



# Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado<sup>1</sup>

Vera R. M. Macedo<sup>2</sup>, Apolino J. N. da Silva<sup>3</sup> & Mário S. V. Cabeda<sup>4</sup>

## RESUMO

A reconstrução da qualidade de solos fisicamente degradados tem sido feita por sistemas de manejos conservacionistas; no entanto, a melhoria da estrutura do solo o torna muito suscetível à compactação quando sofre compressões pela mecanização. A compressibilidade de amostras de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado, coletadas na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Eldorado do Sul, RS, foi avaliada com ensaios de compressão uniaxial, em duas umidades. A curva de compressão do solo, porosidade, densidade do solo e a resistência à penetração foram determinadas. Amostras de solo recuperado mostraram-se mais compressíveis, principalmente em umidade mais elevada. Após a compressão com pressões entre 25 e 500 kPa, o solo recuperado apresentou-se fisicamente muito semelhante ao solo degradado. A baixa resistência a compressão do solo recuperado torna evidente a dificuldade de compatibilizar o manejo do solo após o uso de sistemas conservacionistas e recuperadores de estrutura com a mecanização, tal como é hoje praticada, o que indica a necessidade de se encontrar alternativas que diminuam as pressões compressivas aplicadas ao solo ou que o condicionem a oferecer maior resistência à compressão.

**Palavras-chave:** compressibilidade do solo, porosidade, densidade, resistência a compressão

# Compressibility of a Acrisol in physically degraded and reclaimed conditions

## ABSTRACT

The reclamation of physically degraded soils has been done using conservationist systems. However, improvement of soil structure makes then very susceptible to intense deformation when bearing compression through mechanization. The compressibility of a Acrisol, physically degraded and reclaimed, collected in the Agricultural Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul, in Eldorado do Sul, RS, in two moisture levels, was evaluated with uniaxial compression tests. The soil compression curve, porosity, soil density and resistance to penetration were determined. The physically reclaimed soil samples were more compressible, notably at higher moisture levels. After applying stresses from 25 to 500 kPa, the reclaimed samples were very similar to the degraded ones. The low resistance to compression showed by the physically reclaimed soil makes evident the difficulty in making compatible the management of conservationist and upgrading structure systems with agricultural mechanization as practiced today. This also strengthens the necessity in finding alternatives to reduce stresses on soils or to make them able to offer higher resistance to compression.

**Key words:** soil compressibility, porosity, soil density, compression strenght

<sup>1</sup> Parte de Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>2</sup> Instituto Rio-Grandense do Arroz, CP 29, CEP 94930-030, Cachoeirinha, RS. Fone: (51) 3470-0600. E-mail: vera-macedo@irga.rs.gov.br

<sup>3</sup> Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias Escola Agrícola de Jundiá/UFRN. CP 07, CEP 59280-000, Macaíba, RN. Fone: (84) 3643-2235. E-mail: ajndas@ufrnet.br

<sup>4</sup> Departamento de Solos/UFRGS. CP 776, CEP 90001-970, Porto Alegre, RS. Fone: (51) 3316-6851. E-mail: mscabeda@uol.com.br

## INTRODUÇÃO

Na tentativa de se amenizar os processos de degradação física e recuperar solos fisicamente degradados, tem-se recomendado sistemas conservacionistas de manejo, os quais visam, concomitantemente, proporcionar melhores condições edáficas para a implantação de culturas e diminuir a erosão hídrica, com preparo mínimo ou reduzido do solo. Deles faz parte a adoção de rotação ou de sucessão de culturas com espécies vegetais de sistemas radiculares capazes de penetrar em solos compactados (Pedó, 1986). Essas culturas proporcionariam um contínuo fornecimento de matéria orgânica fresca ao solo através da parte aérea, com boa e eficaz cobertura protetora de superfície (Yusuf et al., 2009), e do sistema radicular extenso (Lovato et al., 2004), manteriam teores mais elevados de umidade do solo ao longo do perfil (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990), aumentariam a atividade biológica (Silva & Vidor, 1984) e melhorariam a agregação do solo (Silva et al., 2006). Desta forma, os referidos sistemas promoveriam a recuperação da estrutura de solos fisicamente degradados.

