação significativa entre estas variáveis ($r = 0,22$; $p = 0,24$). Os resultados deste estudo discordam dos de Watts & Dexter (1998) e Bartoli et al. (1992), que identificaram, respectivamente, elevada correlação positiva e negativa entre a friabilidade e o teor de CO do solo. É provável que o efeito do CO do solo tenha sido consequência da densidade do solo, visto a forte relação negativa entre a friabilidade e a densidade do solo, conhecendo-se a relação inversa entre a densidade e o CO do solo verificada neste solo por Araujo et al. (2004). Constatou-se neste solo e sistemas de uso que uma redução na resistência tênsil dos agregados resultou em aumento da friabilidade do solo, ainda que esta não se distinguisse entre os tratamentos pousio e cultivo (Figuras 1 e 4). No entanto, a friabilidade do solo ainda é elevada sob tratamentos pousio e cultivo pertencentes à classe friável (Imhoff et al., 2002), confirmando as argumentações de Macks et al. (1996) de que a friabilidade pode ser elevada mesmo com agregados com elevados valores de resistência tênsil. A friabilidade e o teor de CO do solo não se correlacionaram significativamente, mas observa-se que a intensidade de uso do solo da mata para o pousio e o cultivo reduziu os teores de CO, implicando maior resistência tênsil dos agregados e menor friabilidade do solo (Figuras 1 e 4). Esses resultados mostram que houve perda da qualidade estrutural desse solo pelo pousio, e em maior intensidade sob o cultivo, em acordo com Watts & Dexter (1997), Munkholm et al. (2001), Munkholm & Schjønning (2004) e Blanco-Canqui et al. (2005). Essa afirmação é confirmada pelas avaliações de Machado (2006), que constataram menores valores do índice S de qualidade estrutural do solo proposto por Dexter (2004), nos tratamentos mata e pousio.

Nos tratamentos avaliados, o solo apresentava distribuição de tamanho de partículas similar (argila, silte e areia, respectivamente, de 230, 10 e 760 g kg^{-1}) e diferentes teores de CO e valores de densidade do solo (Figuras 2 e 3). Em comparação com o solo sob mata, todas as propriedades físicas avaliadas foram adversamente afetadas pelo uso do solo, com evidências de que as perdas do CO e o cultivo intensivo promoveram a deterioração da estrutura, confirmada pela maior resistência tênsil dos agregados e densidade do solo e pela menor friabilidade do solo (Figuras 1, 2, 3 e 4). Em concordância com Watts & Dexter (1997),

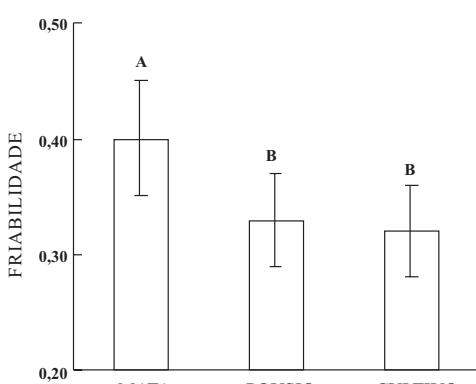


Figura 4. Valores médios de friabilidade do solo (colunas) e limites inferiores e superiores (indicados pelas barras verticais) para os tratamentos mata, pousio e cultivo. Médias seguidas de letras iguais entre os tratamentos, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de

compactação e à maior exposição da matéria orgânica nos solos cultivados, comparado com o solo sob mata, em que ela está mais protegida do ataque microbiano. Sob secamento, sugere-se que a resistência tênsil dos agregados nos solos sob cultivo tende a aumentar mais rapidamente do que no solo sob mata, estabelecendo um efeito similar ao da observada nos solos dos tabuleiros costeiros (Giarola et al., 2003) ou comportamento "hardsetting", a exemplo do estudo de Chan (1989). Os resultados de Araujo et al. (2004) mostram esse efeito na resistência do solo à penetração, comparando os solos sob os tratamentos mata e cultivo, neste mesmo solo e local de amostragem.

Elevada friabilidade do solo indica maior amplitude de tamanho de agregados na sua estrutura e que os agregados de menor tamanho apresentam maior resistência tênsil. Empiricamente, esperava-se que a qualidade estrutural do solo estudado fosse em ordem decrescente: mata, pousio e cultivo. Contudo, os resultados mostraram que a resistência tênsil dos agregados e os teores de C orgânico foram mais sensíveis em distinguir os efeitos do uso do solo (Figuras 1 e 2), comparados à friabilidade e à densidade do solo para os tratamentos pousio e cultivo (Figuras 3 e 4), devido à manutenção das proporções dos valores médios e do desvio-padrão da resistência tênsil dos agregados do solo entre esses dois tratamentos (Quadro 1). Esses resultados corroboram o estudo de Marun (1996), que distinguiu o uso do Latossolo Vermelho distrófico originário da Formação Caiuá no noroeste do Paraná, entre sua manutenção com gramínea e o cultivo com culturas anuais, mostrando o antagonismo entre o aumento da densidade do solo e o decréscimo dos teores de C orgânico do solo.

