



**UFSM**

**TESE DE DOUTORADO**

**MATÉRIA ORGÂNICA E RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE  
DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**

---

**João Alfredo Braidá**

**PPGCS**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2004**

**MATÉRIA ORGÂNICA E RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE  
DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**

---

por

**João Alfredo Braidá**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

**Doutor em Ciência do Solo**

**PPGCS**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2004**

Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**MATÉRIA ORGÂNICA E RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE  
DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**

elaborada por  
**João Alfredo Braidá**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

José Miguel Reichert  
(Presidente/Orientador)

---

Carlos Ricardo Trein

---

Dalvan José Reinert

---

José Mario Doleys Soares

---

Vilson Antônio Klein

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004

***“... vamos embora para a cidade,  
lá os guris poderão estudar ...”***

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Sidiney Antônio Braidá e Catharina  
Bech Braidá, que um dia decidiram  
mudar suas vidas porque acreditavam  
que o conhecimento poderia mudar a  
vida de seus filhos.*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria que, através do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Solos e do Laboratório de Materiais de Construção Civil, possibilitou a realização do curso de doutorado e deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, especialmente aos colegas da Coordenação de Agronomia, que possibilitou o tempo necessário para a realização do curso e do trabalho de pesquisa aqui relatado.

À CAPES, ao CNPq e à FAPERGS que financiaram a execução do projeto de pesquisa que resultou neste trabalho.

Ao professor José Miguel Reichert que, além de orientador, foi um companheiro nessa jornada de descobertas e aprendizados pela ciência do solo.

Aos professores Dalvan José Reinert e José Mário Doleys Soares, pelas sugestões e discussões na realização do trabalho e na análise dos dados.

Aos colegas Milton da Veiga e Sandro Giacomini, pela cessão dos experimentos sob suas responsabilidades para a coleta do material de solo empregado nos diversos ensaios realizados.

A todos aqueles que contribuíram na realização dos trabalhos de campo e de laboratório, especialmente ao Flávio Fontinelli e aos bolsistas de iniciação científica Letícia Sequinatto, Douglas R. Kaiser, Marcelo Kunz e João Pellegrini.

Aos colegas de curso, especialmente ao Gilberto L. Collares, Vanderlei R. da Silva, Silvio A. Genro, Deonir Secco, Jorge L. Mattias e Mirta Petry, cuja amizade tornou mais fácil suportar a agruras dessa jornada e a distância da família.

A minha esposa e ao meu filho, Ana Célia e Rafael, porque, simplesmente, estiveram ao meu lado, fazendo valer todo o esforço despendido nessa jornada.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VI
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
Hipótese de trabalho .....	2
Objetivos .....	3
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
ESTUDO I. “RELAÇÕES DA QUANTIDADE DE PALHA NA SUPERFÍCIE E DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM A DENSIDADE MÁXIMA OBTIDA NO ENSAIO PROCTOR” .....	13
Introdução.....	13
Material e Métodos.....	17
Resultados e Discussão .....	21
Densidade máxima e umidade crítica em função do teor de CO. ....	21
Densidade do solo em função da quantidade de palha existente na superfície do solo.....	28
Conclusões.....	32
ESTUDO II. “COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO AFETADAS POR ALTERAÇÕES NO TEOR DE CARBONO ORGÂNICO.”.....	33
Introdução.....	33
Material e Métodos.....	37
Resultados e Discussão .....	41
Pressão de pré-consolidação .....	43
Compressibilidade do solo .....	49
Elasticidade do solo.....	58
Conclusões.....	64
ESTUDO III. “PARÂMETROS DO CISALHAMENTO E TEOR DE CARBONO ORGÂNICO DE UM NITOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO E DE UM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO ARÊNICO”.....	66
Introdução.....	66
Material e Métodos.....	68
Resultados e Discussão .....	71
Conclusões.....	86

CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
BIBLIOGRAFIA CITADA.....	91
ANEXOS.....	97

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Distribuição das pressões nas fases sólida, líquida e gasosa quando um corpo de solo não saturado é submetido a uma carga normal (Caputo, 1981). ..... 4
- Figura 2. Curva de compactação de duas amostras de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com diferentes teores de carbono orgânico (CO).22
- Figura 3. Densidade máxima ( $D_{s_{max}}$ ) obtida com o ensaio Proctor Normal como função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b). ..... 23
- Figura 4. Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e umidade crítica para compactação ( $U_{g_c}$ ) como função do teor de carbono orgânico, em um Nitossolo Vermelho distrófico..... 24
- Figura 5. Limite de liquidez (LL) e umidade crítica para compactação ( $U_{g_c}$ ) como função do teor de carbono orgânico, em um Argissolo Vermelho Amarelo arênico..... 25
- Figura 6. Razão entre umidade crítica para compactação ( $U_{g_c}$ ) e limite de plasticidade (LP), em função do teor de carbono orgânico do solo, para um Nitossolo Vermelho distrófico. .... 28
- Figura 7. Densidade do solo em função da energia de compactação utilizada no ensaio Proctor, para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com umidade de  $0,05 \text{ g g}^{-1}$ . ..... 29
- Figura 8. Densidade do solo em função da energia de compactação e da quantidade de palha na superfície do solo, determinada através do ensaio Proctor para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com umidade de  $0,05 \text{ g g}^{-1}$ . ..... 30
- Figura 9. Exemplo de curva de compressão com indicações da reta virgem, da reta de descompressão e do cálculo do índice de relaxação ( $I_r$ ). .... 40
- Figura 10. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo. .... 43
- Figura 11. Pressão de pré-consolidação como função do grau de saturação inicial do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo..... 45
- Figura 12. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica de um Nitossolo Vermelho distrófico, para diferentes classes de teor de carbono orgânico (CO) e de densidade do solo ( $D_s$ ): a)  $D_s < 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  e b)  $D_s > 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ . ..... 46
- Figura 13. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, para diferentes classes

- de teor de carbono orgânico (CO) e de densidade do solo (Ds): a)  $D_s < 1,3 \text{ Mg m}^{-3}$  e b)  $D_s > 1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ ..... 47
- Figura 14. Densidade do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico e um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. .... 48
- Figura 15. Coeficiente de compressibilidade como função da umidade gravimétrica do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo. .... 50
- Figura 16. Coeficiente de compressibilidade em função do teor de carbono orgânico e da densidade do solo, de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a quatro tensões de água: a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d)  $> 500 \text{ kPa}$ ..... 51
- Figura 17. Umidade gravimétrica do solo em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d)  $> 500 \text{ kPa}$ . .... 53
- Figura 18. Coeficiente de compressibilidade do solo em função da densidade de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d)  $> 500 \text{ kPa}$ ..... 54
- Figura 19. Densidade do solo em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d)  $> 500 \text{ kPa}$ . .... 55
- Figura 20. Coeficiente de compressibilidade como função do teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ )..... 56
- Figura 21. Coeficiente de compressibilidade em função do teor de carbono orgânico e da densidade do solo, de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a quatro tensões de água: a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d)  $> 500 \text{ kPa}$ ..... 57
- Figura 22. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) de um Nitossolo, em função da densidade e do grau de saturação do solo. .... 60
- Figura 23. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) de um Argissolo, em função da densidade e do grau de saturação do solo. .... 60
- Figura 24. Redução da densidade do solo (Rebound) após o descarregamento em função do grau de saturação de um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b), para duas classes de densidade. .... 61
- Figura 25. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ )..... 62

- Figura 26. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) em função do teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ ). ..... 62
- Figura 27. Redução da densidade após o descarregamento do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b) submetidos a 4 tensões de água ( $\psi$ )..... 63
- Figura 28. Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 3 tensões de água ( $\psi$ ). ..... 72
- Figura 29. Envoltória de resistência ao cisalhamento de um Nitossolo Vermelho distrófico, em amostras com estrutura preservada (a) e em amostras de agregados de diferentes classes de tamanho: b) < 0,25 mm; c) 0,25 a 0,50 mm; d) 0,50 a 1,00 mm; e) 1,00 a 2,00 mm; e f) 2,00 a 4,00 mm. .... 74
- Figura 30. Imagens da superfície de ruptura de amostras de agregados submetidas ao ensaio de cisalhamento direto com cargas de 25, 75, 300, 450 e 750 kPa (Escala aproximada 1:1). ..... 75
- Figura 31. Ângulo de atrito interno de um Nitossolo Vermelho distrófico em função da umidade gravimétrica (a) e do grau de saturação do solo (b)..... 78
- Figura 32. Ângulo de atrito interno de um Nitossolo Vermelho distrófico em função do teor de carbono orgânico..... 79
- Figura 33. Umidade gravimétrica (a) e grau de saturação (b) do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes tensões de água..... 80
- Figura 34. Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 3 tensões de água ( $\psi$ )..... 81
- Figura 35. Ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa, em função da umidade gravimétrica (a) e do grau de saturação (b). ..... 82
- Figura 36. Ângulo de atrito interno de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, em função do teor de carbono orgânico em amostras submetidas a 3 tensões de água ( $\psi$ )..... 83
- Figura 37. Densidade do solo (a) e umidade gravimétrica (b) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, em função do teor de carbono orgânico. .... 84
- Figura 38. Coesão do solo em função da umidade gravimétrica e do grau de saturação de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. .... 85

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Granulometria, densidade de partículas, densidade do solo e teor de carbono orgânico da camada superficial (0 a 5 cm) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico. 17
- Tabela 2. Valores médios da densidade máxima ( $D_{s_{max}}$ ), umidade crítica ( $U_{g_c}$ ), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e teor de carbono orgânico (CO) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico. .... 25
- Tabela 3. Densidade do solo ( $D_s$ ), energia equivalente ( $E_e$ ) e energia dissipada ( $E_{di}$ ) em função da energia de compactação ( $E_c$ ) e da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio Proctor (médias de três repetições). .... 31
- Tabela 4: Carbono orgânico (CO), densidade do solo ( $D_s$ ), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), índice de vazios ( $e$ ), grau de saturação ( $G_s$ ), pressão de pré-consolidação ( $s_p$ ), coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ), índice de relaxação ( $I_r$ ) e coeficiente de descompressão ( $C_d$ ) de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, em função da tensão de água da amostra. .... 42
- Tabela 5. Número de amostras ( $n$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), pressão de pré-consolidação ( $s_p$ ), parâmetros  $j$  e  $k$  e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da equação [11], para diferentes classes de  $D_s$  e de teor de CO de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. 48
- Tabela 6. Densidade do solo média ( $D_s$ ), teor de carbono orgânico médio (CO) e coeficiente de compressibilidade médio ( $C_c$ ) em função da classe de densidade, para um Nitossolo Vermelho distrófico e um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. .... 57
- Tabela 7. Valores médios da redução da densidade e do teor de carbono orgânico e valores dos parâmetros e do coeficiente de determinação da Equação [12] em função da tensão de água no solo, para amostras de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. .... 64
- Tabela 8. Densidade do solo ( $D_s$ ), teor de carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), grau de saturação ( $G_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) de um Nitossolo Vermelho distrófico, em função da tensão de água nas amostras (médias de 11 repetições). .... 72
- Tabela 9. Coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) inter e intraagregados e resistência dos agregados ( $R$ ) de um Nitossolo Vermelho distrófico, determinados a partir de amostras com estrutura não deformada e de agregados de 5 classes de tamanho. .... 76

Tabela 10. Densidade do solo (Ds), teor de carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica (Ug), grau de saturação (Gs), porosidade total (Pt), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão (c) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa, em função da tensão de água nas amostras (médias de 10 repetições). ..... 82

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Teor de carbono orgânico (CO), densidade máxima ( $D_{S_{max}}$ ), umidade gravimétrica crítica ( $U_{g_c}$ ), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez do Nitossolo Vermelho distrófico..... 98
- Anexo B. Teor de carbono orgânico (CO), densidade máxima ( $D_{S_{max}}$ ), umidade gravimétrica crítica ( $U_{g_c}$ ) e limite de liquidez do Argissolo Vermelho amarelo arênico de textura franco arenosa..... 99
- Anexo C. Teor de carbono orgânico (CO), densidade inicial ( $D_{si}$ ), índice de vazios inicial ( $e_i$ ), umidade gravimétrica inicial ( $U_{gi}$ ), porosidade total inicial ( $P_{ti}$ ), grau de saturação inicial ( $G_{si}$ ), coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), coeficiente de descompressão ( $C_d$ ), índice de relaxação ( $I_r$ ) e redução da densidade após a remoção das cargas ( $R_e$ ) de amostras de um Nitossolo Vermelho distrófico submetidas ao ensaio de adensamento uniaxial..... 100
- Anexo D. Teor de carbono orgânico (CO), densidade inicial ( $D_{si}$ ), índice de vazios inicial ( $e_i$ ), umidade gravimétrica inicial ( $U_{gi}$ ), porosidade total inicial ( $P_{ti}$ ), grau de saturação inicial ( $G_{si}$ ), coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), coeficiente de descompressão ( $C_d$ ), índice de relaxação ( $I_r$ ) e redução da densidade após a remoção das cargas ( $R_e$ ) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa. .... 104
- Anexo E. Teor de carbono orgânico (CO), densidade do solo ( $D_s$ ), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), porosidade total ( $P_t$ ), coeficiente de atrito ( $tg \phi$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) de um Nitossolo Vermelho distrófico. .... 106
- Anexo F. Teor de carbono orgânico (CO), densidade do solo ( $D_s$ ), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), porosidade total ( $P_t$ ), coeficiente de atrito ( $tg \phi$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico..... 107

**LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

$A$	Área total.
$a$	Parâmetro de ajuste da equação [8].
$A_{ag}$	Área da fase líquida solo.
$a_c$	Área de contato entre partículas do solo.
$A_g$	Área da fase gasosa do solo.
$A_s$	Área da fase sólida do solo.
$ASE$	Área superficial específica
$b$	Parâmetro de ajuste da equação [8].
$c$	Coesão do solo.
$C_c$	Coeficiente de compressibilidade do solo.
$C_d$	Coeficiente de descompressão do solo.
$CO$	Carbono orgânico.
$CTC$	Capacidade de troca de cátions.
$DMS$	Diferença mínima significativa.
$D_s$	Densidade do solo.
$D_{s_{max}}$	Densidade do solo máxima.
$e$	Índice de vazios do solo.
$E_c$	Energia de compactação.
$E_{di}$	Energia dissipada.
$E_e$	Energia equivalente.
$f$	Parâmetro de ajuste da equação [10].
$g$	Parâmetro de ajuste da equação [10].
$G_s$	Grau de saturação do solo.
$h$	Parâmetro de ajuste da equação [10].
$i$	Parâmetro de ajuste da equação [11].
$I_r$	Índice de relaxação.
$j$	Parâmetro de ajuste da equação [11].
$k$	Parâmetro de ajuste da equação [12].
$l$	Parâmetro de ajuste da equação [12].

<i>LL</i>	Limite de liquidez.
<i>LP</i>	Limite de plasticidade.
<i>MO</i>	Matéria orgânica do solo
<i>N</i>	Número de golpes no aparelho de Casagrande.
<i>n</i>	Número de amostras.
<i>P</i>	Força total normal no ponto de contato entre duas partículas de solo.
<i>P<sub>ag</sub></i>	Força atuante sobre a fase líquida do solo.
<i>P<sub>c</sub></i>	Pressão capilar de confinamento.
<i>P<sub>g</sub></i>	Força atuante sobre a fase gasosa do solo.
<i>P<sub>s</sub></i>	Força atuante sobre a fase sólida do solo.
<i>PT</i>	Porosidade total do solo.
<i>Re</i>	Redução da densidade do solo após a remoção do carregamento.
<i>T<sub>g</sub></i>	Tangente.
<i>T<sub>s</sub></i>	Tensão superficial da água.
<i>U<sub>g</sub></i>	Umidade gravimétrica do solo.
<i>U<sub>gc</sub></i>	Umidade crítica de compactação.
<i>De<sub>c</sub></i>	Varição do índice de vazios durante o carregamento do solo.
<i>De<sub>d</sub></i>	Varição do índice de vazios durante o descarregamento do solo.
<i>c</i>	Coeficiente de resistência proporcional ao grau de saturação do solo.
<i>f</i>	Ângulo de atrito interno do solo.
<i>r</i>	Curvatura do menisco de água.
<i>s</i>	Pressão normal.
<i>s'</i>	Pressão efetiva
<i>s<sub>p</sub></i>	Pressão de pré-consolidação.
<i>t</i>	Tensão de cisalhamento.
<i>y</i>	Tensão de água no solo.

