



Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador

David P. da Rosa¹, José M. Reichert², Marcelo I. Mentges², Claudia A. P. Barros²,
Dalvan J. Reinert², Davi A. Vieira²

RESUMO

A compactação na soleira de implementos de mobilização de solo é passível de ocorrência em determinadas condições do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar se há compactação abaixo da profundidade de trabalho de um subsolador e verificar o efeito deste implemento em solo com níveis diferenciados de compactação. Os tratamentos em estudo foram semeadura direta há 13 anos e semeadura direta com compactação adicional. Coletaram-se dados de esforço horizontal (F_H), esforço de tração, (F_T) esforço vertical (F_V) e o momento associado (M_o) à haste subsoladora, resistência específica operacional, área mobilizada, área de elevação, empolamento e resistência mecânica do solo à penetração, bem como parâmetros de descrição física do solo. A compactação adicional gerou um aumento de 18,9% no F_H e no F_T . A maior influência da compactação adicional foi no F_V , onde gerou um incremento de 78,2% demonstrando que a ação da pressão da máquina é mais expressiva na direção vertical. A semeadura direta ofereceu a menor demanda de tração por área de solo mobilizada que o solo que sofreu compactação adicional. Ao invés de ocorrer compactação abaixo da camada escarificada, houve mobilização do solo pela ponteira do subsolador resultando em menor resistência mecânica à penetração dessa camada de solo.

Palavras-chave: esforços, resistência mecânica à penetração, mobilização de solo

Minimum tillage: Effects of compaction and deformation under chisel plow

ABSTRACT

Soil compaction at the depth of mobilization by tillage implements may occur under some soil conditions. The objective of this study was to verify the existence of compaction under the working depth and evaluate the effect of chisel plow in soil under determined levels of compaction. The treatments in study were 13 years of no-tillage and no-tillage with additional compaction. Horizontal force (F_H), Draught (F_T), vertical forces (F_V), and moment (M_o) associated the chisel tool, operation specific resistance, mobilized area, elevation area, swelling, soil penetration resistance, and physical properties of soil were determined. The additional compaction showed an increment of 18.9% in the horizontal force and draught. The greatest contribution of additional compaction was in vertical force, which provided an increment of 78.2%, showing that the load action is mainly in the vertical direction. No-tillage demonstrated smaller draught demand per mobilized soil area compared to additional compaction treatment. Instead of occurring compaction under the chisel action depth, there was soil mobilization, resulting in smaller soil mechanical penetration resistance in this layer.

Key words: draught, soil penetration resistance, mobilized area

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Sertão, Rodovia RS 135, Km 25, CEP: 99170-000 Sertão, RS. E-mail: david.darosa@sertao.ifrs.edu.br

² Departamento de Solos/Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: reichert@smail.ufsm.br; marcelomentges@gmail.com; dinhaufsm@gmail.com; dalvanreinert@gmail.com; agronomo.davi@gmail.com

INTRODUÇÃO

Após alguns anos, o solo sob sistema de semeadura direta tem demonstrado problemas de compactação subsuperficial, os quais se agravam pelo mínimo revolvimento do solo que é restrito à linha de semeadura, atuando em profundidades superficiais, em torno de 0,13 m quando utilizados haste sulcadora e o tráfego de máquinas em condições de elevado teor de água. No geral, a compactação é expressa pelo aumento da densidade do solo ao longo do tempo sendo que, segundo os estudos de Silveira & Stone (2003), o manejo de semeadura direta usada continuamente promove aumento da densidade do solo e da microporosidade, o que repercute na redução da macroporosidade e porosidade total do solo.

Outros aspectos envolvem o processo de compactação: o aumento no tamanho das semeadoras, repercutindo no aumento da carga da máquina ao solo cuja compactação induzida (quando em excesso) reduz a emergência de plantas (Czyz, 2004); a umidade inadequada, quando na implantação das culturas e a utilização inadequada da pressão de inflação dos pneus agrícolas (Håkansson, 2005).