São comuns os trabalhos experimentais que relatam os efeitos benéficos dos sistemas conservacionistas de manejo no melhoramento das características físicas do solo (Jimenez et al., 2008; Lovato et al., 2004; Veiga et al., 2007). Para tanto, o solo fica ocupado, em certo intervalo de tempo, com rotações de culturas recuperadoras de sua estrutura, adotando-se o preparo mínimo do solo e se deixando o máximo de resíduos na superfície, ficando ele sob a ação benéfica da atividade biológica na rizosfera; no entanto, os mesmos efeitos positivos na porosidade obtidos no período de recuperação também podem deixar o solo recuperado mais suscetível à compactação instantânea, uma vez que solos fisicamente recuperados podem tornar-se mais compressíveis, em virtude não apenas do aumento da porosidade e da dimensão média dos espaços criados no processo de recuperação mas, também, pelo fato de se manterem mais úmidos por efeito da cobertura. Quando esses solos são submetidos à ação de compressão por máquinas e equipamentos agrícolas, sofrem deformações e compactações cujas intensidades estão relacionadas à sua compressibilidade.

A compressibilidade do solo refere-se à redução do seu volume por unidade de energia compressiva. A redução da porosidade ocorre com a expulsão do ar e da água e, eventualmente, sob altas pressões, pela compressão da água e deformação de sólidos (Keller et al., 2004). As relações pressão-deformação são complexas e diferem muito entre solos e, no mesmo solo, variam com o conteúdo de água (Gregory et al., 2006). Segundo Mosaddeghi et al. (2007), a mudança de volume pode ser expressa pelo índice de vazios (razão entre o volume de vazios ou poros e o volume de partículas), porosidade ou densidade do solo. Essas relações dependem de características do solo e da história de tensões por ele sofridas sendo expressas, genericamente, pela curva de compressão do solo (Arvidsson & Keller, 2004).

Poucos trabalhos têm estudado a influência do teor de umidade de solos sob diferentes sistemas de cultivo (Silva et al., 2002a; Silva & Cabeda, 2006) na sua compressibili-

dade. Menos frequentes são os trabalhos realizados com o objetivo de se estudar a influência do estado inicial de compactação do solo (porosidade ou densidade inicial) na sua compressibilidade (Silva et al., 2002b). Os sistemas de cultivo adotados para recuperação das características físicas do solo podem promover um espaço poroso que resulte em uma redução da sua resistência à compressão (Karlen et al. 2006; Severiano et al., 2010; Villamil et al., 2006).

O entendimento de que um solo estruturalmente recuperado, com elevada porosidade e espaços de maior dimensão, é altamente compressível, implica na hipótese segundo a qual, quando submetido à compressão, sofrerá instantaneamente significativa redução na porosidade e na dimensão dos poros, passando fisicamente à condição de solo compactado, fisicamente degradado.

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a compressibilidade de um solo Argissolo Vermelho em condições fisicamente recuperado e degradado em sua estrutura, através das relações entre a pressão compressiva e o índice de vazios, a porosidade, a densidade e a resistência à penetração em dois teores de umidade.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para testar a hipótese se utilizaram duas condições físicas de solo, em termos de estrutura: solo degradado e solo em condição de estrutura recuperada. Tais condições foram encontradas em experimento instalado e manejado desde 1983, na Estação Experimental Agrônoma da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, no município de Eldorado do Sul, RS, em um Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), cujo perfil, em condições naturais, apresenta no horizonte A 470, 220 e 310 g kg<sup>-1</sup> de areia, silte e argila, respectivamente, e teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e valor T iguais a 1,6, 1,3, 0,41, 0,15 e 8,5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Carpenedo, 1994).

A área em que o experimento foi instalado vinha sofrendo um preparo intensivo e inadequado, durante dez anos consecutivos, e o solo apresentava importante degradação física em sua estrutura, descrita por Medeiros (1985).

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com tratamentos dispostos em faixas, com parcelas subdivididas e três repetições (Medeiros, 1985). Cada bloco se constitui de duas parcelas principais, com dois níveis de compactação, sendo considerado descompactado o solo em que a camada compactada foi rompida através de aração até a profundidade de 25 ± 5 cm, seguida de quatro gradagens cruzadas, e o solo considerado compactado foi aquele em que se efetuaram quatro gradagens sem romper a camada compactada. As subparcelas foram formadas pelo cultivo das culturas de siratro (*Macroptilium atropurpureum*) e pousio-milho.