## **RESUMO**

Tese de doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### **MATÉRIA ORGÂNICA E RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**

Autor: João Alfredo Braida

Orientador: José Miguel Reichert

Local e data da defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

O plantio direto permite a manutenção de uma camada de resíduos vegetais na superfície do solo, com um enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica (MO). Essas características do sistema podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências, uma vez que os resíduos vegetais na superfície podem atenuar as pressões produzidas por máquinas ou animais, que transitam sobre o solo, e que o aumento do teor de MO pode aumentar a resistência mecânica do solo. Para avaliar essa hipótese foram realizados 3 estudos, utilizando amostras coletadas na camada superficial em um Nitossolo Vermelho distrófico e em um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. O primeiro estudo envolveu o uso do ensaio Proctor para avaliar a relação entre o teor de MO e a umidade crítica para compactação do solo. Avaliou-se, ainda, a capacidade da palha existente sobre o solo em absorver a energia de compactação empregada no ensaio Proctor. No segundo estudo, amostras com estrutura indeformada, coletadas em anéis metálicos, foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, avaliando-se as relações entre o teor de MO e a compressibilidade e a

elasticidade do solo. No terceiro estudo, amostras com estrutura indeformada foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, buscando-se determinar possíveis efeitos da MO sobre os parâmetros do cisalhamento do solo. O acúmulo de MO reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação dos dois solos. Os resíduos vegetais na superfície do solo produziram dissipação de parte da energia de compactação empregada, com redução da densidade obtida com o ensaio Proctor. O acúmulo de MO aumentou a compressibilidade no Argissolo, mas no Nitossolo esse efeito foi dependente da densidade das amostras, sendo que em densidades maiores que  $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  houve tendência de redução da compressibilidade e para densidades menores essa aumentou com o aumento do teor de MO. Para os dois solos, observou-se um aumento da elasticidade associado ao aumento do teor de MO do solo. O aumento do teor de MO nos dois solos, diminuiu significativamente o ângulo de atrito interno, mas não afetou a coesão determinada pelo ensaio de cisalhamento direto.

## **ABSTRACT**

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SOIL ORGANIC MATTER AND SURFACE MULCH AND RELATIONS WITH SOIL MECHANICAL BEHAVIOR UNDER NO-TILLAGE.**

Author: João Alfredo Braidá

Adviser: José Miguel Reichert

Place and Date: Santa Maria, February 27, 2004.

No-tillage allows the presence of a mulch layer on the soil surface, with enrichment in organic matter (SOM) of the soil surface layer. These characteristics of the no-tillage system may be maximized in order to reduce soil compaction and its effects, since mulch on soil surface might attenuate pressure produced by machinery and animals traffic on the soil, while an increase in SOC might increase the soil mechanical resistance. To evaluate this hypothesis three studies were conducted, with samples collected in the soil surface layer of “Nitossolo Vermelho distrófico” (Oxisol) and “Argissolo Vermelho Amarelo arênico” (Hapludalf). A first study consisted in using the Proctor test to evaluate the relationship between SOM and critical water content for soil compaction. Additionally, the ability of mulch to absorb the compactive energy from Proctor test was evaluated. In the second study, undisturbed soil samples were submitted to uniaxial compression in order to evaluate the relationship among SOM, compressibility and elasticity. Direct shearing trials were performed, in the third study, to determine the effects of SOM on shearing parameters. SOM reduced maximum bulk density and increased critical water

content for compaction of both soils. Surface mulch dissipated part of the energy applied on the soil, with a decrease in bulk density in the Proctor test. SOM accumulation increased compressibility for the Hapludalf, but for the Oxisol this effect was dependent upon the soil bulk density; for density greater than  $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  compressibility was decreased and for lower bulk density compressibility increased with increase in SOM. For both soils, soil elasticity increased when SOM increased. SOM buildup in both soils reduced internal friction angle, but did not affect cohesion.

## INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo é um problema comumente observado em lavouras em que foi adotado o sistema de plantio direto, especialmente aquelas em solos argilosos. Sua origem está relacionada à eliminação do revolvimento do solo nesse sistema de manejo, o que permite um acúmulo do efeito das pressões produzidas pelo trânsito de máquinas agrícolas e/ou de animais, que compactam o solo. Dessa forma, a compactação do solo é um processo inerente ao sistema e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade.

Solos compactados caracterizam-se por apresentar uma diminuição do espaço poroso, com implicações sobre a movimentação de água e de gases no seu interior e na resistência que oferecem ao crescimento das raízes das plantas. Em geral, observa-se uma redução da taxa de infiltração de água no solo e uma diminuição na quantidade de água disponível às plantas. Além disso, em períodos de chuvas intensas pode haver dificuldades nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, em períodos secos, dificuldades para a penetração de raízes.

Historicamente, a adoção do sistema de plantio direto ocorreu, geralmente, depois que o solo já apresentava problemas, especialmente de degradação estrutural e redução do teor de matéria orgânica. Nessas condições, a acomodação natural das partículas desestruturadas, associada à falta de matéria orgânica e de resíduos vegetais na superfície do solo e ao tráfego de máquinas e animais resulta, certamente, em compactação em níveis prejudiciais às plantas.

Entretanto, o sistema de plantio direto possui propriedades que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Entre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos orgânicos, que formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica. Esses materiais orgânicos podem

atuar de duas formas na atenuação do processo de compactação ou seus efeitos: primeiro, quando na superfície do solo, por dissiparem parte da pressão exercida pelas rodas das máquinas e/ou patas de animais; segundo, quando incorporados à matéria orgânica do solo, por aumentarem sua elasticidade e resistência à compactação e por aumentarem os limites de umidade em que o mesmo pode ser trabalhado mecanicamente.

Assim, acredita-se ser possível manter o sistema de plantio direto ao longo dos anos, sem que o solo venha a apresentar limitações ao desenvolvimento das plantas provocadas pela compactação excessiva. Para isso, no entanto, é preciso que o sistema seja conduzido de forma tal que permita a manutenção de uma camada de resíduos vegetais na superfície do solo desde sua implantação. Dessa forma, naturalmente se tem uma elevação do teor de carbono orgânico no solo e, conseqüentemente, se pode desfrutar dos possíveis benefícios listados anteriormente.

### **Hipótese de trabalho**

O acúmulo superficial de resíduos vegetais e o enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica podem ser usados como estratégias para reduzir os efeitos daninhos, ao solo, do tráfego de máquinas e do pisoteio animal, no sistema de plantio direto. Essa hipótese sustenta-se nas seguintes pressuposições:

1. o aumento no teor de matéria orgânica do solo resulta em maior intervalo de umidade adequada para o trabalho mecânico do solo;
2. o enriquecimento com matéria orgânica altera, beneficamente, as propriedades mecânicas do solo;
3. incrementos de matéria orgânica do solo resultam em aumento na coesão entre as partículas do solo;

4. os resíduos vegetais na superfície do solo absorvem parte das pressões exercidas sobre o mesmo, com redução de sua deformação.

## **Objetivos**

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar as alterações no comportamento mecânico do solo produzidas pelo enriquecimento do conteúdo de matéria orgânica e, ainda, a capacidade dos resíduos vegetais acumulados na superfície do solo dissiparem cargas aplicadas sobre o mesmo. Para tanto, buscou-se avaliar:

1. as relações entre teor de matéria orgânica do solo e a umidade crítica para a compactação do mesmo;
2. as relações entre o teor de matéria orgânica e a compressibilidade e a elasticidade do solo;
3. as relações entre o teor de matéria orgânica e os parâmetros de cisalhamento do solo;
4. as relações entre quantidade de resíduos vegetais na superfície e a densidade do solo obtida pelo teste Proctor.

Para alcançar tais objetivos foram desenvolvidos três estudos que serão relatados neste trabalho. O primeiro estudo envolveu o uso do ensaio Proctor, buscando os objetivos 1 e 4; o segundo estudo baseou-se na realização de ensaios de adensamento uniaxial, visando o objetivo número 2 e, finalmente, o terceiro estudo constituiu-se de ensaios de cisalhamento direto, com vistas ao objetivo número 3.

No próximo capítulo, será apresentada uma breve fundamentação teórica das hipóteses deste trabalho e, em seqüência, os três estudos. No último capítulo deste trabalho, são feitas algumas considerações finais sobre os resultados encontrados e as hipóteses em estudos e, ainda, projeções para estudos futuros.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Quando uma massa de solo, não saturada, é submetida à aplicação de um carregamento superficial, em seu interior resultam pressões que atuam em suas fases sólida, líquida e gasosa. A distribuição dessas pressões nas três fases do solo pode ser representada esquematicamente como na Figura 1 (Caputo, 1981).

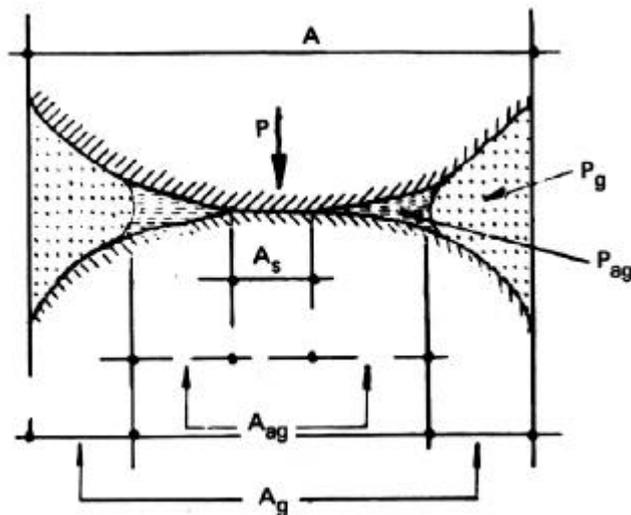


Figura 1. Distribuição das pressões nas fases sólida, líquida e gasosa quando um corpo de solo não saturado é submetido a uma carga normal (Caputo, 1981).

Admitindo-se que  $P$  seja a força resultante total normal ao plano de contato entre duas partículas do solo, a partir das indicações da Figura 1 é possível deduzir que:

$$P = P_s A_s + P_{ag} A_{ag} + P_g A_g \quad [1]$$

ou, ainda:

$$\frac{P}{A} = P_s \frac{A_s}{A} + P_{ag} \frac{A_{ag}}{A} + P_g \frac{A_g}{A} \quad [2]$$

onde:

$P$  = força total normal no ponto de contato;

$P_s$  = força atuante sobre a fase sólida;

$A_s$  = área da fase sólida;

$P_{ag}$  = força atuante sobre a fase líquida;

$A_{ag}$  = área da fase líquida;

$P_g$  = força atuante sobre a fase gasosa;

$A_g$  = área da fase gasosa; e,

$A$  = área total.

Assumindo-se que  $\frac{P}{A} = s$ ,  $\frac{A_s}{A} = a$  e  $\frac{A_{ag}}{A} = c$ , reordenando-se os

termos, obtemos:

$$s = aP_s + (1-a)P_g - c(P_g - P_{ag}) \quad [3]$$

Considerando que  $a$  é muito pequeno, portanto  $(1-a) \approx 1$ , e que, ao contrário,  $P_s$  é muito elevada; e, fazendo-se  $aP_s = s'$  (pressão efetiva), podemos reescrever:

$$s' = s - P_g + c(P_g - P_{ag}) \quad [4]$$

onde:

$s'$  = pressão efetiva no ponto de contato;

$s$  = pressão normal ao plano de contato;

$P_g$  = força atuante sobre o ar

$c$  = coeficiente de resistência proporcional ao grau de saturação do solo, sendo igual a um quando o solo estiver saturado e igual a zero, quando o solo estiver seco;

$P_{ag}$  = força no menisco de água.

A equação [4] é a representação matemática do princípio das pressões efetivas, proposto por Terzaghi e generalizado para solos não saturados por Bishop (1959).

Para solos arenosos, pouco compressíveis e não agregados o coeficiente  $\chi$  pode ser calculado pela equação (Horn & Lebert, 1994):

$$c = 0,22 + 0,7(GS) \quad [5]$$

onde:

$GS$  = grau de saturação do solo.

Já para solos argilosos e siltsos, os valores dos coeficientes da equação [4] dependem, principalmente, da agregação, da resistência do solo e de suas propriedades hidráulicas.

A compressão (e a deformação resultante) do solo, durante um carregamento, ocorre quando a pressão efetiva, resultante da aplicação da carga normal sobre o mesmo, supera a resistência ao cisalhamento nos pontos de contato entre as partículas, provocando sua ruptura.

A resistência ao cisalhamento é o somatório do atrito existente entre as partículas e das forças coesivas existentes entre elas, sendo expressa pela clássica equação de Coulomb (Caputo, 1981):

$$t = c + stgf \quad [6]$$

onde:

$t$  = tensão de cisalhamento;

$c$  = coesão do solo;

$s$  = carga normal ao plano de cisalhamento;

$f$  = ângulo de atrito interno, sendo  $tgf$  o coeficiente de atrito.

Com base na equação [6], podemos afirmar que somente haverá deformação do solo, de características  $c$  e  $f$ , quando, nos pontos de contatos ao longo da superfície de ruptura, a pressão resultante da aplicação da carga normal superar a resistência ao cisalhamento, dada pelas características do mesmo. Portanto, para conhecermos a resistência ao cisalhamento de um solo, devemos compreender seus componentes, ou seja, a coesão e o ângulo de atrito interno do mesmo.

O atrito entre sólidos está fundamentalmente ligado ao conceito de movimento, pois o atrito surge somente quando se verifica tendência ao movimento. Considerando que só há movimento a partir da ação de uma força, pode-se entender o atrito como uma força resistente que se opõe à força provocadora do movimento (Fiori & Carmignani, 2001). O atrito é expresso através do coeficiente de atrito, que é a tangente do ângulo que relaciona a força normal e as forças resultantes que promovem o movimento de um corpo. Esse ângulo, no caso do cisalhamento dos solos, é conhecido como ângulo de atrito interno, pois estamos falando do atrito entre duas partes do solo.

Nos materiais granulares, como o solo, o atrito é um misto de escorregamento (deslizamento) e de rolamento dos grãos, afetado fundamentalmente pelo entrosamento ou imbricamento dos mesmos (Pinheiro & Soares, 2000). Assim, no caso dos solos, o ângulo de atrito interno é determinado pela dureza, forma, tamanho, rugosidade superficial e grau de empacotamento de suas partículas. De maneira geral, solos arenosos apresentam ângulo de atrito interno superior aos solos argilosos. No entanto, quando solos argilosos formam agregados é possível que, se as cargas normais empregadas são menores que a resistência desses agregados, o ângulo de atrito interno seja tão elevado quando o de solos arenosos, pois nesse caso ele se refere ao atrito entre os agregados (Lebert & Horn, 1991) que possuem forma, rugosidade e tamanho semelhante aos grãos de areia. Quando se aplicam tensões normais mais elevadas que a resistência dos agregados, esses se rompem e o ângulo de atrito interno passa a ser determinado pelas características das partículas primárias do solo, sendo geralmente menor do que aqueles determinados pelos agregados.

O ângulo de atrito interno é dependente, ainda, da densidade e do teor de água do solo. A densidade afeta o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, ou seja, o número de pontos de contato entre as mesmas, sendo que para um mesmo material o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade. A água afeta o ângulo de atrito interno por constituir-se em um agente lubrificante entre as partículas

sólidas. A adição de água ao solo resulta na formação de filmes de moléculas de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas.

Portanto, o efeito da matéria orgânica sobre o ângulo de atrito interno dos solos, vai depender de seus efeitos sobre a densidade e a retenção de água dos mesmos. Em baixos teores de água as substâncias orgânicas, por reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (Soane, 1990; Zhang & Hartge, 1990), pois impede que a mesma se distribua uniformemente entre elas.

Outros fatores que afetarão o efeito da matéria orgânica sobre o atrito são a textura e a estrutura do solo. Nos solos arenosos, onde o ângulo de atrito interno é alto, a matéria orgânica, por possuir partículas de menor tamanho e de menor dureza que as partículas minerais, ao recobrir os grãos de areia e preencher os espaços entre os mesmos, poderá reduzir o atrito e, portanto, reduzir o ângulo de atrito interno. Nos solos de textura média e argilosa, a matéria orgânica poderá elevar o ângulo de atrito interno interagidos ao favorecer a formação de agregados e por aumentar sua resistência (Lebert & Horn, 1991).

Por coesão entendem-se as forças que permitem que um corpo de solo seja capaz de manter sua forma natural, de torrões ou blocos, sem esboroar-se quando ele não está confinado em um recipiente ou na massa de solo. Pode-se definir coesão como a resistência ao cisalhamento de um solo quando, sobre ele, não atua pressão externa alguma (Vargas, 1977). Sua origem está relacionada a:

1. existência de ligantes naturais aglutinando as partículas do solo entre si;
2. ligações entre as partículas, situadas muito próximas umas das outras, decorrentes de sua natureza coloidal e molecular (cargas superficiais, forças de Van der Waals, área superficial específica elevada); e,

3. tensão capilar na água intersticial, decorrente da formação de meniscos capilares próximo aos pontos de contato das partículas.

Portanto, como alerta Hillel (1980), a coesão do solo não se refere única e exclusivamente à atração entre partículas iguais como conceitualmente a coesão é definida, mas se refere à aderência mútua entre partículas e substâncias heterogêneas existentes no solo, significando que a coesão do solo incluiu, além das forças de coesão, as forças de adesão.