Os efeitos nocivos da compactação geram redução da macroporosidade e da condutividade hidráulica de solo saturado (Suzuki et al., 2007) aumento da densidade do solo e da resistência à penetração (Stone et al., 2002; Draghi et al., 2005); aumento da energia de tração, desencadeando desvantagens, como o maior consumo de combustível e maior desgaste dos mecanismos físicos dos tratores o que, por sua vez, acarreta na redução da vida útil do trator, aumenta a depreciação e leva à redução dos lucros devido aos gastos com a manutenção das máquinas e implementos agrícolas.

Como técnica/solução tem-se a subsolagem, que promove a ruptura de camadas compactadas ou adensadas (Abu-Hamdeh, 2003; Botta et al., 2006; Nicoloso et al., 2008), facilitando a penetração das raízes das culturas, além da infiltração da água para camadas mais profundas do solo. Contudo, a geometria da ponteira subsoladora possui influência direta no formato de ruptura do solo e ainda pode gerar compactação abaixo da profundidade de trabalho. Descrevendo as ações de ferramentas estreitas ao solo, Cohron (1971) relata que, em geral, implementos que movimentam o solo tendem a gerar compactação localizada abaixo da linha mobilizada, originada pelo alto coeficiente de atrito e adesão solo-ferramenta em virtude, também, do ângulo de ataque impróprio (ângulo formado entre a ponteira e o solo).

O ângulo de ataque possui influência direta na grandeza da força vertical que atua sobre a ponteira (Godwin, 2007). O aumento deste ângulo pode contribuir para o aumento da compactação repercutindo na redução da profundidade de trabalho, visto que tal efeito possui desvantagens uma vez que, dependendo de sua grandeza, pode impedir o desenvolvimento do sistema radicular, além de diminuir a infiltração de água no solo.

Informações sobre compactação abaixo da linha de trabalho são encontradas apenas em implementos de mobilização mais agressiva ao solo, como arados e grades; contudo ocorre, no Brasil e na bibliografia internacional, carência de pesquisas sobre a compactação abaixo da linha de trabalho de subsoladores.

O aumento de informações desse gênero é fundamental para melhorar o desempenho da execução de projetos de subsoladores. Romano (2003) manifesta que a informalidade deste processo de projeto é notória em que, em geral, fabricantes de máquinas agrícolas não adotam procedimentos sistemáticos para a realização do processo de desenvolvimento do produto. O autor cita ainda que o desenvolvimento da maioria dos novos produtos é fundamentado na experiência dos responsáveis sem levar em consideração questões relevantes como, por exemplo, a variabilidade do solo de cada região e/ou esforços solicitados às máquinas agrícolas.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da compactação no trabalho de um subsolador e a existência de compactação abaixo da profundidade escarificada.

MATERIAL E MÉTODOS

As coletas foram realizadas no ano de 2006 (segundo semestre), na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 2006) de textura franco-arenosa. A área está delimitada entre as coordenadas 29° 41' 00" S e 53° 48' 00" O, com altitude de aproximadamente 95 m. O clima da região se enquadra como "Cfa" (Köppen), caracterizado por clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e temperatura do mês mais frio variando entre -3 a 18 °C.

O delineamento adotado foi bloco ao acaso, 3 blocos e parcelas de 7 x 6 m. Os tratamentos a campo foram: semeadura direta há 13 anos (SD) e semeadura direta há 13 anos com compactação adicional (SDc). Após as primeiras coletas realizou-se a subsolação na metade da parcela adicionando-se os tratamentos de cultivo mínimo (CM) e cultivo mínimo em solo anteriormente compactado (CMc), para avaliar a presença de compactação gerada pela ponteira do subsolador.