As amostras para a condição fisicamente degradada foram coletadas em três parcelas de solo compactado, de 5 x 4 m cada uma e utilizadas com o sistema pousio-milho, sem aplicação de nitrogênio. Coletaram-se as amostras de solo fisicamente recuperado em três parcelas de solo descom-

pactado, também de 5 x 4 m cada uma e ocupadas ininterruptamente durante 9 anos, por siratro, também sem aplicação de nitrogênio.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas entre 10 e 12 cm de profundidade com anéis metálicos rígidos de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, com auxílio de um amostrador e acondicionadas em sacos plásticos sobre serragem, evitando-se perturbações durante o transporte, para o laboratório. Cada amostra foi saturada por ascensão capilar de água durante 24 h e colocada em câmara de pressão até equilíbrio em valores equivalentes a -700 e -20 kPa de potencial matricial, atingindo umidades gravimétricas próximas a 0,11 e 0,16 kg kg<sup>-1</sup>. A umidade gravimétrica de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> corresponde ao limite inferior de plasticidade desse solo, determinado pelo método descrito por EMBRAPA (1997). Atingidos tais valores de umidade, as amostras foram imediatamente submetidas ao ensaio de compressão confinada, utilizando-se a prensa de compressão uniaxial, conforme metodologia descrita em Brasil (1971). A sequência de cargas aplicadas foi de 25, 50, 100, 200, 400 e 500 kPa, com leituras realizadas aos 7,5 s, 1 e 2 min; a cada dois minutos a amostra recebeu um incremento de carga até atingir 500 kPa.

O índice de vazios (*e*) foi calculado pela Eq. 1, conforme Brasil (1971):

$$e = \frac{h}{h_s} - 1 \quad (1)$$

em que: *h* é a altura da amostra e *h<sub>s</sub>* é a altura reduzida da amostra, ambas expressas em cm.

A curva de compressão do solo se constituiu dos valores de índices de vazios (*e*) localizados no eixo das ordenadas e dos valores das pressões aplicadas (*σ*) no eixo das abcissas, esses em escala logarítmica.

Determinou-se a densidade de partículas do solo (*D<sub>p</sub>*) pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo (*D<sub>s</sub>*) foi obtida pela relação entre a massa do solo secado em estufa e o volume do anel usado na coleta (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo após a compressão uniaxial foi determinada pela Eq. 2, conforme Brasil (1971):

$$D_s = \frac{D_p}{(1 + e)} \quad (2)$$

Obteve-se a porosidade do solo (*P*), inicial e após a compressão, pela Eq. 3, conforme EMBRAPA (1997):

$$P = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \times 100 \quad (3)$$

Para a interpretação da redução do índice de vazios utilizou-se o índice relativo de deformação (IRD), calculado pela Eq. 4:

$$IRD = \frac{e_i - e_f}{e_i} \quad (4)$$

em que: *e<sub>i</sub>* é o índice de vazios inicial e *e<sub>f</sub>* é o índice de vazios final

Decorridos noventa dias dos ensaios de compressão confinada, as amostras de solo foram novamente saturadas por ascensão capilar de água durante 24 h e colocadas em câmara de pressão, até equilíbrio em valores equivalentes a -700 e -20 kPa de potencial matricial sendo, em seguida, realizados os testes de resistência à penetração, utilizando-se o penetrômetro estático John Chantillon CATL 719 40, com 0,196 cm<sup>2</sup> de área basal, procedendo-se a três leituras em cada amostra. Após a determinação da resistência a penetração as amostras foram levadas à estufa a 100 °C, para determinação da umidade gravimétrica do solo.

A análise estatística seguiu o modelo de análise para o delineamento de blocos casualizados. Fez-se a comparação entre as médias de tratamentos pelo teste de Tukey, no nível de 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Relação entre pressão compressiva e índice de vazios do solo

A Tabela 1 mostra que, após a aplicação de pressões de 500 kPa no teste de compressão uniaxial em condições de umidade gravimétrica mais baixa (0,109 kg kg<sup>-1</sup>), o índice de vazios do solo fisicamente recuperado reduziu para 0,59; este valor praticamente se iguala ao valor do índice de vazios inicial das amostras do solo fisicamente degradado (0,60) na umidade de 0,117 kg kg<sup>-1</sup> (Tabela 1), significando que o ganho em índice de vazios do solo ocorrido durante a recuperação física foi instantaneamente perdido com a aplicação das pressões compressivas, chegando a valores muito aproximados aos do solo que não sofreu recuperação.