Classicamente, subdivide-se a coesão do solo em dois tipos, dependendo de sua origem: *coesão verdadeira* e *coesão aparente* (Caputo, 1981). A coesão verdadeira é aquela devido às forças eletroquímicas das partículas, sendo dependente da textura, tipo e quantidade de matéria orgânica, mineralogia e tipos de íons em solução, entre outros. A coesão aparente é aquela resultante da pressão capilar contida nos solos, agindo como se fosse uma força externa, sendo dependente da quantidade de água existente no sistema e de características do espaço poroso e da concentração de íons em solução.

Teoricamente, a matéria orgânica terá efeitos significativos sobre os dois tipos de coesão. Isso decorre da natureza coloidal e molecular da matéria orgânica, o que lhe confere um elevado número de cargas superficiais (CTC variando entre 400 e 1400  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  – Canellas et al., 1999) e uma elevada área superficial específica (ASE variando 800 e 900  $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$  – Meurer et al., 2000). O incremento de matéria orgânica no solo resulta em maior número de ligações entre as partículas minerais, com conseqüente aumento da estabilidade dos agregados (Carpenedo e Mielniczuk, 1990; Paladini e Mielniczuk, 1991; Campos et al., 1995), aumento da força de retenção de água (Sidiras et al., 1984; Centurion e Demattê, 1985), aumento da CTC (capacidade de troca catiônica) (Bayer e Mielniczuk, 1997), entre outros atributos.

Considerando-se que a tensão capilar de confinamento da água no solo é uma estimativa aproximada da coesão aparente, e que ela pode ser calculada pela equação apresentada por Caputo (1981):

$$P_c = a_c \frac{2T_s}{r} \quad [7]$$

onde:

$P_c$  = pressão capilar de confinamento;

$a_c$  = área de contato entre os grãos;

$T_s$  = tensão superficial da água;

$r$  = curvatura do menisco de água.

Então, a matéria orgânica ao aumentar a força de retenção de água no solo e, conseqüentemente, reduzir a curvatura dos meniscos formados entre as partículas ( $r$ ); e, ainda, ao aumentar o número de pontos de contatos entre as partículas e, conseqüentemente, a área de contato dos grãos ( $a_c$ ), estará aumentando o valor da pressão capilar de confinamento, ou seja, a coesão aparente.

A coesão verdadeira é o resultado da existência de cargas na superfície das partículas que, assim, estabelecem ligações entre si nos pontos suficientemente próximos para tal. Segundo Vargas (1977), nesses pontos as camadas de água mais próximas estão submetidas a forças de adsorção muito fortes, encontrando-se em estado sólido, o que aumenta a coesão verdadeira. Para o autor, o valor da coesão verdadeira dependerá: a) da natureza mineralógica da fração argila; b) dos íons adsorvidos e c) da existência de espaçamento adequado entre os grãos.

Nas camadas superficiais, o comportamento físico e químico do solo é muito influenciado pela presença de matéria orgânica, o que leva a supor que a mesma se constitua em um quarto fator determinante da coesão verdadeira, atuando da seguinte forma:

1. como ligante orgânico, reforçando os pontos de contato existentes entre as partículas minerais;
2. por estabelecer pontos de contatos adicionais entre as partículas minerais, inclusive em locais onde as mesmas estão “distantes” (pontos em que a distância entre as partículas minerais é

suficiente para impedir o estabelecimento de ligações diretas entre elas);

3. por aumentar a força de adsorção dos íons e das moléculas de água nos pontos de contato;

Portanto, o acúmulo de matéria orgânica do solo pode resultar em aumento da coesão do solo, por aumentar tanto a coesão verdadeira como a coesão aparente. Beekman (1987), apud Soane (1990), explica, porém que o aumento da coesão verdadeira, produzido pelo incremento das ligações nos pontos de contato entre as partículas minerais, resultante do acúmulo de matéria orgânica do solo, é mais significativo do que o aumento da coesão aparente promovido pelo aumento da tensão superficial da água.

Além dos efeitos sobre a coesão e o atrito entre as partículas minerais, acredita-se que a matéria orgânica possa aumentar a elasticidade do solo. Os materiais orgânicos são flexíveis, pouco densos e elásticos, ou seja, apresentam uma elevada capacidade de recuperar a forma original após sofrer deformação por aplicação de uma força. Soane (1990) apresenta resultados de pesquisas que demonstram que o índice de relaxação da palha de trigo, por exemplo, pode chegar a 50%, dependendo do estado de decomposição e do tamanho das partículas.

Teoricamente, a elasticidade permitiria que as partículas orgânicas, que ligam partículas minerais do solo, sejam deformadas enquanto as partículas minerais são deslocadas, durante a deformação provocada pela aplicação de uma carga, sem que as ligações se rompam totalmente. Ao cessar a aplicação da carga, as partículas orgânicas tenderiam a retornar à forma original, deslocando consigo as partículas minerais, resultando em expansão do solo após o descarregamento. Esse efeito seria tanto maior quanto maior fosse a presença de partículas orgânicas estabelecendo ligações entre as partículas minerais.

Um outro aspecto relacionado à capacidade dos resíduos orgânicos de se deformarem rapidamente e de recuperar, parcial ou totalmente, a forma original após cessar a aplicação de uma carga, é a possibilidade dos mesmos,

quando na superfície do solo, absorverem parte da energia compactante produzida pelo trânsito de máquinas e de animais. Para podermos compreender essa possibilidade, devemos ter claro que estamos falando da aplicação de cargas transientes, que permanecem sobre o solo por curtos lapsos de tempos, mesmo que repetidas vezes. E, ainda, que a deformação do solo é proporcional ao tipo de carga (estática ou dinâmica), ao tempo e número de carregamentos e à magnitude da carga (Horn & Lebert, 1994).

Durante a compressão de um corpo deformável, como os resíduos vegetais, enquanto o mesmo se deforma não há transmissão total da carga recebida. Isso só irá acontecer depois que ele sofreu a deformação. Assim, durante a passagem de uma carga sobre um terreno, contendo na superfície resíduos vegetais mais deformáveis que o solo, espera-se uma redução do tempo de efetiva aplicação da carga sobre o solo. Essa redução é o tempo necessário para deformar o resíduo deformável.

Por outro lado, a deformação de um corpo que sofre o impacto de uma carga é feita à custa da energia resultante desse impacto. Parte dessa energia é absorvida pelo corpo, o que permite que um corpo elástico recupere parte (ou toda) a forma inicial após a retirada da carga aplicada. Outra parte desta energia é dissipada na forma de calor ou transformada em outras formas de energia. Portanto, espera-se que os resíduos existentes sobre o terreno absorvam parte da carga aplicada sobre o mesmo, reduzindo a carga efetiva aplicada sobre o solo.

Além disso, a deformação rápida dos resíduos, durante a aplicação de uma carga sobre o solo, poderá resultar em aumento da área de contato carga/solo, podendo contribuir para redução da pressão resultante sobre o mesmo.

# ESTUDO I. “RELAÇÕES DA QUANTIDADE DE PALHA NA SUPERFÍCIE E DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM A DENSIDADE MÁXIMA OBTIDA NO ENSAIO PROCTOR”

## Introdução

O trânsito de máquinas ou de animais sobre o solo, quando esse se encontra em condições inadequadas de umidade, é uma das principais causas da compactação excessiva observada em muitas lavouras e que resulta em danos à produção das culturas vegetais, pois a umidade do solo é um dos principais fatores controladores da compactação (Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2002b). Infelizmente, algumas atividades, como a aplicação de agroquímicos para o combate de pragas e doenças ou a colheita, não permitem que o agricultor possa utilizar máquinas apenas quando o solo está em condições adequadas para tanto. Assim, além do desenvolvimento de máquinas com menor potencial para a compactação, o manejo do solo com vistas a melhorar sua resistência à compactação é uma alternativa que pode ajudar a minorar tais danos.

O acúmulo de matéria orgânica, que pode ser obtido a partir de um manejo adequado do solo e dos resíduos culturais, geralmente está associado a uma melhora das condições físicas do solo (Sidiras *et al.*, 1984; Centurion e Demattê, 1985; Carpenedo e Mielniczuk, 1990; Paladini e Mielniczuk, 1991; Campos *et al.*, 1995; Bayer e Mielniczuk, 1997; Arvidsson, 1998;), especialmente pelos benefícios da matéria orgânica à sua estrutura (Baumgartl & Horn, 1991). No sistema de plantio direto, a inexistência de revolvimento do solo, associada à manutenção de uma camada de resíduos orgânicos na sua superfície, permite um enriquecimento de material orgânico em sua camada superficial (Machado e Brum, 1978; Centurion *et al.*, 1985; Merten e Mielniczuk, 1991; Ismail *et al.*, 1994; Bayer e Mielniczuk, 1997; Corazza *et al.*, 1999; Amado *et al.*, 2001) com prováveis reflexos na resistência à compactação.

Além disso, espera-se que os resíduos mantidos na superfície do solo possam absorver parte da energia produzida pelo impacto das rodas das máquinas e pelas patas dos animais que transitam sobre os mesmos.

A matéria orgânica tem grande influência sobre o comportamento físico do solo, inclusive quando o mesmo é submetido a tráfego. A matéria orgânica diminui a densidade e o grau de compactação; por outro lado, aumenta a porosidade e, em algum grau, o espaço aéreo do solo quando o mesmo é submetido à compactação pelo trânsito de máquinas (Arvidsson, 1998). Como consequência, para um mesmo nível de tráfego, o autor observou que a produção foi maior nos solos com maiores teores de matéria orgânica. Mosaddeghi *et al.* (2000) observou que a adição de esterco ao solo reduziu o efeito do tráfego e da umidade sobre a densidade e o índice de cone, aumentando o intervalo de umidade que o solo suporta tráfego de máquinas e reduzindo a compactação.

A susceptibilidade à compactação de um solo pode ser avaliada através do ensaio Proctor Normal ou suas variantes. Esse teste foi desenvolvido pela engenharia civil para determinar a umidade adequada para obter a máxima compactação do solo na construção de estradas (Vargas, 1977), ou seja, a umidade em que o solo está mais susceptível à compactação. No ensaio Proctor, para uma mesma energia de compactação, a densidade obtida depende da umidade do solo, sendo que a densidade cresce com o aumento da umidade até um determinado valor e, depois, torna-se decrescente. Esse comportamento existe porque, em umidades baixas, a adição de água cria filmes de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas, facilitando a compactação. A partir de uma dada umidade, em que a compactação é máxima, entretanto, a adição de mais água resulta em que a mesma venha a ocupar os espaços existentes entre as partículas do solo, o que produz o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos susceptível à compactação (Olu *et al.*, 1989). Assim, compactando-se o solo em várias umidades, mas sempre com a mesma energia, e relacionando-se os valores de densidade obtidos com a umidade de

compactação, obtém-se a curva de compactação do solo, da qual calculamos a densidade máxima obtida e a umidade crítica de compactação correspondente.

A curva de compactação do solo é influenciada por vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, mineralogia e teor de matéria orgânica (Silva *et al.*, 1986; Ohu *et al.*, 1989; Ekwue & Stone, 1997), mas de maneira geral seu formato é semelhante para todos os solos.

A susceptibilidade à compactação, avaliada pelo ensaio Proctor, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo. Em geral, se observa que, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é o valor de densidade máxima obtido e maior é o teor de água necessário para atingi-lo. Isso foi observado em estudos com um mesmo solo, porém com diferentes teores de matéria orgânica (Ball *et al.*, 2000; Aragón *et al.*, 2000), em estudos com diferentes solos de mesma textura e com teores de matéria orgânica diferentes (Silva *et al.*, 1986) e em estudos com a adição ao solo de material orgânico semidecomposto (Stone & Ekwue, 1993; Zhang *et al.*, 1997). Segundo os autores isso ocorre pelas seguintes razões: a) efeito amortecedor da matéria orgânica, que resulta em dissipação de parte da energia aplicada; b) capacidade de retenção da água da matéria orgânica, que, ao retê-la junto de suas partículas, impede que a mesma atue como lubrificante entre as partículas minerais; c) capacidade da matéria orgânica em estabelecer ligações entre as partículas de solo, aumentando a coesão entre as mesmas; e, d) baixa densidade da matéria orgânica, assim quando aumenta o teor de matéria orgânica, reduz a densidade da mistura solo e matéria orgânica.

Considerando que o ensaio Proctor é pouco usual nos laboratórios de análises de solo para fins agronômicos e, ainda, que o mesmo exige uma amostra relativamente grande de solo (cerca de 4 kg), vários autores têm sugerido índices alternativos para determinar a umidade crítica de compactação. Assim, Ojeniyi & Dexter (1979) sugerem que seja utilizada a umidade correspondente a 90% do limite de plasticidade, o que foi corroborado pelas observações de Figueiredo *et al.* (2000).

Além do enriquecimento de matéria orgânica do solo, o sistema de plantio direto permite o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do mesmo. A baixa densidade desses resíduos orgânicos, associada com sua susceptibilidade à deformação e elasticidade, torna-os potencialmente capazes de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo. Essa possibilidade foi confirmada por Dao (1996), ao observar que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 0,05 e 0,125 m de profundidade, no sistema de cultivo convencional, e entre 0 e 0,05 m no plantio direto. O autor conclui, ainda, que a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo contribuiu para uma maior macroporosidade na camada superficial em solos sob cultivos conservacionistas. Acharya & Sharma (1994) também observaram que a presença de resíduos na superfície do solo preveniu a compactação superficial do solo.

Contrariamente, Gupta *et al.* (1987) não observaram diferenças significativas na densidade do solo, quando o mesmo foi submetido a tráfego tendo diferentes quantidades de resíduos de milho na superfície. Entretanto, observaram que o aumento na quantidade de palha na superfície reduziu a pressão atuante no solo, medida a 20 cm de profundidade, bem como reduziu o afundamento superficial, confirmando a hipótese de que os resíduos superficiais podem dissipar cargas aplicadas sobre o solo. Seguindo essa linha de raciocínio, Silva *et al.* (2000) sugerem que a existência de uma cobertura vegetal de cerca de 1 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos vegetais na superfície do solo, durante o período de pastoreio, pode ter contribuído para o pequeno efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo, quando comparado ao cultivo do solo, por eles observado. Para os autores, os resíduos vegetais podem ter absorvido parte da carga resultante do impacto das patas dos animais sobre o solo durante o período de pastoreio.

O presente trabalho foi realizado para estudar o efeito do enriquecimento de matéria orgânica do solo, produzido por diferentes manejos de solos e resíduos orgânicos, sobre a curva de compactação do mesmo.

Pretendeu-se, ainda, avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em dissipar a energia compactante resultante do trânsito de máquinas e animais sobre o solo.

## Material e Métodos

Para a realização do presente estudo utilizaram-se amostras obtidas em dois experimentos de longa duração, um deles conduzido sobre um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa e o outro sobre um Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa. Algumas características físicas da camada de 0 a 5 cm de profundidade desses solos, que foi a camada amostrada para o presente estudo, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria, densidade de partículas, densidade do solo e teor de carbono orgânico da camada superficial (0 a 5 cm) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico.

		Argissolo	Nitossolo
Granulometria (g kg <sup>-1</sup> )	Argila	155	787
	Silte	216	185
	Areia fina	459	18
	Areia grossa	170	10
Densidade de partículas (Mg m <sup>-3</sup> )		2,575	2,804
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )	Média	1,304	1,064
	Amplitude	0,950 a 1,500	0,900 a 1,220
Carbono orgânico (%)	Média	1,13	2,60
	Amplitude	0,65 a 1,88	2,15 a 3,30

O Argissolo foi amostrado em um experimento conduzido na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, no município de Santa Maria – RS. Nesse experimento estão sendo avaliadas diferentes combinações de doses de esterco líquido de suínos com plantas de cobertura de inverno, com o cultivo da cultura do milho no verão, no sistema de plantio direto (Giacomini, 2001). As amostras foram coletadas em novembro de 2002,

buscando-se uma ampla variação no teor de matéria orgânica. Para isso, coletaram-se amostras em 8 parcelas do experimento, escolhidas com base no teor de carbono orgânico na camada de 0 a 5 cm de profundidade e 7 amostras em áreas circunvizinhas ao experimento, totalizando 15 amostras.

O Nitossolo foi amostrado em um experimento localizado na Estação Experimental de Campos Novos da EPAGRI (EECN/EPAGRI – Campos Novos, SC). Nesse experimento estão sendo avaliados diferentes sistemas de manejo de solo e de resíduos culturais e insumos orgânicos (Veiga e Pandolfo, 1998). As amostras foram coletadas, em dezembro de 2001, durante o oitavo cultivo de verão no experimento. Pretendeu-se obter uma ampla variação no teor de matéria orgânica, escolhendo-se 20 parcelas com base no teor de carbono orgânico da camada 0 a 5 cm de profundidade.