A compactação adicional foi executada com uma pá carregadora, sendo executadas 4 passadas em 2001 e mais 4 passadas em 2002. A pá carregadora foi da marca Clark-Michigan¹ 75III, com massa total de 7,736 Mg, com a concha repleta de pedra britada nº 1, para aumentar a massa no eixo frontal da máquina, garantindo uma distribuição uniforme da massa total de 10 Mg. Os pneus eram da marca Pirelli¹ (PN 14 G2/L2, 13-24 10PR), com 0,33 m de largura e 1,05 m de diâmetro. As garradeiras se encontravam desgastadas pelo uso evitando-se, assim, o cisalhamento superficial. O tráfego da parcela foi realizado de tal forma que os pneus compra área fosse compactada de forma igual. A pressão de inflação foi de 202,46 kPa, gerando uma pressão de contato pneu/solo de 315,2 kPa.

Realizou-se a subsolagem na profundidade média de 0,23 m, com um subsolador montado, trabalhando a uma velocidade de 4,3 km h⁻¹. O subsolador possui as seguintes especificações: estrutura porta-ferramenta em formato trapezoidal, com rodas niveladoras de profundidade acopladas ao chassi; uma haste em curva (45°) com ponteira estreita de 0,08 m de largura e

¹ A identificação da marca e o modelo não caracterizam endosso do autor nem das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivos

ângulo de ataque de 20°. No momento da subsolagem a área se encontrava com restos culturais de soja sob a superfície e o teor de água no solo era de 0,295 m³ m⁻³.

Para a operação agrícola utilizou-se um trator MF265¹ com 65 CV (47,80kW) de potência no motor, sem tração dianteira auxiliar (TDA), com 2,665 Mg de massa, com pneus dianteiros Goodyear¹ (7.5-16), calibrados com pressão de inflação 165,47 kPa e pneus traseiros Pirelli¹ (18.4-30) calibrados com 55,16 kPa.

Para analisar a influência da compactação do solo no trabalho do subsolador, coletaram-se informações sobre esforço horizontal (F_H), esforço vertical (F_V) e momento associado (M_O) à haste subsoladora e se calculou o esforço de tração (F_T).

Os dados de esforço foram obtidos com auxílio de um anel octogonal estendido, ligado a um módulo de aquisição de dados, pertencentes à EMBRAPA Trigo. O anel foi instalado entre uma haste subsoladora e a barra porta-ferramenta, configurado para uma taxa de aquisição de 20 amostras/segundo (20 Hz).

Outros parâmetros relacionados com a eficiência do subsolador também foram mensurados como indicadores do grau de compactação, sendo: resistência específica operacional, área mobilizada, área de elevação e empolamento do solo.

O cálculo do requerimento de força por área mobilizada, denominada resistência específica, foi obtido conforme a Eq. 1.

$$Re = \frac{F_m}{A_m} \quad (1)$$

em que:

Re - resistência específica do solo
kN m⁻²; F_m - força de tração média
kN e A_m - área média mobilizada, m²

A força de tração média foi calculada em função da força horizontal e do ângulo de ataque da ferramenta.

A área da seção transversal do solo efetivamente mobilizado (A_m) e a área de elevação (A_e) foram obtidas por meio de um perfilômetro desmontável, composto de 31 varetas (vazadas) de alumínio, equidistantes 0,015 m, com capacidade de leituras de até 1 m de desnível. Para o cálculo da A_m e A_e fez-se uso do software CAD (computer-aided design).

Para cálculo do empolamento do solo, cujo valor fornece a expansão volumétrica ocorrida na mobilização, utilizou-se a Eq. 2.

$$Emp = \left(\frac{A_e}{A_m} \right) \times 100 \quad (2)$$

em que:

Emp - empolamento do solo, %
 A_e - área de elevação, m²
 A_m - área mobilizada, m²

Com vista à avaliação da compactação abaixo da profundidade escarificada, fez-se uso dos dados de resistência

do solo à penetração (RP), macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, nas camadas de 0,23-0,25 m e 0,26-0,30 m. A RP foi medida com um penetrômetro digital marca Remik CP20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico dos dados e ponta cônica com ângulo de penetração de 30°, regulado para aquisição de dados a cada 0,015 m de profundidade.