**Tabela 1.** Índice inicial (*e<sub>i</sub>*) e final (*e<sub>f</sub>*) de vazios, índice relativo de deformação (IRD) e umidade gravimétrica (*U<sub>g</sub>*) nos potenciais matriciais de -700 e -20 kPa em Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado

Condição do solo	<i>e<sub>i</sub></i> <sup>1</sup>	<i>e<sub>f</sub></i> <sup>2</sup>	IRD	<i>U<sub>g</sub></i> (kg kg <sup>-1</sup> )	
				-700 kPa	-20 kPa
Degradado	0,60 a	0,54 a	0,10 c	0,117	
Recuperado	0,70 a	0,59 a	0,16 c	0,109	
Degradado	0,53 a	0,42 b	0,21 b		0,163
Recuperado	0,70 a	0,41 b	0,41 a		0,165

<sup>1</sup> antes da compressão; <sup>2</sup> após compressão. Médias de três repetições. Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Os valores do índice relativo de deformação (IRD) dos solos degradado e recuperado foram significativamente superiores nos teores de água mais elevados, evidenciando a maior compressibilidade desses solos com o aumento da umidade (Tabela 1). Silva et al. (2002a) também verificaram maior compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo com o aumento do teor de umidade, através do índice de compressão do solo. No presente estudo a diferença de compressibilidade entre as amostras do solo degradado e as do solo recuperado, foi mais acentuada nos teores de água mais elevados (Tabela 1).

O IRD também aponta uma compressibilidade significativamente maior do solo recuperado em relação ao degrada-

do, no teor de umidade mais elevado (Tabela 1), devido ao maior índice de vazios inicial do solo recuperado. Este fenômeno também foi constatado por Silva et al. (2002a), que verificaram maior compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo quando este apresentava um índice maior de vazios inicial.

Quando mais seco, o solo degradado apresentou maior resistência a deformações adicionais (Tabela 1), não só pelo fato de já ter sofrido pressões compressivas mas também porque a taxa de redução do volume de vazios do solo diminuiu com o número de ciclos de carregamento (Fritton, 2006). As curvas de compressão do solo degradado com umidade de  $0,117 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,163 \text{ kg kg}^{-1}$  se mantiveram paralelas quando as pressões aplicadas foram inferiores a 100 kPa (Figura 1A). A redução no índice de vazios do solo degradado com maior teor de umidade foi mais acentuada com pressões superiores a 100 kPa.

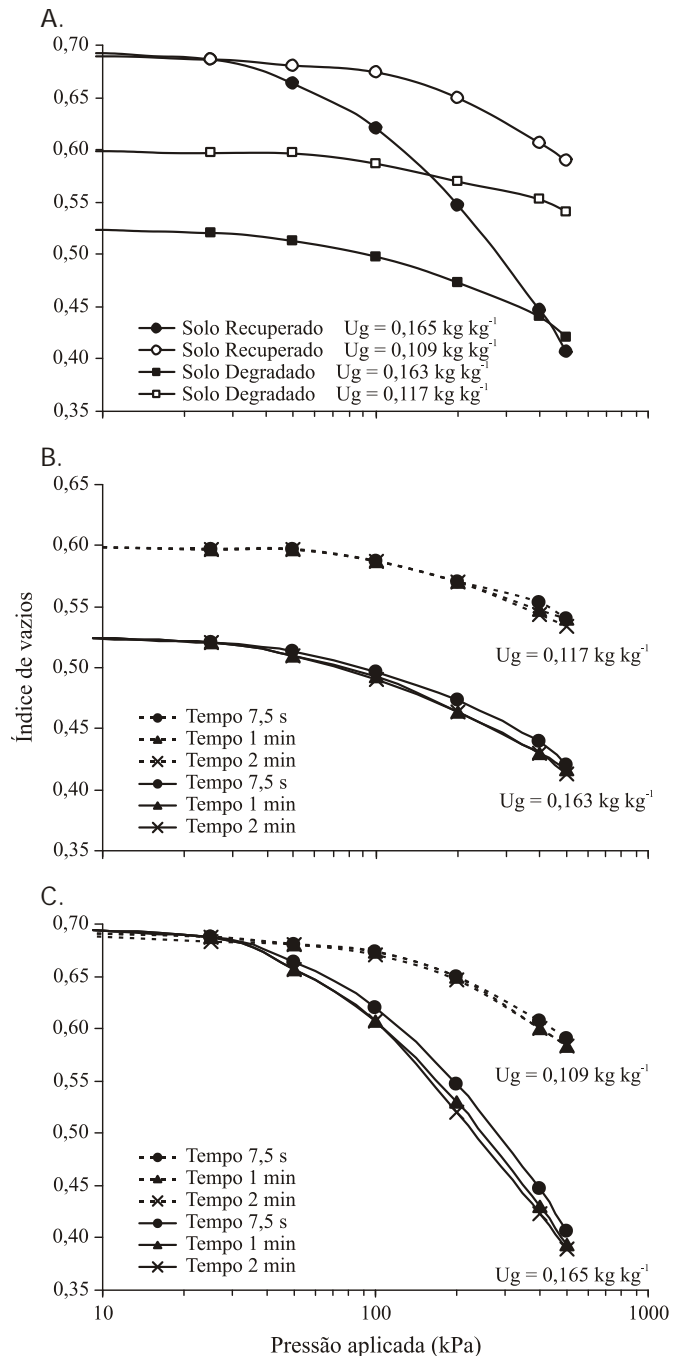
No solo com condições físicas recuperadas e com conteúdo de umidade em torno do limite inferior de plasticidade ( $0,109 \text{ kg kg}^{-1}$ ), observou-se maior resistência à compressão com pressões inferiores a 100 kPa, enquanto com conteúdo de umidade mais elevado se evidenciou uma acentuada e crescente compressibilidade do solo. Com a aplicação de pressão de 500 kPa e umidade mais elevada, o índice final de vazios ficou abaixo do índice inicial de vazios do solo degradado (Figura 1A).