Todas as amostras, em ambos os experimentos, foram coletadas na camada superficial (0 a 5 cm de profundidade) e continham aproximadamente 4 kg de solo. Depois de coletadas, foram levadas para o laboratório, onde foram destorroadas, peneiradas (peneira com abertura da malha de 2 mm) e secas ao ar. Durante a coleta e manipulação das amostras, procurou-se eliminar todo o material orgânico não decomposto existente, tais como fragmentos de folhas, frutos, talos e raízes.

O ensaio Proctor Normal foi realizado com o uso de um aparelho marca Soiltest modelo CN-4230, no qual a amostra é compactada em um cilindro metálico de aproximadamente 1000 cm<sup>3</sup>, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 30,5 cm, semelhantemente ao que é preconizado na Norma Técnica ABNT/NBR 7182 MB 33 e correspondendo a uma energia de 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em 5 ou 6 umidades, com intervalos de cerca de 2,5% de umidade gravimétrica, partindo-se de uma umidade que permitisse que o terceiro ponto da curva ficasse próximo à umidade crítica. Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo de prova (topo e fundo), para determinação da umidade real. Para o

Argissolo foram realizadas duas repetições de laboratório do ensaio de Proctor, enquanto que para o Nitossolo realizou-se apenas uma repetição.

Com base nos valores de umidade real e densidades do solo correspondentes, estimou-se a densidade máxima e a umidade crítica de cada uma das amostras. Para fazer essa estimativa utilizou-se o programa Sigma Plot®, ajustando-se aos dados o modelo matemático dado pela equação:

$$D_s = b + de^{(-0,5(\frac{U_g - U_{gc}}{f})^2)} \quad [8]$$

no qual, a densidade máxima é igual a soma dos parâmetros  $b + d$  e a umidade crítica de compactação é  $U_{gc}$ .

O limite de liquidez (LL), que corresponde ao teor de umidade do solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão aberta na superfície da amostra, foi determinado conforme a Norma Técnica ABNT NBR 6459 MB 30, na qual utiliza-se a fração do solo que passa pela peneira 40 (malha com abertura de 0,425 mm).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade na qual ao se moldar um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro surgem fissuras na superfície do mesmo (início da fragmentação), foi determinado conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 7180 MB 31, que também especifica o uso da fração do solo que passou pela peneira 40.

Por fim, para avaliar o teor de matéria orgânica do solo, determinou-se o teor de carbono orgânico do mesmo, em cada uma das amostras utilizadas, seguindo-se o método descrito pela EMBRAPA (1979) e fazendo-se duas repetições de laboratório para cada amostra.

Para o experimento realizado com o objetivo de avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em absorver a energia de impacto de rodas e patas de animais, adotou-se o procedimento descrito a seguir. Inicialmente, usando material coletado no experimento de Santa Maria, com umidade de  $0,05 \text{ g g}^{-1}$ , determinou-se, através do ensaio Proctor, a relação entre o nível de energia empregado e a densidade obtida, usando-se três repetições e quatro

níveis de energia, a saber: 2,41, 3,61, 6,02 e 8,43 kgf cm cm<sup>-3</sup>, que correspondem a 10,15, 25 e 35 golpes por camada com um soquete de massa igual a 2,50 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm, respectivamente. Com base nos resultados assim obtidos, ajustou-se uma equação do seguinte tipo:

$$D_s = g + h(Ec) + i(Ec)^2 \quad [9]$$

onde:

$D_s$  = densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>);

$Ec$  = energia de compactação (kgf cm cm<sup>-3</sup>);

$g$ ,  $h$  e  $i$  = coeficientes de ajuste.

Depois, o ensaio Proctor foi realizado com a aplicação de uma camada de palha sobre o solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, em quantidades de palha correspondentes a 0, 2, 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca. Essas determinações foram realizadas com o emprego de dois níveis de energia (3,61 e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>) e 3 repetições, resultando nos 10 seguintes tratamentos:

1. sem palha e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
2. 2 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
3. 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
4. 8 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
5. 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 6,02 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
6. sem palha e 3,61 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
7. 2 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 3,61 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
8. 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 3,61 kgf cm cm<sup>-3</sup>;
9. 8 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 3,61 kgf cm cm<sup>-3</sup>; e
10. 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha e 3,61 kgf cm cm<sup>-3</sup>.

Assim, depois de colocar a primeira camada de solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, procedia-se uma leve compactação manual do solo e adicionava-se a quantidade de palha correspondente ao tratamento em questão. Então se fazia a compactação da camada e, depois, se retirava a palha. Adicionava-se nova porção de solo, correspondente à segunda camada,

e nova quantidade de palha. Fazia-se, então, a compactação da segunda camada e, mais uma vez, se retirava a palha para adição da terceira camada de solo. Para evitar que a palha se misturasse em demasia com o solo, antes de adicionar a mesma, o solo foi levemente compactado manualmente. Este procedimento foi adotado também nas determinações realizadas apenas com solo, quando se avaliou a relação entre a energia de compactação e densidade obtida. A palha utilizada era composta de folhas de milho picadas em fragmentos de 3 a 4 cm de comprimento e com 12% de umidade gravimétrica.

Com base na equação que descreve a relação entre a densidade do solo e a energia de compactação (Equação 9) estimou-se, a partir dos valores de densidade obtidos com cada um dos tratamentos descritos acima, a energia de compactação correspondente. Com base na energia de compactação utilizada nos diferentes tratamentos e na energia equivalente correspondente ao mesmo, foi possível estimar a energia dissipada pela palha.

A análise estatística do primeiro experimento consistiu-se do ajuste de equações entre o teor de carbono orgânico e o  $LL$ ,  $LP$ ,  $Ug_c$  e  $Ds_{max}$ , que foi realizado usando-se o programa Sigma Plot® 8.0. Quando o ajuste foi significativo, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) das equações ajustadas é seguido de 1 ou 2 asteriscos para indicar 5% e 1% de significância, respectivamente. Para o caso do segundo experimento, cujo delineamento experimental constituiu-se de um fatorial completamente casualizado, procedeu-se a análise de variância complementada, quando a mesma foi significativa, pela análise de regressão ou teste DMS (diferença mínima significativa), conforme o caso.

## **Resultados e Discussão**

### ***Densidade máxima e umidade crítica em função do teor de CO.***

Dois exemplos de curvas de compactação são apresentados na Figura 2, com as respectivas equações que descrevem a curva de compactação e que foram usadas para estimar os valores da densidade do

solo máxima ( $Ds_{max}$ ) e da umidade crítica para compactação ( $Ug_c$ ). Essas curvas foram obtidas com duas amostras do Argissolo de textura franco arenosa, uma com 0,93% de carbono orgânico e a outra com 1,88%.

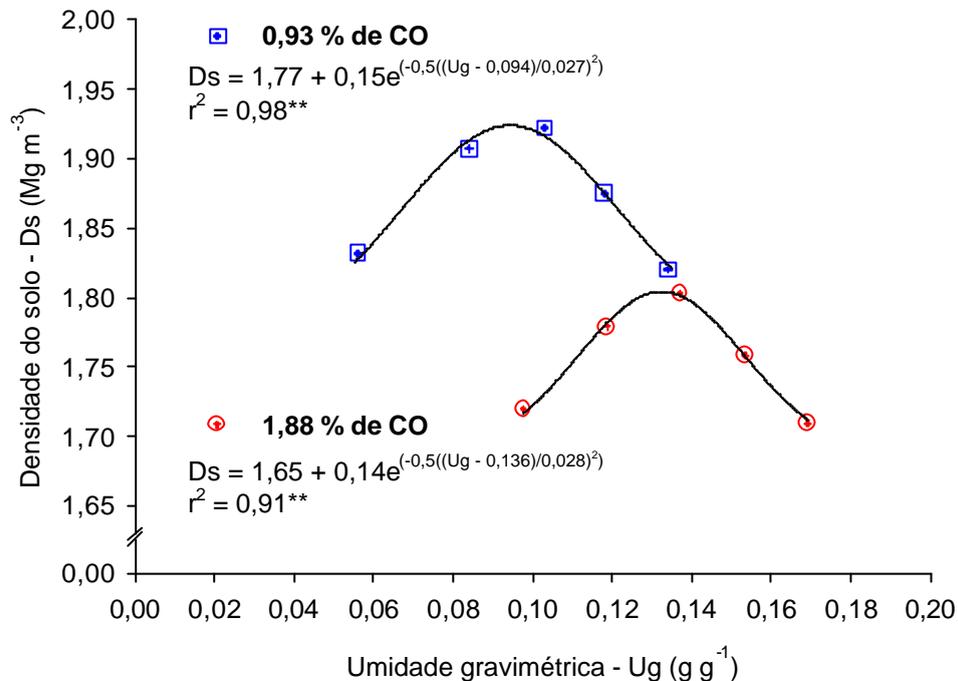


Figura 2. Curva de compactação de duas amostras de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com diferentes teores de carbono orgânico (CO).

Com o aumento do teor de matéria orgânica (MO) a curva de compactação do solo deslocou-se para a direita e para baixo (Figura 2), indicando uma redução da densidade máxima obtida e um aumento da umidade necessária para atingi-la. Esse comportamento também foi observado com as amostras do Nitossolo, confirmando as observações de Silva *et al.* (1986), Ball *et al.* (2000) e Aragón *et al.* (2000).

A partir das curvas de compactação, calculou-se a densidade máxima e a umidade crítica para cada amostra avaliada (Anexos A e B). Na figura 3 é apresentada a relação entre o teor de CO do solo e a densidade máxima obtida para os dois solos em estudo.

Para os dois solos, o efeito da matéria orgânica sobre a densidade máxima obtida pelo teste Proctor Normal, mostrou a mesma tendência, ou seja, reduziu a densidade máxima, corroborando os resultados obtidos por Silva *et*

al., (1986), Stone & Ekwue (1993), Ekwue & Stone (1997), Zhang *et al.* (1997), Aragón *et al.* (2000) e Ball *et al.* (2000). Entretanto, observando-se o coeficiente angular ( $b$ ) da equação que descreve a relação  $D_{s_{\max}}$  vs. CO percebe-se que, no solo franco arenoso (Argissolo) com  $b$  de 0,155 (Figura 3b), o efeito do CO é maior do que no argiloso (Nitossolo) com  $b$  de 0,066 (Figura 3a). Isso acontece porque, provavelmente, no solo arenoso o efeito da matéria orgânica em reduzir a atuação da água como lubrificante entre as partículas minerais é muito maior do que no argiloso. A matéria orgânica possui uma área superficial específica variando entre 800 a 900  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (Meurer *et al.* 2000) e uma CTC que pode chegar a 1400  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (Canellas *et al.*, 1999), com uma capacidade de retenção de água muito maior do que a da areia, cuja ASE é menor que 0,10  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  e a CTC é nula. Assim, na partição da água adicionada ao solo, a matéria orgânica acaba retendo uma quantidade muito maior que aquela que a areia retém, resultando que a água adicionada fica concentrada próximo das partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia.

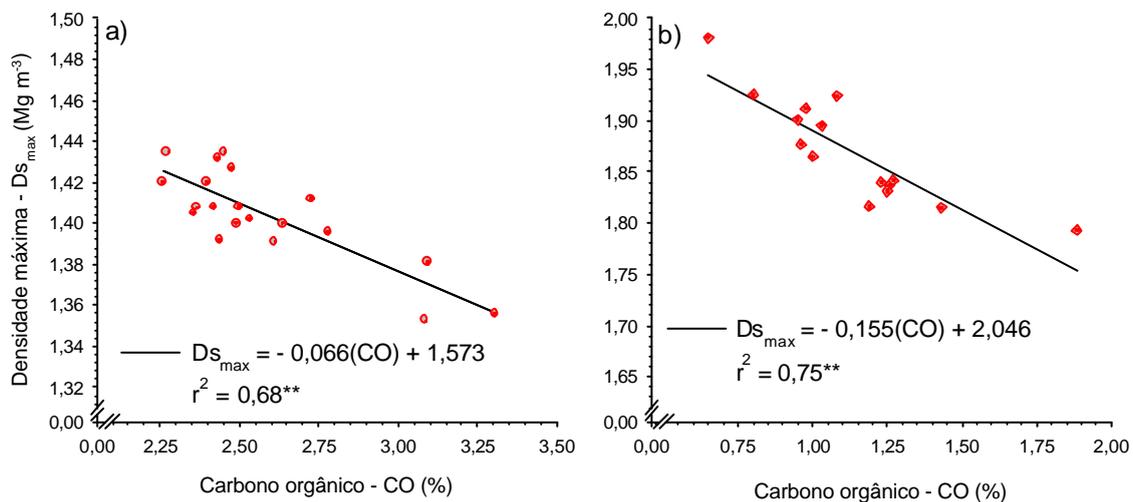


Figura 3. Densidade máxima ( $D_{s_{\max}}$ ) obtida com o ensaio Proctor Normal como função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b).

No solo argiloso, as diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais da fração argila são menores. Além disso, teoricamente,

nos solos argilosos a interação entre a fração mineral e a orgânica é maior, o que resultaria em menor disponibilidade da matéria orgânica para interagir com a água adicionada ao solo.

Associado à redução da densidade máxima, provocada pelo acúmulo de MO no solo, observa-se um aumento da umidade crítica, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5, para o Nitossolo e para o Argissolo, respectivamente. Novamente, observa-se um efeito menor do carbono orgânico no Nitossolo (Figura 4) do que no Argissolo (Figura 5), provocado, provavelmente, pelas mesmas razões já discutidas para a densidade máxima.

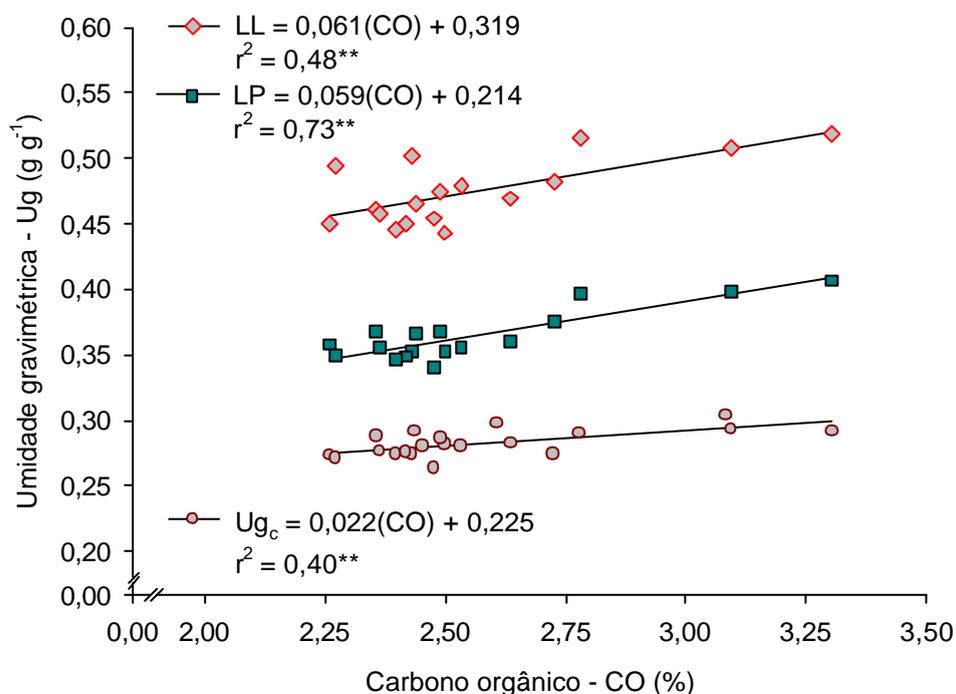


Figura 4. Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e umidade crítica para compactação ( $Ug_c$ ) como função do teor de carbono orgânico, em um Nitossolo Vermelho distrófico.

De maneira geral, observou-se que a densidade máxima alcançada foi maior no Argissolo (média =  $1,870 \text{ Mg m}^{-3}$ , Tabela 2) do que no Nitossolo (média =  $1,404 \text{ Mg m}^{-3}$ , Tabela 2) e, ainda, que a umidade crítica foi inferior no Argissolo, para um mesmo nível de energia. Essas diferenças estão relacionadas ao teor de argila e de areia de cada um dos solos. A argila

apresenta CTC entre 0 e 150  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e ASE variando de 7 e 800  $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$ , enquanto que a areia tem CTC nula e ASE inferior a 0,10  $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$  (Meurer et al., 2000). Essas características tornam a argila muito mais reativa que a areia, sendo capaz de interagir mais com a água, diminuindo seu efeito lubrificante entre as partículas minerais, assim como é capaz de apresentar maior coesão, diminuindo a susceptibilidade à compactação do solo.