Para determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, realizaram-se coletas no campo com cilindros de aço inoxidável medindo 0,06 m de diâmetro e 0,05 m de altura, tomando-se coletas em quatro pontos aleatórios ao longo da parcela. Em cada ponto se realizou uma coleta por camada (0,23-0,26 m e 0,26-0,30 m). No laboratório as amostras foram submetidas a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

A análise estatística para os dados de esforços constou da análise de variância e comparação de médias pelo teste t (student) a 5% e para os demais dados analisados fez-se a comparação entre médias pelo teste de Tukey a 5 e 1%, efetuadas com o software estatístico SAS (SAS, 1990), realizando-se esta análise por camada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

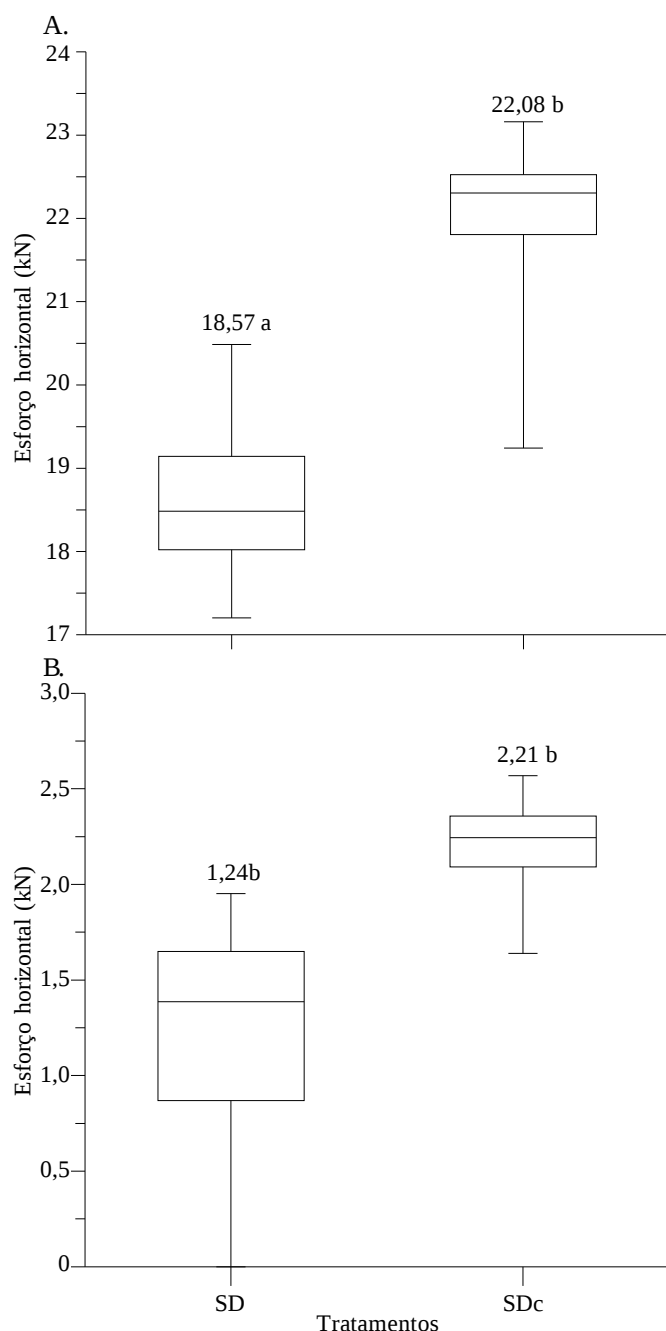
O box plot dos dados de esforços horizontal (F_H) e vertical (F_V) exigido pela haste subsoladora no solo, é apresentado na Figura 1. A compactação adicional gerou o aumento de 18,9% no F_H . O maior efeito da compactação adicional foi no F_V , que proporcionou um incremento de 78,23%. Tal fato demonstra que a ação da pressão da máquina é mais expressiva na direção vertical porém a geometria utilizada na ponteira subsoladora proporciona baixo valor de F_V comparado ao F_H .