CONCLUSÕES

1. A resistência tênsil de agregados aumentou proporcionalmente com a redução dos teores de C orgânico do solo.
2. O solo foi classificado como friável independentemente do sistema de uso, e a friabilidade foi maior no solo sob mata, comparado com pousio e cultivo.
3. A resistência tênsil dos agregados, a friabilidade, o teor de C orgânico e a densidade do solo caracterizaram a redução da qualidade do solo proporcionalmente à intensidade da sua utilização.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *R. Bras. ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. R. Bras. C. Solo, 28:337-345, 2004.*
- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; WATANABE, S.H.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & MATA, J.D.V. Avaliação do impacto do cultivo nas características químicas e na agregação de um Latossolo Vermelho distrófico do noroeste do Paraná. *Acta Sci., 22:1045-1053, 2000.*
- BARRAL, M.T.; ARIAS, M. & GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil Till. Res., 46:261-272, 1998.*
- BARTOLI, F.; BURTIN, G. & GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. *Geoderma, 54:259-274, 1992.*
- BERTOLI, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. *R. Bras. Ci. Solo, 28:155-163, 2004.*
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M. & IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. *Soil Sci. Soc. Am. J., 69:1472-1481, 2005.*
- BRAUNACK, M.V.; HEWITT, J.S. & DEXTER, A.R. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci., 30:653-667, 1979.*
- CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOTT, E.T. Carbon and nitrogen in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J., 57:1071-1076, 1993.*
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo, 14:99-105, 1990.*
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *R. Bras. Ci. Solo, 22:527-538, 1998.*
- CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil Till. Res., 28:15-25, 1993.*
- CHAN, K.Y. Friability of a hardsetting soil under different tillage and land use practices. *Soil Till. Res., 13:287-298, 1989.*
- CHAN, K.Y. Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia. *Soil Till. Res., 34:105-115, 1995.*

- CHAN, K.Y.; DEXTER, A.R. & MCKENZIE, D.C. Categories of soil structure based on mechanical behaviour and their evaluation using additions of lime and gypsum on a sodic Vertisol. *Aust. J. Soil Res.*, 37:903-911, 1999.
- CHENU, C. & GUÉRIF, J. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1076-1080, 1991.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.*, 11:199-238, 1988.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Part I. *Geoderma* 120:201-214, 2004.
- DEXTER, A.R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.*, 31:139-147, 1985.
- DEXTER, A.R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. eds. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2000. p.401-430.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. (Rio de Janeiro, RJ). Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Londrina, Embrapa-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984. v.1/2, 791p. (Embrapa-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 27; IAPAR. Boletim Técnico, 16)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, 113:95-108, 2003.
- GROSSMAN, R.B & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. v.4. p.201-228.
- HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:161-166, 1990.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1656-1661, 2002.
- KAY, B.D. & DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. *Aust. J. Soil Res.*, 30:297-310, 1992.
- LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E. & JACOMINE, P.K.T. Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado coeso. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1656-1661, 2002.
- MACHADO, J.L. Qualidade física de solos em distintos sistemas de uso e manejo quantificada pelo índice S. Maringá. Universidade Estadual de Maringá, 2006. 62p. (Tese de Mestrado)
- MACKS, S.P.; MURPHY, B.W.; CRESSWELL, H.P. & KOEN, T.B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aust. J. Soil Res.*, 34:343-360, 1996.
- MARUN, F. Propriedades físicas e biológicas de um Latossolo Vermelho-Escuro do arenito Caiuá sob pastagem e culturas anuais. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31:593-597, 1996.
- MUNKHOLM, L.J. & SCHJØNNING, P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. *Soil Till. Res.*, 79:79-85, 2004.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. & RASMUSSEN, K.J. No-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. *Soil Till. Res.*, 62:1-14, 2001.
- PERFECT, E.; KAY, B.D. & SILVA, A.P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:532-537, 1995.
- RAHIMI, H.; PAZIRA, E. & TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.*, 54:145-153, 2000.
- SAS Institute. SAS/STAT User's guide. Version 8.2. Cary, 2001. 943p.
- SHANMUGANATHAN, R.T. & OADES, J.M. Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of a Red-Brown Earth. *Aust. J. Soil Res.*, 20:315-324, 1982.
- SNYDER, V.A.; VÁZQUEZ, M.A.; MARTÍNEZ, G.; RAMÍREZ, L. & HADAS, A. Controlled displacement technique for measuring soil friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:44-52, 1995.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:395-401, 2001.
- TAN, Z.; LAL, R.; OWENS, L. & IZAURRALDE, R.C. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.*, 92:53-59, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- UTOMO, W.H. & DEXTER, A.R. Soil friability. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 32:203-213, 1981.
- VIEIRA, S. Pressuposições básicas. In: VIEIRA, S. Estatística

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.*, 49:73-84, 1998.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil Till. Res.*, 42:253-275, 1997.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. & LONGSTAFF, D.J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. Part II. Field trials. *Soil Till. Res.*, 37:175-190, 1996.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. *Soil Till. Res.*, 31:263-175, 1994.