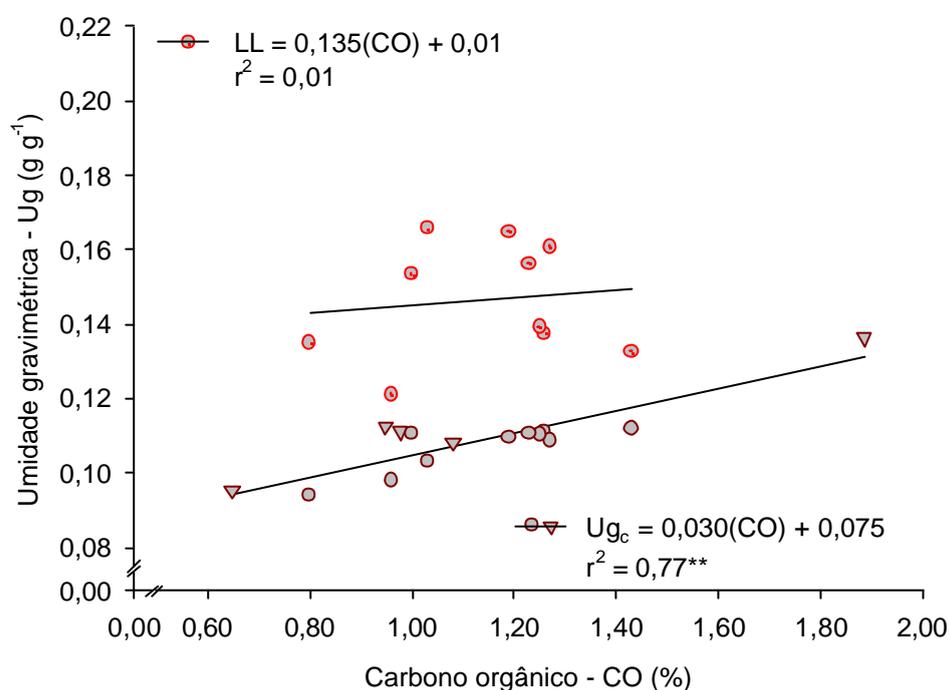


Figura 5. Limite de liquidez (LL) e umidade crítica para compactação ( $Ug_c$ ) como função do teor de carbono orgânico, em um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Tabela 2. Valores médios da densidade máxima ( $Ds_{max}$ ), umidade crítica ( $Ug_c$ ), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e teor de carbono orgânico (CO) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico.

Solo	$Ds_{max}$	$Ug_c$	LP	LL	CO
	--- $\text{Mg m}^{-3}$ ---	--- $\text{g g}^{-1}$ ---			--- % ---
Argissolo	1,870	0,109	- <sup>1/</sup>	15	1,13
Nitossolo	1,404	0,283	36	48	2,60

<sup>1/</sup> O Argissolo não apresenta plasticidade.

Para o Nitossolo o acúmulo de matéria orgânica resultou em aumento significativo dos limites de liquidez e de plasticidade (Figura 4), sem que houvesse alteração do índice de plasticidade (intervalo de umidade entre os limites de liquidez e de plasticidade). Segundo Baver et al. (1972), isso acontece porque a manifestação da plasticidade ocorre apenas depois que duas condições sejam atendidas: a) deve haver água suficiente para a formação de camadas rígidas de moléculas de água nas superfícies coloidais adjacentes e, b) deve haver água extra para funcionar como lubrificante entre as camadas rígidas de moléculas de água. Assim, a matéria orgânica afetaria apenas a primeira demanda, tornando-a maior, mas não teria efeito sobre a segunda demanda de água.

O efeito do acúmulo de matéria orgânica no Argissolo foi maior sobre os limites de plasticidade e de liquidez do que sobre a umidade crítica para compactação, como demonstram os valores dos coeficientes angulares das equações que descrevem as relações LL vs. CO, LP vs. CO e  $U_{g_c}$  vs. CO, respectivamente iguais a 0,061; 0,059 e 0,022 (Figura 4).

Os limites de consistência do solo são determinados pelas relações entre as partículas sólidas e dessas com a água, que resultam nas forças de coesão e de adesão. O menor efeito da matéria orgânica sobre a umidade crítica para compactação, em relação ao efeito sobre os limites de consistência, pode ser explicado pelo fato de que nessa determinação, além das forças de coesão e adesão, o atrito entre as partículas sólidas também está envolvido. Assim, o efeito da matéria orgânica sobre a umidade crítica de compactação é muito influenciado pelo efeito que ela produz sobre a capacidade da água em diminuir o atrito entre as partículas minerais. Esse efeito está relacionado à habilidade da matéria orgânica em disputar a água existente no sistema com as partículas minerais, o que depende das características da própria matéria orgânica e das características das partículas minerais. Por isso, o efeito do acúmulo de CO sobre a umidade crítica foi maior no solo arenoso do que no solo argiloso, pois no primeiro a matéria orgânica é

muito mais hábil em reter água que as partículas minerais e, portanto, foi mais eficiente em reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

No caso do solo arenoso (Figura 5), o acúmulo de matéria orgânica não produziu efeito sobre a plasticidade do solo e, assim, independentemente do teor de CO o mesmo não apresentou plasticidade, em função de seu elevado teor de areia (62,9 % - Tabela 1). Além disso, não se observou efeito significativo sobre o limite de liquidez, talvez porque, nesse caso, o efeito sobre as forças de adesão, predominantes na faixa de umidade em que o solo é plástico, é diluído pelo fato da fração mineral do solo possuir baixa reatividade. Por outro lado, por essa mesma razão, como dito acima, acentuou-se a ação de reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

No presente estudo, para o Argissolo observamos que a umidade crítica de compactação média (Tabela 2) foi de  $0,283 \text{ g g}^{-1}$  e o limite de plasticidade médio igual a 36 (correspondente a uma umidade de  $0,364 \text{ g g}^{-1}$ ), resultando em uma razão  $U_{g_c}/LP$  igual a 0,78. Ojeniyi & Dexter (1979) indicam que essa razão é igual a 0,90, sugerindo que a  $U_{g_c}$  possa ser estimada como sendo igual a 90% do limite de plasticidade. Entretanto, como pode ser visto na Figura 6, no presente estudo a razão  $U_{g_c}/LP$  foi influenciado pelo teor de carbono orgânico do solo, tornando-se menor à medida que o teor de carbono aumentou. Esse efeito é devido ao fato da matéria orgânica ter um efeito maior sobre o LP do que sobre a umidade crítica, como visto anteriormente (Figura 4). Considerando esse efeito da matéria orgânica sobre a razão  $U_{g_c}/LP$ , a estimação da  $U_{g_c}$  a partir do LP pode resultar em valores subestimados para baixos teores de MO ou superestimados quando o teor de MO for alto.

No caso do Argissolo, cuja  $U_{g_c}$  média foi de  $0,109 \text{ g g}^{-1}$ , não é possível utilizar o limite de plasticidade para estimar a umidade crítica, pois esse solo não apresenta plasticidade.

Os efeitos da matéria orgânica sobre a  $U_{g_c}$ , LL e LP, aumentando a umidade correspondente aos mesmos, significa uma redução da susceptibilidade do solo à compactação. O maior efeito sobre o LL e o LP, em relação à  $U_{g_c}$ , observada no Nitossolo, significa que se a  $U_{g_c}$  for utilizada como

indicador da umidade crítica, potencializa-se a diminuição dos riscos de compactação, pois quanto mais rico em MO for o solo, a  $U_{g_c}$  fica mais distante dos “perigosos” limites de plasticidade e de liquidez.

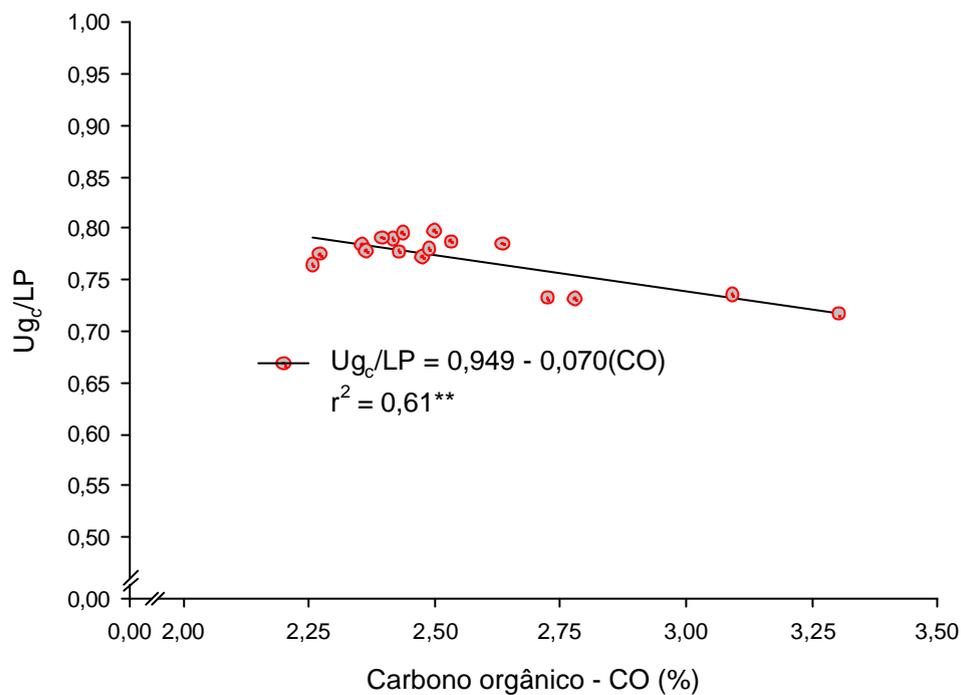


Figura 6. Razão entre umidade crítica para compactação ( $U_{g_c}$ ) e limite de plasticidade (LP), em função do teor de carbono orgânico do solo, para um Nitossolo Vermelho distrófico.

### ***Densidade do solo em função da quantidade de palha existente na superfície do solo.***

A densidade do solo máxima cresceu com o aumento da energia de compactação empregada (Figura 7), em uma relação quadrática. Os valores de densidade observados, mesmo com a menor energia de compactação empregada, são superiores aos normalmente observados no campo, demonstrando que a energia empregada no ensaio Proctor é superior àquela produzida pelas máquinas e animais que normalmente transitam sobre o solo. Segundo Raghavan et al. (1976), a energia de compactação utilizada no ensaio

Proctor normal corresponde, aproximadamente, a 15 passadas de um trator de 0,720 Mg na roda, cerca de 140 kPa, em solo franco-arenoso. Além disso, devemos considerar que o ensaio Proctor é realizado com solo desestruturado, o que, teoricamente aumenta sua susceptibilidade à compactação. Apesar disso, esse ensaio tem demonstrado ser um bom método para determinação da umidade crítica para a compactação (Figueiredo et al., 2000).

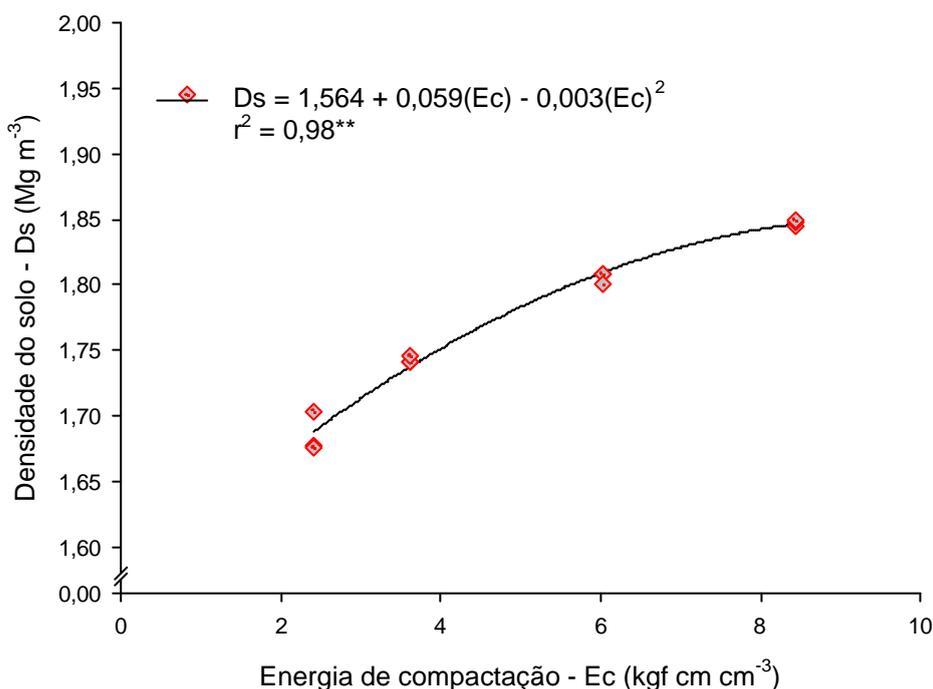


Figura 7. Densidade do solo em função da energia de compactação utilizada no ensaio Proctor, para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com umidade de 0,05 g g<sup>-1</sup>.

A densidade do solo obtida foi dependente da quantidade de palha existente sobre o solo (Figura 8). Quanto maior a quantidade de palha adicionada sobre o solo, durante a realização do ensaio Proctor, menores os valores de densidade obtidos. Para o nível de  $E_c=6,02 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ , o modelo exponencial decrescente apresentou o melhor ajuste e o para  $E_c=3,61 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ , foi o linear. Entretanto, considerando que a densidade do solo nunca será menor que a inicial, ou seja, a quantidade de palha sobre o solo poderá até dissipar toda a  $E_c$  e mesmo assim a densidade inicial não irá diminuir, entende-

se que o modelo linear deve ser preterido em relação ao modelo exponencial decrescente.

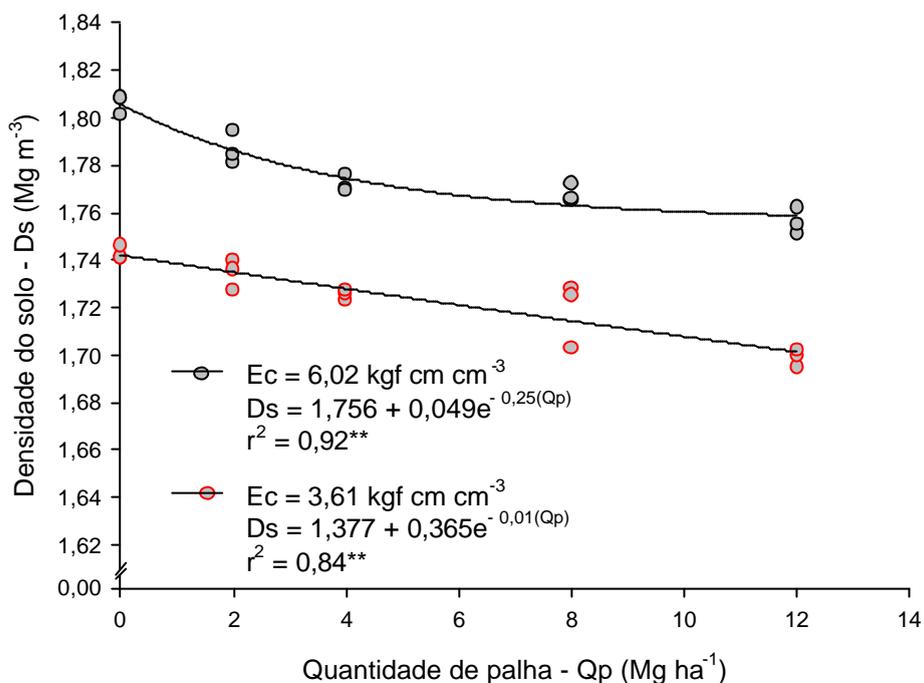


Figura 8. Densidade do solo em função da energia de compactação e da quantidade de palha na superfície do solo, determinada através do ensaio Proctor para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico com umidade de 0,05 g g<sup>-1</sup>.

Com base nos valores de Ds obtidos e usando a equação que descreve a relação Ds vs. Ec (Figura 7), calculou-se a energia de compactação equivalente para cada tratamento e, depois, estimou-se a percentagem de energia dissipada pela palha existente na superfície do solo (Tabela 3). Analisando esses resultados, percebe-se que, para as menores quantidades, a palha foi mais efetiva em dissipar a energia de compactação quando a mesma foi maior. Talvez isso tenha relação com o fato do ensaio Proctor ser realizado com o solo desagregado e, principalmente, solto. Assim, nos golpes iniciais do soquete o solo está quase tão susceptível à deformação quanto à palha e, portanto, nesses golpes a compactação é quase que indiferente à presença da palha, especialmente quando em quantidades muito pequenas. Nos golpes

finais, o solo já está mais compactado enquanto que a palha continua muito susceptível à deformação, passando a funcionar como um amortecedor entre o soquete que cai e o solo. Nos ensaios aqui realizados os dois níveis de energia foram obtidos pela diferenciação do número de golpes do soquete (15 golpes por camada para  $E_c=3,61 \text{ kgf cm cm}^{-3}$  e 25 golpes para  $E_c=6,02 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ ). Assim, considerando, por exemplo, a dose de  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de palha, vê-se que com 15 golpes (correspondentes a uma  $E_c$  de  $3,61 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ ) houve a dissipação de apenas 2,9 % da  $E_c$  e que esse percentual subiu para 14,9 quando se utilizou 25 golpes. Portanto, é possível concluir que nos primeiros 15 golpes houve dissipação de apenas 2,9 % e, nos 10 golpes restantes a dissipação foi de 12,0%.