O solo sob compactação adicional apresentou os maiores valores dos dois tipos de esforços, sejam mínimos, máximos ou médios. A compactação adicional gerou uma variação entre o quartil superior e o inferior nos esforços horizontais o que, provavelmente, pode ser atribuído ao efeito heterogêneo da compactação no solo na direção horizontal uma vez que a compactação tende a gerar camadas heterogêneas com níveis diferenciados de compactação.

No box plot, referente ao esforço vertical (Figura 1B), observa-se o elevado estado de compactação em que se encontra o solo que sofreu tráfego da pá-carregadora, em que os dados apresentaram variação bem menor entre o quartil superior e o inferior, indicando que a compactação forma uma estrutura massiva do solo, oferecendo maior resistência.

Os dados de esforço de tração e momento solicitados à haste subsoladora, área mobilizada, área de elevação, ao empolamento do solo, profundidade escarificada e resistência específica operacional nos tratamentos, estão dispostos na Tabela 1.

Com os valores de F_T maiores no solo com compactação adicional ocorreu uma elevação de 18,9%, ou seja, a mesma elevação do esforço horizontal. Os valores de esforço de tração encontrados para o solo sob semeadura direta condizem com



Obs.: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de t (Student) a 5% de probabilidade

Figura 1. A. Box plot do esforço horizontal da haste subsoladora trabalhando no solo sob semeadura direta (SD) e semeadura direta com compactação adicional (SDc). B. Box plot do esforço vertical

os valores encontrados por Machado et al. (1996), ou seja, 22,11 kN de esforço de tração exigidos pela haste subsoladora

com ponteira estreita operando em Planossolo a 3,6 km h⁻¹, com umidade gravimétrica de 0,12 m³ m⁻³.

Não se constatou diferença do momento solicitado à haste sulcadora demonstrando que o sistema de semeadura direta e a compactação induzida ao solo não geram movimento rotacional na ferramenta, corroborando com estudos de Rosa et al. (2008) em Latossolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta e cultivo mínimo e Rosa (2009).

A semeadura direta apresentou 2,5 vezes mais área mobilizada do que a semeadura direta com compactação adicional, porém nenhuma apresentou diferença na área de elevação. Esta verificação reafirma a boa estrutura desse tipo de solo sob semeadura direta visto que apresentou maior revolvimento e menor demanda de esforços enquanto o solo que sofre compactação por estar compactado ofereceu maior resistência à ruptura pela haste subsoladora. Tal fato pode ser explicado pela maneira como ocorre o movimento do solo na mobilização. Neste sentido, Godwin (2007) afirma que o movimento do solo perante a ação de ferramentas verticais estreitas ocorre de baixo para cima e, sendo assim, no solo compactado a resultante das forças internas do solo tende a ser reduzida, ocasionando menor ruptura.

O solo sob compactação adicional demandou a maior tração por área trabalhada, ou seja, maior resistência específica operacional, de vez que foi três vezes superior ao solo sob semeadura direta.

A resistência do solo à penetração na camada de 0,23-0,30m (abaixo da profundidade escarificada) é ilustrada na Figura 2.

As maiores médias de RP ocorreram no solo com compactação adicional, gerando um aumento de 33% no solo sob semeadura direta; quando se adicionou a subsolagem (CM), este aumento foi para 54%. Portanto, a subsolagem reduziu a resistência à penetração sendo que o solo SDc diferiu do solo sob CM, não diferindo dos demais. O teor de água não apresentou diferença ao longo dos tratamentos.