O comportamento mecânico do solo com diferentes volumes iniciais de vazios e umidades, decorre das suas características iniciais e da história de pressões por ele sofrida. Segundo Arvidsson & Keller (2004), reduções significativas no volume de vazios somente ocorrem quando a pressão aplicada excede a pressão de pré-compactação. Como Carpenedo (1994) verificou que a pressão de pré-compactação ( $\sigma_p$ ) obtida sob diferentes manejos com o Argissolo Vermelho do presente estudo está em torno de 100 kPa e considerando que as pressões compressivas aplicadas por máquinas e equipamentos agrícolas podem ser próximas a 500 kPa (Yavuscan et al., 2002), há uma clara indicação de que o incremento no índice de vazios pelo processo de recuperação física em sistemas conservacionistas de cultivo torna o solo mais compressível quando sujeito a pressões próximas a esses valores.

Os valores de índice de vazios revelaram que as deformações volumétricas ocorreram em frações de segundo, como ficou evidenciado pelas pequenas diferenças nos índices de vazios nos tempos de leitura de 7,5 s, 1 e 2 min (Figura 1B e C). Nos teores de umidade de  $0,163$  e  $0,165 \text{ kg kg}^{-1}$ , para as amostras do solo degradado (Figura 1B) e recuperado (Figura 1C) respectivamente, a pequena deformação adicional, indicada nos tempos de leitura de 1 e 2 min, ocorreu com a aplicação de pressões compressivas a partir de 50 kPa. Em umidades mais baixas as deformações adicionais nos tempos de leitura de 1 e 2 min somente ocorreram com aplicação de cargas superiores a 200 kPa, tanto no solo degradado (Figura 1B) quanto no recuperado (Figura 1C).