Tabela 3. Densidade do solo ( $D_s$ ), energia equivalente ( $E_e$ ) e energia dissipada ( $E_{di}$ ) em função da energia de compactação ( $E_c$ ) e da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio Proctor (médias de três repetições).

<b><math>E_c</math></b>	<b>Palha</b>	<b><math>D_s</math></b>	<b><math>E_e</math></b>	<b><math>E_{di}</math></b>	
- $\text{Kgf cm cm}^{-3}$ --	-- $\text{Mg ha}^{-1}$ --	---- $\text{Mg m}^{-3}$ ----	-- $\text{Kgf cm cm}^{-3}$ ----- % -----	----- % -----	
6,02	0	1,806	6,02	100,0a <sup>(1)</sup>	0,0a
	2	1,787	5,12	85,1b	14,9a
	4	1,772	4,62	76,7b	23,3a
	8	1,768	4,49	74,6b	25,4a
	12	1,756	4,14	68,7a	31,3a
3,61	0	1,743	3,61	100,0a	0,0a
	2	1,734	3,53	97,1a	2,9b
	4	1,725	3,29	91,2a	8,8b
	8	1,719	3,13	86,6a	13,4b
	12	1,699	2,65	73,4a	26,6a
2,41	-	1,685	-	-	-
8,43	-	1,847	-	-	-

(1) Letras iguais indicam médias iguais pelo teste DMS com 5% de significância, para comparação de médias entre os 2 níveis de energia em cada nível de palha.

Para as quantidades maiores de palha, a mesma foi capaz de dissipar a energia de compactação mesmo nos golpes iniciais, tendo sido mais efetiva em reduzir a compactação no nível mais baixo de energia. Assim, por

exemplo, na dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha, a dissipação de energia atingiu 26,6% nos primeiros 15 golpes e nos 10 restantes apenas 4,7 %.

Esses resultados confirmam as observações feitas por Acharya & Sharma (1994) e Dao (1996), cujos resultados mostraram que a densidade do solo foi menor quando sobre o mesmo havia resíduos vegetais. Confirmam, ainda, as suposições de Silva *et al.* (2000), que creditaram aos resíduos vegetais presentes sobre o solo durante o pastoreio, o pouco efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo.

## **Conclusões**

O acúmulo de matéria orgânica, proporcionado por diferentes sistemas de manejo do solo, reduz a densidade máxima e aumenta a umidade crítica para compactação do solo, significando que o mesmo torna-se mais resistente à compactação. A magnitude desses efeitos, contudo, é dependente da granulometria do solo.

A presença de palha sobre o solo, durante a realização do ensaio Proctor resultou em dissipação de parte da energia de compactação utilizada, com redução da densidade máxima obtida, confirmando a hipótese de que a palha existente sobre o solo é capaz de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e animais. A eficácia dessa capacidade, no entanto, depende da quantidade de palha, da energia aplicada e das condições do solo.

## ESTUDO II. “COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO AFETADAS POR ALTERAÇÕES NO TEOR DE CARBONO ORGÂNICO.”

### Introdução

Os danos à estrutura do solo, causados pelo excesso de mobilização, foram praticamente eliminados no sistema de plantio direto, onde só existe mobilização na linha de semeadura. Entretanto, a eliminação do revolvimento permite um acúmulo de pressões produzidas pelo trânsito das máquinas agrícolas e, no caso de áreas de integração lavoura-pecuária, dos animais, que resultam em compactação superficial. Essa compactação pode atingir níveis prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e à produção das culturas (Silva, 2003; Streck, 2003; Secco, 2003). Outra consequência da eliminação do revolvimento é que, após alguns anos de cultivo no sistema, o solo adquire uma estrutura com resistência suficiente para suportar o tráfego sem apresentar compressibilidade significativa (Chaney e al., 1985). A razão para isso é que essa “nova” estrutura diferencia-se daquela de solos não cultivados, por apresentar agregados mais densos e resistentes e que estão mais próximos entre si.

Concomitantemente à compactação, o sistema de plantio direto permite um acúmulo de material orgânico sobre e na camada superficial do solo, em relação ao sistema convencional. Esse efeito pode contrapor-se à compactação do solo, reduzindo-a ou reduzindo seus efeitos, por aumentar o intervalo de umidade em que o solo pode sofrer tráfego, aumentar a resistência do solo à deformação e por diminuir a resistência à penetração das raízes quando o solo está seco (Soane, 1990; Ekwue, 1990; Zhang, 1994; Arvidsson, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000).

O acúmulo de material orgânico também está relacionado à inexistência de revolvimento do solo, pois assim esse material não é misturado

ao solo e sua decomposição é mais lenta e, ainda, há menores perdas por erosão. O material vegetal adicionado superficialmente decompõe mais lentamente quando não é incorporado ao solo, porque fica menos exposto aos microorganismos do solo. A matéria orgânica do solo também fica menos exposta ao ataque dos microorganismos, pois, sem o revolvimento, não há quebra das estruturas que a protegem fisicamente dos agentes decompositores. Assim, vários autores têm registrado aumentos nos teores de matéria orgânica da camada superficial de solos sob plantio direto (Machado & Brum, 1978; Centurion *et al.*, 1985; Merten & Mielniczuk, 1991; Ismail *et al.*, 1994; Bayer & Mielniczuk, 1997; Corazza *et al.*, 1999; Amado *et al.*, 2001).

A quantidade de material vegetal adicionado na superfície e a quantidade de matéria orgânica acumulada no solo são dependentes do sistema de culturas adotado (Bayer *et al.*, 2000; Amado *et al.*, 2001). Aqueles sistemas que incluem culturas com alta produção de matéria seca e com baixa relação C/N, em geral, resultam em maiores acúmulos de matéria orgânica no solo.

Os maiores teores de matéria orgânica, observados em solos sob plantio direto estão geralmente associados a aumento na estabilidade dos agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991; Campos *et al.*, 1995), do armazenamento de água (Sidiras *et al.*, 1984; Centurion & Demattê, 1985), e da CTC do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997), com reflexos na produção das culturas (Arvidsson, 1998). Entretanto, ainda são poucos os relatos de efeitos do acúmulo de matéria orgânica nas propriedades mecânicas do solo.

A matéria orgânica pode interferir na resistência do solo à compactação através dos seguintes efeitos: a) aumento da força de ligação entre partículas minerais, em função de sua natureza coloidal e comportamento molecular; b) aumento da elasticidade do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada sobre eles é retirada e, quando adicionados ao solo, transmitem a ele essa propriedade; c) diluição da densidade, já que a densidade dos materiais

orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo, logo a adição desses materiais ao solo resulta em uma mistura de menor densidade; d) filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as juntas; e) algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; f) substâncias orgânicas, ao reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (Soane, 1990).

O material orgânico possui uma elasticidade muito maior que as partículas minerais do solo (Soane, 1990). O autor apresenta resultados de pesquisas mostrando que, por exemplo, a taxa de relaxação da palha de trigo pode chegar a 50% e que ela varia em função do tamanho e do estado de decomposição do material. Se transmitida ao solo, essa característica permitiria que o mesmo recuperasse parte da porosidade quando cessa a aplicação de uma carga, como ocorre após a passagem de uma máquina. Entretanto, Stone & Larson (1980) e Macedo (1993) não observaram relaxação significativa em amostras de solo submetidas ao teste de compressão uniaxial.

A matéria orgânica tem efeito determinante na formação e estabilização de agregados do solo (Tisdall & Oades, 1982; Oades, 1984). Segundo Baumgartl & Horn (1991) e Horn *et al.* (1993), a resistência do solo tende a aumentar com o desenvolvimento de estrutura, uma vez que os parâmetros da resistência ao cisalhamento (coesão –  $c$ ; ângulo de atrito interno -  $f$ ) de agregados individuais são sempre maiores que os da massa do solo e, quanto mais agregado é o solo, mais negativa é a tensão capilar em um mesmo teor de água, e, portanto, menor é a atenuação da carga aplicada sobre ele.

Entretanto, D'Agostini (1992) argumenta que solos recuperados por processos biológicos, em que as condições estruturais se aproximam das naturais, tendem a apresentar condições de elevada compressibilidade, uma vez que a agregação é acompanhada de um aumento da porosidade, em especial da macroporosidade. Um solo que apresenta macroporosidade elevada é mais compressível, porque apresenta menor número de pontos de

contato partícula-partícula para conferir resistência mecânica à pressão compressiva imposta a ele (Macedo, 1993).

Essa aparente contradição é decorrente do fato da matéria orgânica estar associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: a) aumento da força de ligação entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (porosidade) (Ekwue, 1990; Zhang, 1994, Horn & Lebert, 1994). O balanço entre esses dois efeitos, que, por sua vez, depende da origem, estado de decomposição, status químico da matéria orgânica, irá determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang *et al.*, 1997). Quando predominam os efeitos de redução da densidade, por aumento da porosidade, a resistência à compressão diminui. Entretanto, a matéria orgânica produz aumento na resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

Assim, Ekwue (1990) observou que a adição de turfa reduziu a resistência ao cisalhamento, mas que o aumento do teor de matéria orgânica em solo sob pastagem resultou em aumento da mesma, enquanto Ekwue & Stone (1995) verificaram que a adição de material orgânico reduziu a resistência do solo em baixa umidade e aumentou-a em alta umidade. Arvidsson (1998) observou que o coeficiente de compressão não foi afetado pelo teor de carbono orgânico do solo, ao passo que Carpenedo (1994) observou uma correlação positiva entre o coeficiente de compressão e o teor de matéria orgânica do solo, significando que a mesma tornou o solo mais susceptível à compressão. Stone & Ekwue (1996) verificaram aumento da compressibilidade com a incorporação de lodo de esgoto ao solo e Gupta *et al.* (1987) observaram que a adição de material orgânico ao solo resultou em

aumento do índice de vazios obtido com uma determinada carga, porém não afetou significativamente o coeficiente de compressão do solo.

Diante dessas divergências e considerando a grande capacidade da matéria orgânica humificada em promover a estruturação e influenciar o comportamento do solo, e, ainda, que no sistema de plantio direto o enriquecimento de matéria orgânica ocorre concomitantemente à formação de uma “nova” estrutura, diferente da natural, considera-se ser necessário ampliar os estudos do comportamento compressivo de solos sob essas condições. É possível que nesse sistema, onde o enriquecimento de matéria orgânica não é, necessariamente, acompanhado pelo aumento da porosidade, já que a estrutura é marcadamente influenciada pelo acúmulo de pressões produzidas pelo trânsito de máquinas e animais, os efeitos positivos da matéria orgânica sobre as propriedades mecânicas se sobressaíam.

Assim, o presente trabalho foi proposto com o objetivo de estudar as implicações do acúmulo de matéria orgânica no solo sobre suas compressibilidade e elasticidade, especialmente no sistema de manejo plantio direto. Buscou-se estabelecer relações entre o teor de carbono orgânico do solo e os índices de compressão e de elasticidade do mesmo.

## **Material e Métodos**

Para atingir os objetivos propostos, o presente estudo foi realizado a partir de amostras coletadas em dois solos, sendo um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa e um Nitossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, com ampla variação no teor de matéria orgânica em cada um deles. O Argissolo foi amostrado em um experimento cujos tratamentos constituíam-se de combinações de doses de esterco líquido de suínos e plantas de cobertura, instalado na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, no município de Santa Maria – RS (Giacomini, 2001). O Nitossolo foi amostrado em um experimento no qual estão sendo avaliadas combinações de sistemas de manejo do solo e dos resíduos culturais e

insumos orgânicos, na Estação Experimental da EPAGRI no município de Campos Novos – SC (Veiga & Pandolfo, 1998).

A compressibilidade e a elasticidade do solo foram avaliadas em amostras com estrutura preservada, coletadas em anéis metálicos (2 cm de altura e 5,5 cm de diâmetro) nos dois sítios descritos acima, na profundidade de 0 a 3 cm.

As amostras do Argissolo foram coletadas em novembro de 2002, antes da semeadura do quinto cultivo de verão no experimento, nas parcelas correspondentes aos seguintes tratamentos e situações:

1. aveia sem adição de esterco líquido de suíno;
2. aveia + 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de esterco líquido de suíno;
3. aveia + ervilhaca + 40 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de esterco líquido de suíno;
4. aveia + ervilhaca + 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de esterco líquido de suíno;
5. área de pousio ao lado do experimento.

Foram coletadas 12 amostras de cada tratamento de campo, totalizando 60 amostras. No laboratório, as amostras foram saturadas com água durante 24 horas e, então, equilibradas em quatro tensões, a saber: 6 (mesa de tensão), 100, 500 (placas cerâmicas) e > 500 kPa (secas ao ar). Assim, cuidando que três amostras de cada tratamento de campo fossem incluídas em cada tensão de água, obteve-se um total de 15 repetições para cada tensão utilizada.

O Nitossolo foi amostrado em dezembro de 2001, durante o oitavo cultivo de verão do experimento, em parcelas correspondentes aos seguintes tratamentos:

1. semeadura direta com adubação química;
2. semeadura direta com aplicação de cama de aviário;
3. preparo convencional com adubação química;
4. preparo convencional com aplicação de cama de aviário;
5. preparo convencional após a remoção dos resíduos culturais, com adubação química;

6. preparo convencional após a remoção dos resíduos culturais, com aplicação de cama de aviário;
7. preparo convencional após a queima dos resíduos culturais, com adubação química;
8. preparo convencional após a queima dos resíduos culturais, com aplicação de cama de aviário.

Inicialmente foram coletadas 12 amostras por tratamento, que no laboratório também foram divididas em 4 conjuntos de 24 amostras. Após as amostras serem saturadas durante 24 horas, cada conjunto foi submetido a uma das seguintes tensões de água: 6 (mesa de tensão), 100, 500 (placas cerâmicas) e > 500 kPa (secas ao ar). Cerca de 8 meses após a primeira coleta, foram coletadas mais 8 amostras na parcela em que se observou o maior teor de carbono orgânico e que corresponde ao tratamento plantio direto com adubação química, e 4 amostras na parcela com o menor teor de carbono orgânico (convencional após a retirada dos resíduos e com adubação química), com o objetivo de ampliar o número de pontos com valores extremos de carbono. Assim totalizamos 27 amostras por tensão de água utilizada.

Para a avaliação da compressibilidade, as amostras nos anéis metálicos foram submetidas ao ensaio de adensamento em uma prensa de compressão uniaxial, com aplicações seqüenciais de cargas estáticas de 12,5; 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, com tempo de carregamento de 5 minutos. Com base no deslocamento vertical, medido na prensa após a aplicação de cada uma das cargas, calculou-se os correspondentes índices de vazios e densidades da amostra de solo, com os quais foram obtidas as curvas de compressão para, então, determinar o coeficiente de compressão ( $C_c$ ) e a pressão de pré-consolidação ( $s_p$ ) de cada uma delas, através do programa Compress (Reinert *et al.*, 2003), conforme método de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981) esquematizado na Figura 9.

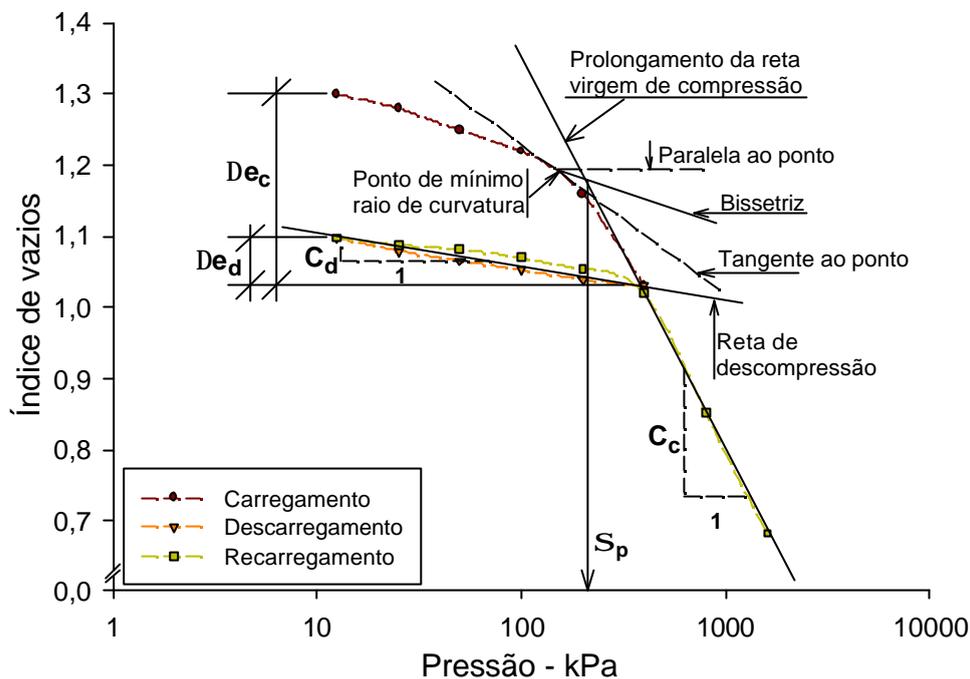


Figura 9. Exemplo de curva de compressão com indicações da reta virgem, da reta de decompressão e do cálculo do índice de relaxação ( $I_r$ ).