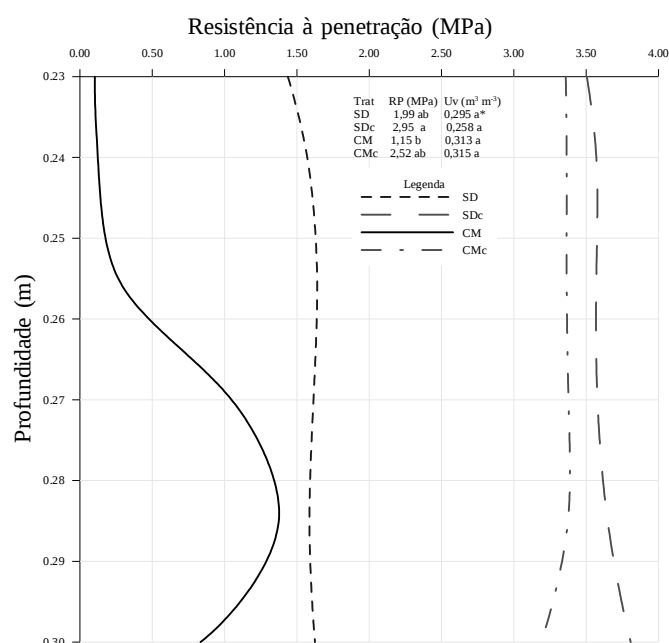
Solo com compactação adicional, independentemente do tipo de manejo, ofereceu resistência maior que 2 MPa, considerada crítica à penetração das raízes no solo (Reichert et al., 2008).

Independentemente do tipo de manejo, a adição da compactação gerou maior RP enquanto a subsolagem a reduziu notavelmente. Efeito similar foi encontrado por Collares et al. (2008) no mesmo tipo de solo e também com adição de compactação. Percebe-se que a subsolagem gera uma série de tensões de ruptura as quais são transmitidas para camadas abaixo do solo subsolado, comprovando que em solo franco-arenoso a haste não gera compactação abaixo da profundidade de trabalho contrariando as conclusões obtidas por Cohron (1971); é provável que este fato está relacionado com a umidade

Tabela 1. Área mobilizada (Am), área de elevação (Ae), empolamento (Emp), profundidade escarificada (P) e resistência específica operacional (Re) nos tratamentos em estudo

Tratamento	F _T (kN)	M ₀ (kN m)	Am	Ae	Emp (%)	P (m)	Re (kN m ⁻²)
			(m ²)	(m ²)			
Semeadura direta	18,57 a*	0,02 a	0,018 a	0,001 a	0,07 b	0,23 a	1122,73 b
Semeadura direta com compactação	22,08 b	0,02 a	0,007 b	0,001 a	0,21 a	0,15 b	3455,88 a

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de t (Student) a 5% de probabilidade



Obs.: Médias seguidas de letras diferem significativamente a nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Figura 2. Resistência à penetração do Argissolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta (SD), semeadura direta com compactação adicional (SDc), cultivo mínimo (CM) e cultivo mínimo com compactação adicional (CMc); resistência à penetração média (RP) e teor de água médio (Uv)

do solo. Em solo muito seco existe uma transmissão de tensões de ruptura para as camadas abaixo da camada mobilizada enquanto em solo úmido não há, podendo ocorrer deformação plástica. Independente da operação agrícola, a degradação dos atributos físicos do solo ocorre sempre quando há tráfego em solo com teores de água inadequados. Esta condição foi mencionada por Silva et al. (2000) e Streck et al. (2004), que encontraram maior resistência em condições mais secas na adição de tráfego ao solo.

Os dados de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) na camada 0,23-0,26 m e 0,26-0,30 m, se acham na Tabela 2.