#### Relação entre pressão compressiva e porosidade do solo

Na agronomia, a relação entre pressão compressiva e po-

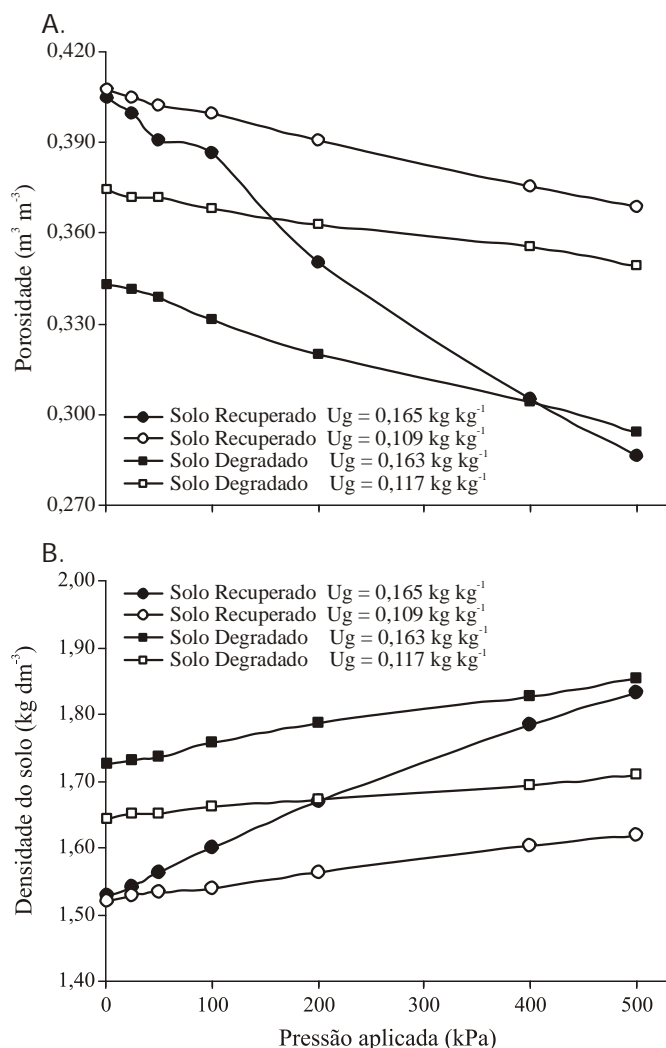


**Figura 1.** Curvas de compressão do Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado, em dois teores de umidade, aos 7,5 s (A), Curvas de compressão do Argissolo Vermelho fisicamente degradado em dois teores de umidade (linha tracejada,  $U_g = 0,117 \text{ kg kg}^{-1}$ ; linha cheia,  $U_g = 0,163 \text{ kg kg}^{-1}$ ), aos 7,5 s, 1 e 2 min de aplicação de pressão (B), Curvas de compressão do Argissolo Vermelho fisicamente recuperado em dois teores de umidade (linha tracejada,  $U_g = 0,109 \text{ kg kg}^{-1}$ ; linha cheia,  $U_g = 0,165 \text{ kg kg}^{-1}$ ), aos 7,5 s, 1 e 2 min de aplicação de pressão (C). Médias de três repetições

rosidade do solo pode ser mais ilustrativa do comportamento mecânico do solo, já que índice de vazios é uma relação volumétrica muito mais utilizada na engenharia civil.

Os valores de porosidade das amostras de solo degradado e recuperado foram muito próximos após a compressão (500 kPa), nos teores de umidade mais elevados. A porosidade do solo recuperado ( $0,286 \text{ kg kg}^{-1}$ ) alcançou um

valor inferior à porosidade do solo fisicamente degradado ( $0,294 \text{ kg kg}^{-1}$ ), nos valores mais altos de umidade ( $0,165 \text{ kg kg}^{-1}$ ) e pressão compressiva de 500 kPa (Figura 2A). O valor final de porosidade no solo recuperado no presente estudo ( $0,286 \text{ kg kg}^{-1}$ ) é inferior, inclusive, à porosidade que o mesmo solo tinha quando em condições físicas degradadas ( $0,326 \text{ kg kg}^{-1}$ ), conforme resultados de experimento conduzido por Pedó (1986), na camada entre 10 a 20 cm.



**Figura 2.** Relação entre pressão compressiva e porosidade do Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado, em dois teores de umidade, aos 7,5 s (A), Relação entre pressão compressiva e densidade do Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado em dois teores de umidade, nos 7,5 s (B). Média de três repetições

A deformação volumétrica do solo com a aplicação de pressões compressivas é expressa pela redução na porosidade do solo. Esta redução ocorre devido à expulsão do ar e da água, e preenchimento de parte dos vazios pela fase sólida (Schäffer et al., 2007). Como a aplicação da pressão é feita em um intervalo de tempo muito curto, a redução na porosidade se deve à diminuição do volume de macroporos e expulsão da fase gasosa (Mosaddeghi et al., 2007) e disto decorre uma perda de porosidade também em intervalo de

tempo extremamente curto, o que coloca, com instantaneidade, o solo recuperado novamente em condições físicas semelhantes ao degradado.

A redução mais expressiva da porosidade no solo recuperado ocorreu em função, provavelmente, do maior volume de macroporos e demais espaços de maior dimensão desenvolvidos ao longo do processo de recuperação física, fato que pode ser atribuído à grande capacidade de produção de raízes grossas do siratro na camada compactada do solo, à elevada produção de massa residual e à boa cobertura do solo, que proporcionam um aumento na atividade biológica do solo (Mielniczuk, 1988) e consequente recuperação na porosidade, especialmente no volume de macroporos e espaços maiores.

#### Relação entre pressão compressiva e densidade do solo

Com a aplicação de incrementos de carga de 25 a 500 kPa e com leituras de deformações realizadas aos 7,5 s, a densidade do solo degradado atingiu  $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$  após a compressão, em umidade acima do limite inferior de plasticidade ( $0,163 \text{ kg kg}^{-1}$ ). Quando comprimido nas mesmas pressões e com umidade média de  $0,117 \text{ kg kg}^{-1}$ , o solo apresentou densidade de  $1,71 \text{ kg dm}^{-3}$  (Figura 2B).

Com exceção do solo recuperado no teor de umidade de  $0,165 \text{ kg kg}^{-1}$ , os aumentos nos valores da densidade nas amostras de solo foram relativamente uniformes com os incrementos de pressão compressiva aplicados (Figura 2B). As amostras de solo comprimidas com baixa umidade resistiram mais às pressões compressivas, principalmente em 25 e 50 kPa. O acréscimo nos valores de densidade do solo é causado quando as pressões compressivas aplicadas são superiores à pressão de pré-compactação do solo (Silva et al., 2002a; Imhoff et al., 2004); disto decorre que o solo recuperado, após sofrer compressão, pode apresentar restrições ao estabelecimento e desenvolvimento de plantas, em função do aumento de sua densidade.