A elasticidade do solo foi avaliada nas mesmas amostras e condições em que foi avaliada a compressibilidade. Para tanto, o carregamento, na prensa de compressão uniaxial, foi feito em três etapas, como descrito a seguir. Primeiro fez-se o carregamento das cargas de 12,5; 25, 50, 100, 200 e 400 kPa, admitindo-se que essa carga fosse maior que a pressão de pré-consolidação das amostras em estudo. Depois, fez-se o descarregamento seqüencial das cargas aplicadas e, finalmente, terminado o descarregamento, carregaram-se novamente todas as cargas incluindo as cargas de 800 e 1600 kPa. Tanto nos carregamentos como nos descarregamentos, as leituras no extensômetro foram feitas após 5 minutos de aplicação da carga. No presente trabalho, a elasticidade é expressa pelo coeficiente de decompressão ( $C_d$ ), que corresponde à declividade da reta de descarregamento/recarregamento (Figura 9) e pelo índice de relaxação ( $I_r$ ), calculado através da seguinte equação:

$$I_r = 100 \frac{\Delta e_d}{\Delta e_c} \quad [10]$$

onde:

$lr$  = índice de relaxação (%);

$De_d$  = variação do índice de vazios durante o descarregamento;

$De_c$  = variação do índice de vazios durante o carregamento.

Para cada amostra, com base nas pesagens e medições feitas na prensa de compressão uniaxial, calculou-se, ainda, a densidade inicial ( $Ds_i$ ), a densidade final ( $Ds_f$ ), o grau de saturação inicial ( $GS_i$ ) e o final ( $GS_f$ ), a porosidade total inicial ( $Pt_i$ ) e a final ( $Pt_f$ ). Além disso, para estimar o conteúdo de matéria orgânica do solo, determinou-se o teor de carbono orgânico do mesmo pelo método descrito por EMBRAPA (1979), em todas amostras submetidas ao ensaio de adensamento uniaxial.

A análise estatística, para comparação entre tensões de água, seguiu o modelo de delineamento inteiramente casualizado. A complementação da análise de variância, quando significativa, foi realizada aplicando-se o teste DMS (diferença mínima significativa) com 5% de significância ou a análise de regressão, conforme o caso. Empregou-se, ainda, o estudo de correlações entre as diversas variáveis, fazendo-se o ajuste de equações através do programa Sigma Plot® 8.0. Quando o ajuste das equações foi significativo, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) das equações ajustadas é seguido de 1 ou 2 asteriscos, respectivamente para 5% e 1% de significância.

## **Resultados e Discussão**

Os valores médios do teor de carbono orgânico, densidade do solo, umidade gravimétrica, índice de vazios, grau de saturação, pressão de pré-consolidação, coeficiente de compressibilidade, índice de relaxação e coeficiente de descompressão para os dois solos em estudo, em função da tensão de água em que as amostras foram equilibradas, constam na Tabela 4. A totalidade dos valores obtidos para cada amostra é apresentada no Anexo C e D.

Tabela 4: Carbono orgânico (CO), densidade do solo (Ds), umidade gravimétrica (Ug), índice de vazios (e), grau de saturação (Gs), pressão de pré-consolidação ( $s_p$ ), coeficiente de compressibilidade (Cc), índice de relaxação (Ir) e coeficiente de descompressão (Cd) de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, em função da tensão de água da amostra.

Solo/tensão	CO	Ds	Ug	e	Gs	$s_p$	Cc	Ir	Cd
Nitossolo	-- % --	Mg m <sup>3</sup>	-- g g <sup>-1</sup> --		--- % ---	-- kPa --		--- % ---	
6 kPa	2,27	1,044	0,416a <sup>(1)</sup>	1,697	69,4a	22,3c	0,44c	16,4a	0,0068a
100 kPa	2,47	1,075	0,309b	1,621	54,3b	81,4b	0,62b	11,4b	0,0038b
500 kPa	2,49	1,050	0,286c	1,678	48,1c	150,4a	0,69a	11,8b	0,0029c
> 500 kPa	2,44	1,089	0,274c	1,587	49,1c	142,8a	0,61b	12,3b	0,0030c
-----									
Argissolo									
6 kPa	1,45A	1,311	0,240A	0,976	65,0A	28,3D	0,28B	23,4A	0,0056A
100 kPa	1,06B	1,312	0,136B	0,977	36,6B	68,2C	0,35AB	14,0B	0,0027BC
500 kPa	1,54A	1,276	0,105C	1,052	25,8C	93,6B	0,39A	16,0B	0,0032B
> 500 kPa	1,33AB	1,318	0,014D	0,980	3,7D	172,6A	0,27B	20,6A	0,0017C

(1) Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste DMS a 5%. Letras minúsculas para comparação entre médias do Nitossolo e maiúsculas para o Argissolo. A ausência de letras indica variáveis que não apresentaram variância significativa em função das tensões de água.

Esperava-se que não houvesse variação significativa do teor de CO, da densidade e do índice de vazios em função da tensão de água, mas isso ocorreu nas amostras do Argissolo para o teor de CO. O menor teor médio de CO observado para a tensão de 100 kPa, não prejudicou os objetivos do estudo, pois, apesar da média menor, a amplitude de valores foi semelhante à observada nas demais tensões.

Para facilitar a análise discutir-se-á as variáveis pressão de pré-consolidação, coeficiente de compressibilidade e elasticidade separadamente nos próximos parágrafos, dando ênfase às suas relações com o teor de carbono orgânico das amostras.

### Pressão de pré-consolidação

A pressão de pré-consolidação variou significativamente com a variação da tensão de água nas amostras (Tabela 4). De maneira geral observa-se que a  $s_p$  se torna maior à medida que o solo se torna mais seco. Isso acontece porque a água atua de duas formas sobre a resistência do solo: a) diminui a coesão entre as partículas sólidas e b) forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre as mesmas (Hillel, 1980). O resultado é uma redução da  $s_p$ , como descrito por Dias Junior (1994), Kondo & Dias Junior (1999) e Silva et al. (2002b), que observaram um decréscimo exponencial da pressão de pré-consolidação com o aumento do teor de água do solo.

Na avaliação da correlação da  $s_p$  com a  $U_g$ , no presente estudo, as amostras foram separadas em dois grupos conforme suas densidades (Figura 10), pois Silva et al. (2002a) identificaram que essas relações são influenciadas pela densidade inicial do solo. Para os dois solos, o valor usado como parâmetro para separar as duas classes de densidade, foi a densidade média obtida com todas as amostras utilizadas, sendo  $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  para o Nitossolo e  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  para o Argissolo.

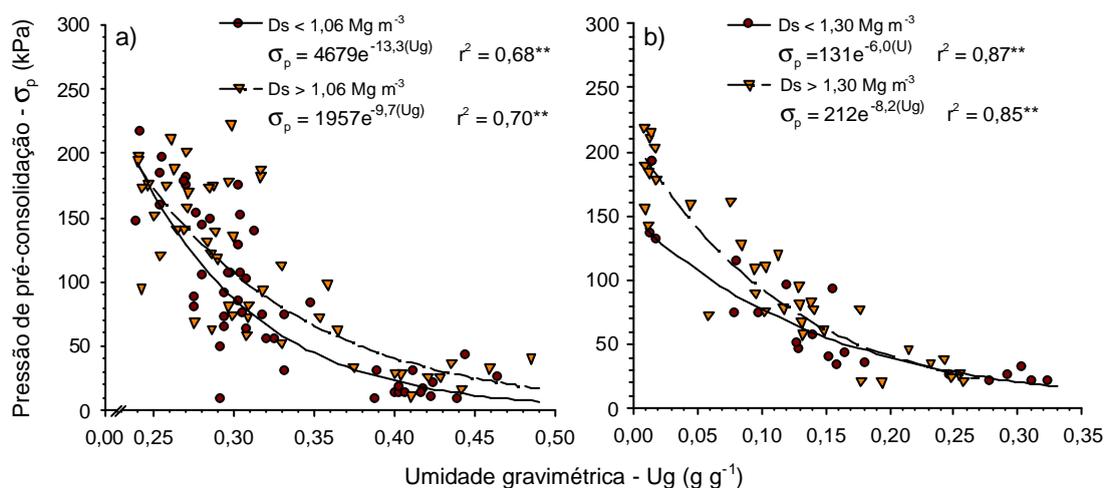


Figura 10. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo.

Para o Nitossolo a  $s_p$  foi semelhante entre os dois grupos de densidades nos menores teores de água estudados, mas tornou-se maior nas amostras mais densas com o aumento da umidade nas mesmas. No Argissolo, observa-se que a  $s_p$  em umidades baixas é maior quanto maior for a densidade do solo, mas que para umidades maiores que  $0,20 \text{ g g}^{-1}$  a mesma independe da densidade inicial da amostra (Figura 10).

Usando as equações descritas na Figura 10 e a umidade crítica para compactação ( $U_{g_c}$ ) média determinada com o ensaio Proctor (Estudo I) para o Argissolo ( $0,109 \text{ g g}^{-1}$ ) e para o Nitossolo ( $0,283 \text{ g g}^{-1}$ ), obteve-se valores de pressão de pré-consolidação de 75 e 90 kPa, para o Argissolo com  $D_s < 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $D_s > 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  e de 104 e 122 kPa para o Nitossolo com  $D_s < 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $D_s > 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Considerando que a maioria das pressões médias normalmente aplicadas sobre a superfície do solo por tratores e colheitadeiras estão entre 100 e 200 kPa (Carpenedo, 1994), é possível concluir que, especialmente para o Argissolo, a umidade crítica para compactação determinada pelo ensaio Proctor não pode ser o limite definidor do momento de entrada dessas máquinas na lavoura. Considerando um valor médio de 150 kPa de pressão aplicada sobre o solo, o Argissolo com menor densidade não suportaria tráfego mesmo quando seco, enquanto na densidade maior isso só ocorrerá em umidades menores que  $0,04 \text{ g g}^{-1}$  (38% da  $U_{g_c}$ ). Para o Nitossolo esse valor limite é de  $0,26 \text{ g g}^{-1}$  (90% da  $U_{g_c}$ ), independentemente da densidade.

Quando avaliou-se a relação da  $s_p$  com o grau de saturação das amostras (Figura 11), de maneira geral observou-se que para o Nitossolo a  $s_p$  foi maior nas amostras mais densas em toda faixa de grau de saturação estudada. A resistência do solo à deformação é resultante do número de pontos de contato entre as partículas e da resistência de cada um desses pontos de contato, assim, para um mesmo solo quanto mais compacto ele for maior o número de pontos de contato e, portanto, maior sua resistência. Considerando, ainda, que o efeito da água sobre a resistência do solo é o resultado de seus efeitos sobre a coesão e o atrito entre as partículas sólidas e,

também, que um mesmo grau de saturação significa uma menor quantidade de água no solo mais denso, pode-se dizer que a maior  $s_p$  observada no solo mais denso, em um mesmo grau de saturação, além do maior número de pontos de contato, é devida ao menor conteúdo de água existente no mesmo, em relação ao solo menos denso. Por isso, quando relacionou-se a  $s_p$  com a umidade gravimétrica (Figura 10), para um mesmo conteúdo de água as diferenças entre os dois grupos de densidades eram menores.

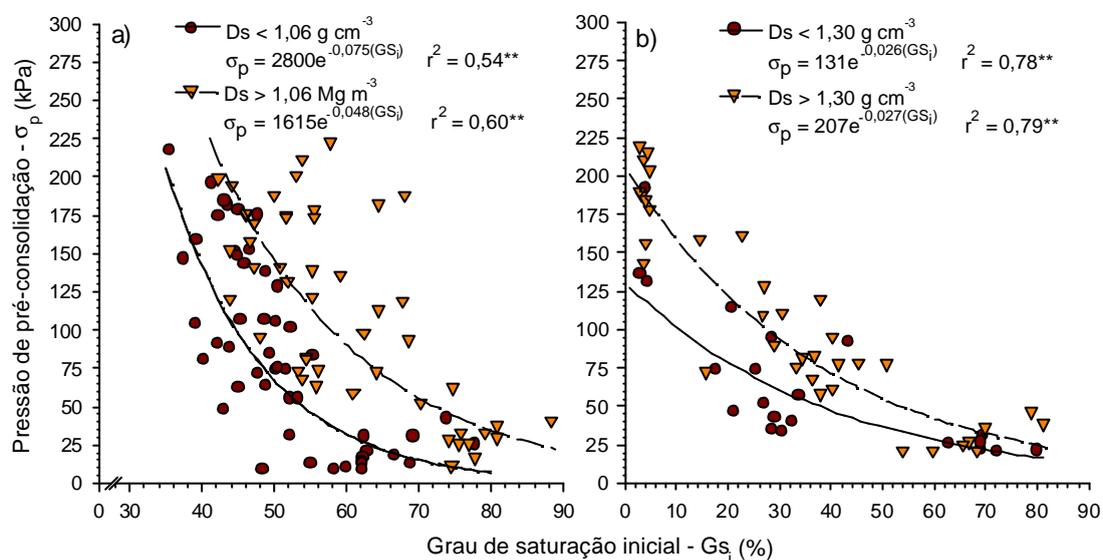


Figura 11. Pressão de pré-consolidação como função do grau de saturação inicial do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo.

Para o Argissolo, em saturações baixas a  $s_p$  é maior quanto maior for a densidade do solo, mas para  $Gs_i$  elevados a mesma tende a ser independente da densidade inicial das amostras. Nesse solo arenoso, cuja coesão entre as partículas é baixa, a resistência à deformação é determinada principalmente pelo número de pontos de contato e pelo atrito entre as partículas. Assim, em baixos teores de água, o solo mais adensado, por apresentar partículas mais próximas, é mais resistente, porém quando há água suficiente para recobrir todas as partículas reduzindo o atrito entre as mesmas e, ainda, suficiente para diluir a pouca coesão existente, a capacidade de suporte torna-se independente da densidade inicial.

Considerando o efeito da matéria orgânica sobre a coesão e sobre a retenção e movimentação da água no solo, reavaliou-se a correlação  $s_p$  vs  $U_g$ , separando as amostras, dentro de cada classe de densidade, em classes de teores de carbono orgânico (Figuras 12 e 13). Para o Nitossolo, as amostras foram separadas em 4 classes de carbono orgânico (< 2,1; 2,1 a 2,4; 2,4 a 2,7 e > 2,7% de CO), enquanto que para o Argissolo foram apenas 2 classes (< 1,3 e > 1,3% de CO). O número de classes e os limites de cada classe foram definidos arbitrariamente procurando atender 2 objetivos: uniformidade dos intervalos e número razoável de graus de liberdade para avaliação das correlações.

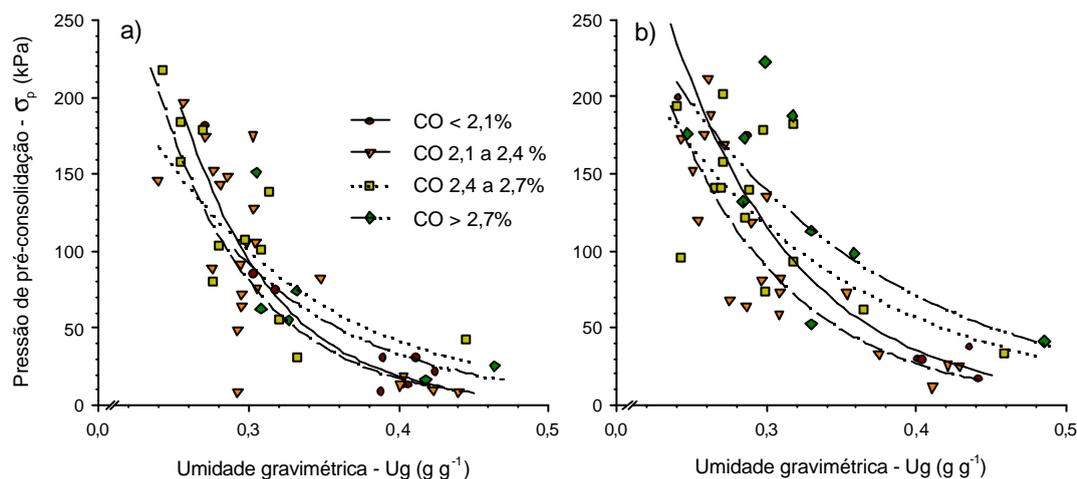


Figura12. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica de um Nitossolo Vermelho distrófico, para diferentes classes de teor de carbono orgânico (CO) e de densidade do solo ( $D_s$ ): a)  $D_s < 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$  e b)  $D_s > 1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Para ambos os solos os dados foram ajustados ao modelo exponencial dado por:

$$s_p = j e^{-k(U_g)} \quad [11]$$

onde:  $s_p$  = pressão de pré-consolidação (kPa);  
 $j$  e  $k$  são parâmetros empíricos;  
 $U_g$  = umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ).