Tabela 2. Valores da análise da variância, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds), nas camadas 0,23-0,26 m e 0,26-0,30 m

Manejo (M)	Camada 0,23-0,26 m				Camada 0,26-0,30 m			
	Ma	Mi	Pt	Ds	Ma	Mi	Pt	Ds
	(%)	(%)	(%)	(Mg m⁻³)	(%)	(%)	(%)	(Mg m⁻³)
Semeadura direta	10,16 a*	34,97 a	45,13 a	1,72 b	10,96 a	35,03 a	46,11 a	1,71 b
Semeadura direta com compactação adicional	7,35 B	34,78 a	42,12 b	1,85 a	6,61 b	35,62 a	42,24 b	1,82 a
Escarificação (E)								
Com	10,47 A	35,01 a	45,49 a	1,74 b	10,24 a	35,01 a	45,36 a	1,74 b
Sem	7,03 B	34,74 a	41,76 b	1,83 a	7,34 b	35,64 a	42,98 b	1,80 a
Teste F								
M	**	ns	**	**	**	ns	**	**
E	**	ns	**	**	**	ns	**	*
M x E	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Desvio Padrão	1,32	0,48	1,56	0,04	1,42	0,80	1,28	0,05
Coef. de Variação (%)	15,11	1,36	3,58	2,09	16,18	2,27	2,90	2,66

* Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (*) ou 1% (**) de probabilidade. ns – não significativo

Observa-se, na camada 0,23-0,26 m, que o manejo, a subsolagem e sua interação, tiveram influência na Ma e Mi. No desdobramento da interação (Tabela 3), o solo sob semeadura direta apresentou a maior Ma, independentemente da subsolagem e o solo sob semeadura direta diferiu da semeadura direta com compactação adicional, porém na linha sem subsolagem não apresentou diferença, fato que demonstra que solo sob semeadura direta se encontra sob influência do processo de compactação visto que os valores de Ma apresentados são inferiores a 10%, considerados insuficientes para o desenvolvimento radicular (Reichert et al., 2008).

Tabela 3. Macroporosidade (%) e microporosidade (%) na interação manejo x subsolagem, na camada 0,23-0,26 m

Escarificação	Manejo	
	Semeadura direta	Semeadura direta com compactação adicional
Macroporosidade (%)		
Com	13,11 Aa*	7,84 Ab
Sem	7,21 Ba	6,85 Aa
Microporosidade (%)		
Com	34,37 Bb	35,66 Aa
Sem	35,57 Aa	33,91 Bb

* Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade

Com a subsolagem o solo aumentou a Ma (Tabela 3) e reduziu a Ds (Tabela 2), sendo tal fato mais expressivo na semeadura direta, confirmando a conclusão obtida nos dados de área mobilizada de que o solo sob compactação oferece menor transmissão de tensões de ruptura em sua estrutura. Esses dados também demonstram que o subsolador não gera compactação abaixo da linha de trabalho haja vista que, ao se adicionar a subsolagem, teve-se um aumento da Ma e redução da Ds em ambas as camadas em estudo. Efeito benéfico da subsolagem também foi encontrado por Secco & Reinert (1997), em que o solo escarificado proporcionou elevada porosidade total e baixa rugosidade superficial. Já Tormena et al. (2002) encontraram, em Latossolo Vermelho, baixa densidade do solo e resistência à penetração quando comparado ao plantio direto.

Embora tenha havido redução da densidade pelo subsolador cuidados devem ser levados em consideração com essa propriedade pois, segundo Lima et al. (2007), quando a RP está em torno de 1,5 MPa, a densidade não pode ser inferior a 1,32 Mg m⁻³ nem superior a 1,69 Mg m⁻³ de vez que se torna restritiva ao desenvolvimento da planta; no presente estudo a densidade foi superior a 1,70 Mg m⁻³, o que causará redução da expansão radicular.

CONCLUSÕES

1. O tráfego de máquinas de 315,2 kPa de pressão no solo franco-arenoso em semeadura direta, reduz a macroporosidade a níveis críticos ao desenvolvimento do sistema radicular (<10%), aumentando a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração, que ultrapassa os 2 MPa.