Ao final da compressão, para o teor de água mais alto ( $0,165 \text{ kg kg}^{-1}$ ), a densidade das amostras de solo recuperado ( $1,83 \text{ kg dm}^{-3}$ ) atingiu valores muito próximos aos da densidade inicial do solo degradado, indicando que um solo com características semelhantes às do presente estudo, tendo sido estruturalmente recuperado por sistemas conservacionistas de cultivo, apresentando proporção de vazios em relação ao volume de partículas sensivelmente aumentada, terá seus valores de densidade semelhantes aos da densidade do solo fisicamente degradado quando submetido a um esforço compressivo externo em valores de umidade mais elevados. Considerando que o preparo do solo para as culturas ditas comerciais continuam com o uso intenso de máquinas e de implementos cada vez mais pesados, o uso do solo fisicamente recuperado em tais condições poderá desenvolver rapidamente os mesmos problemas decorrentes da compactação observada no solo degradado, quando trabalhado em teores de umidade mais elevados.

#### Resistência a penetração após a compressão do solo

Assumindo os dados de resistência a penetração como indicadores das relações solo-raiz (Herrick & Jones, 2002;



Sweeney et al., 2006), visualiza-se que o solo fisicamente recuperado, mesmo após a compressão, apresentou condições de resistência mais favoráveis ao desenvolvimento radicular (Tabela 2), porém com umidades menores, os valores médios de resistência à penetração no solo fisicamente recuperado se aproximam muito dos valores considerados limitantes ao desenvolvimento radicular, por alguns autores; Cintra (1980), por exemplo, refere que raízes de cultivares de canola (*Brassica napus*), soja (*Glycine max*), cevada (*Hordeum vulgare*), tremoço (*Lupinus sp.*) e trigo (*Triticum aestivum*) não conseguiram penetrar no solo com 1800 kPa de resistência ao penetrômetro sendo que, com 1100 kPa, alguns sistemas radiculares experimentaram total impedimento.

**Tabela 2.** Umidade gravimétrica (Ug), resistência a penetração (Rp) e densidade do solo (Ds), após a compressão de 500 kPa em Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado

Condição física do solo	Ug (kg kg <sup>-1</sup> )	Rp (kPa)	Ds (kg dm <sup>-3</sup> )
Degradado	0,150 a	1.860 a	1,85 a
Degradado	0,127 a	2.420 a	1,71 ab
Recuperado	0,136 a	1.610 b	1,83 ab
Recuperado	0,113 a	1.710 b	1,62 b

Valores médios de três leituras em cada amostra. Médias de três repetições. Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

A resistência a penetração diferiu mais quando a compressão ocorreu com umidades menores, embora as diferenças em termos de umidade não tenham sido estatisticamente significativas (Tabela 2). Este comportamento mecânico reflete a maior diferença entre os valores de porosidade total das amostras dos solos degradado e recuperado, em teores de umidade mais baixos (Figura 2A), o mesmo ocorrendo com o índice de vazios (Figura 1A).

A baixa resistência à compressão do solo recuperado torna evidente a dificuldade de se compatibilizar o manejo de sistemas de recuperação física do solo com a mecanização agrícola, bem como a necessidade de se encontrar alternativas que permitam diminuir o efeito das pressões compressivas ou que condicionem o solo a apresentar maior resistência a compressão. Neste sentido, D'Agostini (1992) também enfatiza a necessidade de uma nova visão de preparo e manejo do solo, condicionando-o para que apresente maior resistência a compressão. Segundo este autor, a fragmentação de um solo compactado resulta em um todo descontínuo, formado por agregados compactados, mais densos, mais resistentes às compressões aplicadas e com características adequadas de espaço poroso para o movimento e contenção de água e para o desenvolvimento de raízes. Neste contexto, investigações com diferentes culturas, solos e condições de umidade, objetivando testar tal especulação, prometem resultados promissores.

## CONCLUSÕES

1. O solo recuperado apresentou uma redução acentuada no índice de vazios e de porosidade, elevado índice relativo

de deformação e um acréscimo na densidade após a compressão com pressões de 25 até 500 kPa, quando com maior teor de umidade.