2. A subsolagem gera inversão das condições físicas do solo abaixo da camada trabalhada em Argissolo Vermelho-Amarelo, aumenta a macroporosidade e reduz a densidade e a resistência do solo à penetração.

3. Pressão de 315,2 kPa ao solo gera maior resistência à ruptura, maior demanda de tração, redução da área mobilizada pelo subsolador e aumento do empolamento do Argissolo Vermelho-Amarelo.

AGRADECIMENTO

À EMBRAPA Trigo, pelo empréstimo do anel octogonal.

LITERATURA CITADA

- Abu-Hamdeh, N. H. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Science Society of American Journal*, v.67, p.1213-1219, 2003.
- Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Ressia, M. Ferrero, C.; Rosatto, H.; Tourn, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil & Tillage Research*, v.91, p.164-172, 2006.
- Cohron, G. T. Force's causing soil compaction. In: Barnes, K. K.; Carleton, W. M.; Taylor, H. M.; Throckmorton, R. I.; Vanden Berg, G. E. Compaction of agricultural soils. Michigan: ASAE, 1971. p.106-124.
- Colares, G. L.; Reinert, D. J.; Recheirt, J. M.; Kaiser, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.933-942, 2008.
- Czyz, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil & Tillage Research*, v.79, p.153-166, 2004.
- Draghi, L. M.; Botta, G. F.; Balbuena, R. H.; Claverie, J. A.; Rosatto, H. Diferencias de las condiciones mecánicas de un suelo arcilloso sometido a diferentes sistemas de labranza. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.9, p.120-124, 2005.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA. 2006. 412p.
- Godwin, R. J. A review of the effect of implements geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research*, v.97, p.331-340, 2007.
- Håkansson, I. Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures. Uppsala, Sweden: Department of Soil Sciences, Division of Soil Management. 2005. 153p.
- Lima, C. L. R. de.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Suzuki, L. E. A. S.; Dalbiano, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ciência Rural*, v.37, p.1166-1169, 2007.
- Machado, R. L. T.; Machado, A. L. T.; Turatti, A. L.; Reis, A. V. dos; Alonço, A. dos S. Avaliação do desempenho de escarificador em Planossolo. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.2, p.151-154, 1996.
- Nicoloso, R. da S.; Amado, T. J. C.; Schneider, S.; Lanzanova, M. E.; Girardello, V. C.; Bragagnolo, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.32, p. 1723-1734, 2008.
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C. A.; Silva, L. S.; Reichert, J. M. (Org.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.49-134. 2008.
- Romano, L. N. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. Florianópolis: UFSC, 2003. 321p. Tese Doutorado.
- Rosa, D. P. da. Relação solo-máquina-planta num Argissolo cultivado e sob campo nativo. Santa Maria: UFSM, 2009. 109p. Tese Doutorado.
- Rosa, D. P. da; Reichert, J. M.; Sattler, A.; Reinert, D. J.; Mentges, M. I.; Vieira, D. A. Esforços e mobilização provocada pela haste sulcadora de semeadora, em Latossolo escarificado em diferentes épocas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.396-400, 2008.
- SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guide. Version G. 4 ed. Cary: NC; SAS Institute Inc., 1990.
- Secco, D.; Reinert, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho escuro sob plantio direto. *Engenharia Agrícola*, v.16, p.52-61, 1997.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural*, v.30, p.795-801, 2000.
- Silveira, P. M.; Stone, L. F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v.7, p.240-244, 2003.

- Stone, L. F.; Guimarães, C. M.; Moreira, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.207-212, 2002.
- Streck, C. A.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Kaiser, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, v.34, p.755-760, 2004.
- Suzuki, L. E. A. S.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Lima, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.1159-1167, 2007.
- Tormena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S. Da; Gonçalves, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agrícola*, v.59, p.795-801, 2002.