2. O solo fisicamente recuperado mostrou-se altamente compressível, sobretudo em umidade mais elevada. Após a compressão com pressões entre 25 e 500 kPa, apresentou-se fisicamente muito semelhante ao solo inicialmente degradado nas duas condições de umidade, exceto na resistência a penetração, que foi menor, diferindo estatisticamente do solo degradado.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Luiz Renato D'Agostini, da UFSC, pelas sugestões, e ao professor João Mielniczuk, da UFRGS, pela cessão da área experimental.

## LITERATURA CITADA

- Arvidsson, J.; Keller, T. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, v.77, p.85-95, 2004.
- Bragagnolo, N.; Mielniczuk, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.14, p.91-98, 1990.
- Brasil. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Adensamento de solos: instruções de ensaio. DNER-IE 05.71. Brasília: DNER, 1971. 16p.
- Carpenedo, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre: UFRGS, 106p. 1994. Tese Doutorado
- Cintra, F. L. D. Caracterização do impedimento mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 1980. 89p. Dissertação Mestrado
- D'Agostini, L. R. Variações temporais da coesividade entre agregados de solo. Porto Alegre: UFRGS, 1992. 82p. Tese Doutorado
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. 212p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- Fritton, D. D. Fitting uniaxial soil compression using initial bulk density, water content, and matric potential. *Soil Science Society America Journal*, v.70, p.1262-1271, 2006.
- Gregory, A. S.; Whalley, W. R.; Watts, C. W.; Bird, N. R. A.; Hall, P. D.; Whitmore, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil & Tillage Research*, v.89, p.45-57, 2006.
- Herrick, J. E.; Jones, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society America Journal*, v.66, p.1320-1324, 2002.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of hapludox. *Soil Science Society America Journal*, v.68, p.19-24, 2004.

- Jimenez, R. L.; Gonçalves, W. G.; Araújo Filho, J. V.; Assis, R. L.; Pires, F. R.; Silva, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.116-121, 2008.
- Karlen, D. L.; Hurley, E. G.; Andrews, S. S.; Cambardella, C. A.; Meek, D. W.; Duffy, M. D.; Mallarino, A. P. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy Journal*, v.98, p.484-495, 2006.
- Keller, T.; Arvidsson, J.; Dawidowski, J. B.; Koolen, A. J. Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research*, v.77, p.97-108, 2004.
- Lovato, T.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Vezzani, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.175-187, 2004.
- Medeiros, J.C. Sistemas de culturas adaptadas à produtividade, recuperação e conservação de solo. Porto Alegre: UFRGS, 1985. 89p. Dissertação Mestrado
- Mielniczuk, J. Desenvolvimento de sistemas de culturas adaptadas à produtividade, conservação e recuperação de solos. In: Moniz, A. (Coord.) A responsabilidade social da ciência do solo. 1988. Campinas: SBCS, 1988. p.109-116.
- Mosaddeghi, M. R.; Koolen, A. J.; Hajabbasi, M. A.; Hemmat, A.; Keller, T. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Engineering*, v.98, p.90-101, 2007.
- Pedó, F. Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo. Porto Alegre: UFRGS, 1986. 92p. Dissertação Mestrado
- Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Júnior, M. S.; Costa, K. A. P.; Castro, M. B.; Magalhães, E. N.. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.39-45, 2010.
- Schäffer, B.; Attinger, W.; Schulin, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery – Soil physical and mechanical aspects. *Soil and Tillage Research*, v.93, p.28-43, 2007.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.921-930, 2006.
- Silva, G. N.; Vidor, C. As práticas de manejo de solo na população microbiana. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.8, p.291-296, 1984.
- Silva, M. A. S.; Mafra, A. L.; Albuquerque, J. A.; Rosa, J. D.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.329-337, 2006.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. II – Grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.9-15, 2002a.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Soares, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.1-8, 2002b.
- Sweeney, D. W.; Kirkham, M. B.; Sisson, J. B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. *Agronomy Journal*, v.98, p.637-643, 2006.
- Veiga, M.; Hort, R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v.92, p.104-113, 2007.
- Villamil, M. B.; Bollero, G. A.; Darmody, R. G.; Simmons, F. W.; Bullock, D. G. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties. *Soil Science Society America Journal*, v.70, p.1936-1944, 2006.
- Yavuscan, H. G.; Vatandas, M.; Gürhan, R. Soil strength as affected by tillage system and wheel traffic in wheat-corn rotation in central Anatolia. *Journal of Terramechanics*, v.39, p.23-34, 2002.
- Yusuf, A. A.; Abaidoo, R.C.; Iwuafor, E. N. O.; Olufajo, O. O.; Sanginga, N. Rotation effects of grain legumes and fallow on maize yield, microbial biomass and chemical properties of an Alfisol in the Nigerian savanna. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.129, p.325-331, 2009.