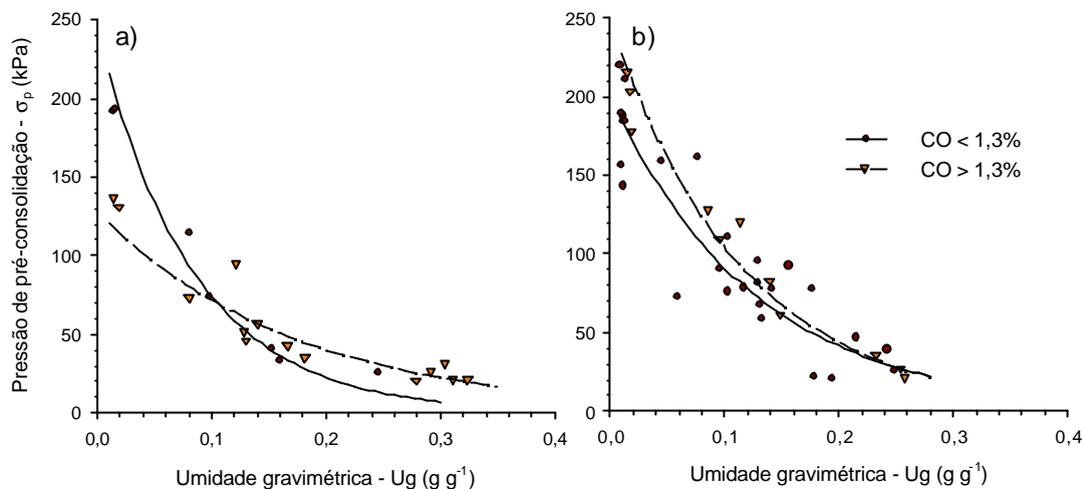


Figura13. Pressão de pré-consolidação como função da umidade gravimétrica de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, para diferentes classes de teor de carbono orgânico (CO) e de densidade do solo (Ds): a)  $D_s < 1,3\ Mg\ m^{-3}$  e b)  $D_s > 1,3\ Mg\ m^{-3}$ .

Na Tabela 5 são listados os valores dos parâmetros  $j$  e  $k$  da equação [11] e os valores médios do teor de CO, densidade do solo, umidade gravimétrica, grau de saturação e pressão de pré-consolidação, para cada classe de densidade e teor de CO de cada um dos solos estudados.

Observando-se as Figuras 12 e 13, é possível verificar que para o Nitossolo houve uma tendência das curvas das classes de maiores teores de MO, serem deslocadas para cima e para direita, significando que em uma mesma umidade quanto maior o teor médio de MO das amostras maior a  $s_p$ , especialmente nas maiores umidades estudadas. Para o Argissolo, esse comportamento não ficou tão bem caracterizado. Essa diferença entre o comportamento dos 2 solos pode ser associada à diferença na relação CO vs.  $D_s$  nos mesmos (Figura 14). Para o Nitossolo não houve relação significativa entre essas variáveis, enquanto que no Argissolo isso ocorreu. Assim no Argissolo, nas classes de maior teor de carbono orgânico, o efeito desse sobre a densidade resulta em redução da  $s_p$ , pois a redução da densidade significa redução do número de pontos de contato entre as partículas e, portanto, da resistência à deformação.

Tabela 5. Número de amostras (n), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica (Ug), pressão de pré-consolidação ( $s_p$ ), parâmetros  $j$  e  $k$  e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da equação [11], para diferentes classes de Ds e de teor de CO de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Classe Ds	Classe CO	n	Ds	CO	Ug	$s_p$	$j$	$k$	$r^2$
			- Mg m <sup>-3</sup> -	--- % ---	-- g g <sup>-1</sup> --	-- kPa --			
Nitossolo	< 2,1	10	1,014	1,91	0,373	47,2	11209	15,9	0,78**
	2,1 – 2,4	23	1,006	2,25	0,311	97,3	8022	15,3	0,64**
	2,4 – 2,7	12	1,011	2,56	0,299	116,6	1351	8,7	0,58**
	> 2,7	6	0,994	3,19	0,356	64,3	1921	10,1	0,72*
> 1,06	< 2,1	6	1,109	2,00	0,369	81,1	4038	11,8	0,92**
	2,1 – 2,4	20	1,127	2,23	0,308	102,5	3386	12,1	0,82**
	2,4 – 2,7	14	1,133	2,51	0,301	123,4	1012	7,2	0,63**
	> 2,7	9	1,143	3,05	0,326	132,9	1063	6,8	0,62*
Argissolo	< 1,30	7	1,236	1,13	0,087	107,7	242,7	11,8	0,98**
	> 1,30	14	1,161	1,88	0,182	53,43	127,5	5,8	0,89**
	< 1,30	26	1,396	0,99	0,106	105,6	200,5	7,9	0,78**
	> 1,30	11	1,350	1,46	0,125	107,8	248,1	8,7	0,97**

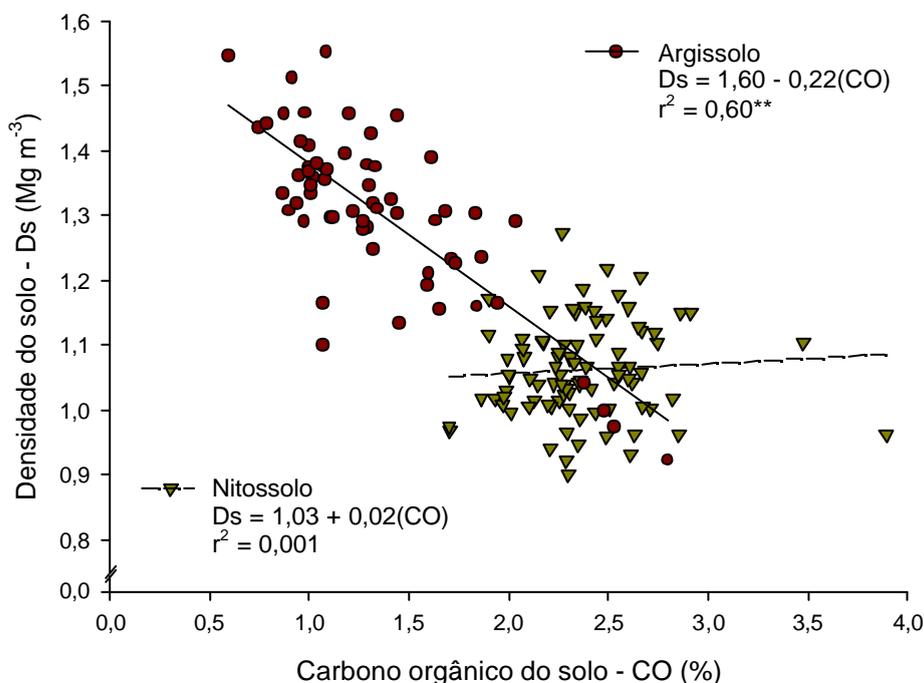


Figura 14. Densidade do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico e um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

O aumento da  $s_p$  em função do incremento do teor de matéria orgânica, para uma mesma umidade deve-se, provavelmente, ao efeito do MO sobre a consistência do solo. Incrementos de MO resultam em incrementos dos limites de consistência, conforme demonstrado no Estudo I, pois a matéria orgânica constitui-se na primeira demanda pela água adicionada ao solo (Stone & Ekwue, 1993). Dessa maneira, quanto maior o teor de matéria orgânica, maior terá que ser o teor de água para que a mesma atue efetivamente na redução da coesão e do atrito entre as partículas minerais, justificando o porque da observação de maiores  $s_p$  para solos mais ricos em MO, para uma mesma umidade.

### ***Compressibilidade do solo***

A tensão de água nas amostras produziu variação significativa sobre o coeficiente de compressibilidade do solo, sendo que, para ambos os solos, se observou que a maior susceptibilidade à compressão, expressa pelo  $C_c$ , aconteceu quando as amostras foram equilibradas na tensão de 500 kPa (Tabela 4). Um aspecto interessante de destacar é que os valores de umidade gravimétrica média na tensão de água de 500 kPa, 0,105 e 0,286  $g\ g^{-1}$  (Tabela 4) respectivamente para o Argissolo e para o Nitossolo, são muito semelhantes aos valores da umidade crítica média, determinada através do ensaio Proctor Normal (Estudo I, Tabela 2) para esses dois solos: 0,109 e 0,283  $g\ g^{-1}$ , respectivamente. Isso, de certa forma, confirma a validade do ensaio Proctor para a determinação da umidade crítica de compactação do solo.

Entretanto, quando se avaliou a relação entre a densidade máxima obtida pelo ensaio Proctor normal e a densidade obtida após a aplicação das maiores cargas empregadas no ensaio de adensamento uniaxial (400, 800 e 1600 kPa), não se observou correlação significativa entre as variáveis, para os dois solos (para essa avaliação empregaram-se as amostras equilibradas na tensão de 500 kPa, cuja umidade média final foi semelhante à umidade crítica média obtida no ensaio Proctor). Provavelmente isso ocorreu porque nos

ensaios de confinamento uniaxial empregaram-se amostras com diferentes densidades iniciais e com estrutura preservada, enquanto que no ensaio Proctor o solo estava desestruturado e solto. Além disso, devemos considerar as diferenças na quantidade de energia e na forma de aplicação da mesma entre os dois ensaios.

Com base na observação de que a variação da tensão de água no solo teve efeito significativo sobre a compressibilidade, realizou-se um estudo de correlação entre o  $C_c$  e a  $U_g$ , cujo resultado é mostrado na Figura 15. Segundo Dias Junior (1994) essa relação é quadrática, existindo uma umidade em que a compressibilidade é máxima. Teoricamente, primeiro a compressibilidade cresce com o aumento da umidade porque a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas sólidas e, depois de atingir um valor máximo, decresce porque o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e, assim, a deformação acontece somente com a expulsão da água do meio poroso. Portanto, nesse caso, a compressibilidade é determinada pela condutividade hidráulica do solo.

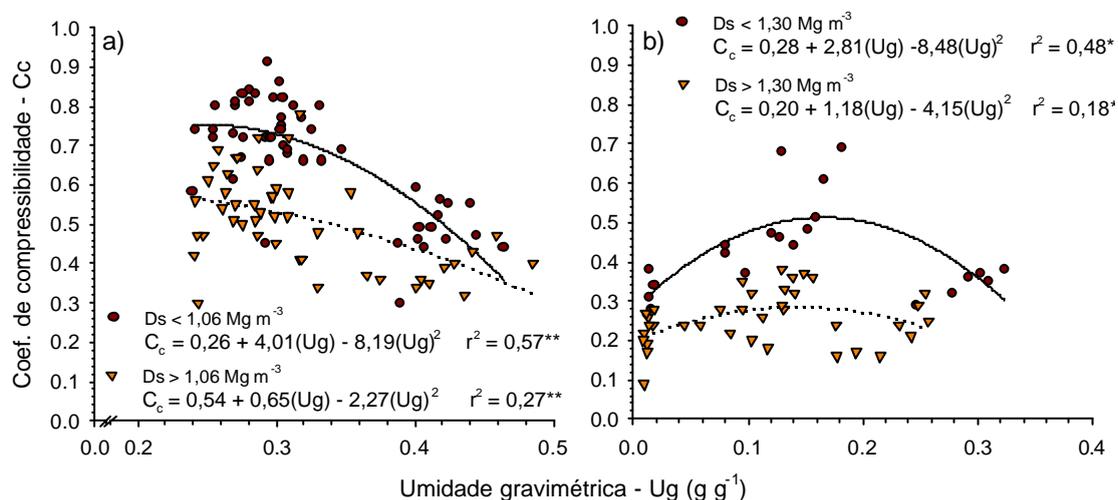


Figura 15. Coeficiente de compressibilidade como função da umidade gravimétrica do solo para duas classes de densidade, a) Nitossolo e b) Argissolo.

De maneira geral, observou-se que quanto mais denso o solo, menor é a compressibilidade em um mesmo teor de água. Para o Nitossolo, no

entanto, para os maiores teores de água estudados, os dois grupos de densidade apresentam  $C_c$  semelhante. Provavelmente isso aconteça porque nesse solo argiloso a condutividade hidráulica, mesmo nas amostras de menor densidade, seja bastante baixa.

Quando se avaliou a existência de correlação entre o coeficiente de compressão e o teor de carbono orgânico, verificou-se que para o Nitossolo essa relação foi dependente da tensão de água e da densidade das amostras (Figura 16). Provavelmente isso aconteça porque o efeito da matéria orgânica sobre a resistência do solo é dependente de seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang *et al.*, 1997).

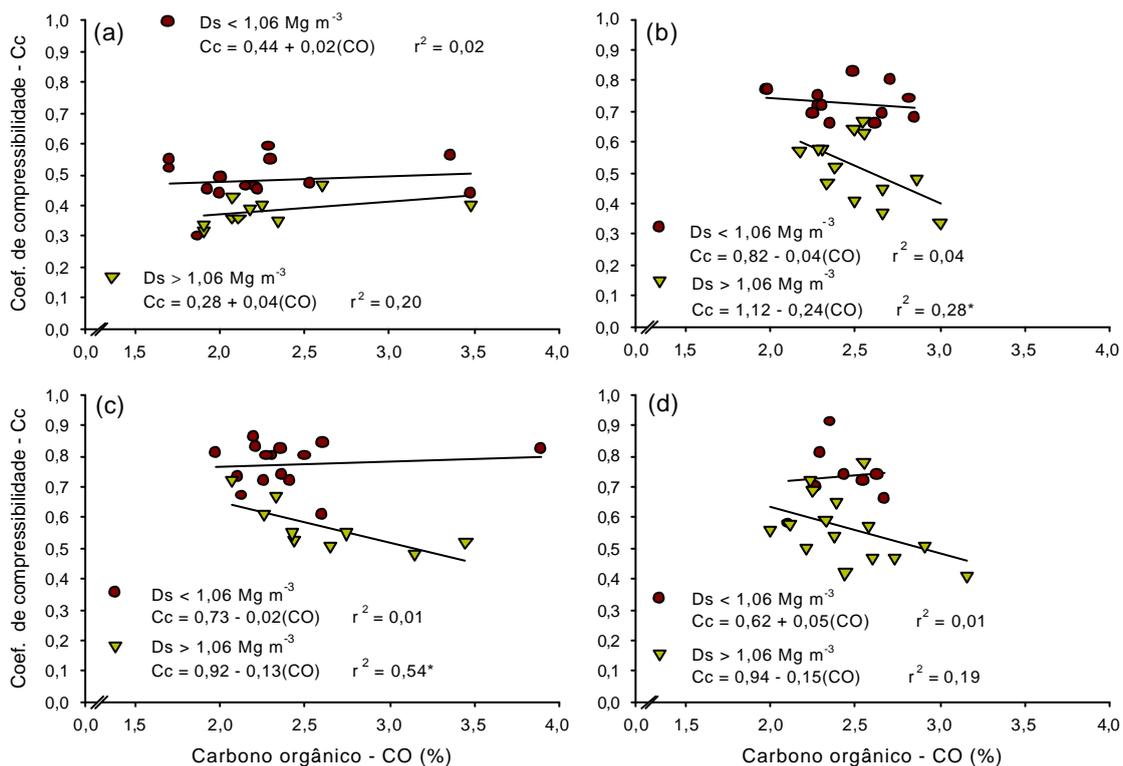


Figura 16. Coeficiente de compressibilidade em função do teor de carbono orgânico e da densidade do solo, de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a quatro tensões de água: a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d) > 500 kPa.

No grupo de menor densidade a variação do  $C_c$  independe da variação do CO, enquanto que no grupo de maior densidade o  $C_c$  torna-se menor com o incremento de CO (Figura 16). Aqui se deve lembrar que a resistência do solo à deformação é uma função do número de pontos de contato entre as partículas sólidas e da resistência desses pontos de contatos (Horn e Lebert, 1994). Assim, nas amostras de menor densidade a porosidade do solo pode estar sendo o fator preponderante na determinação da resistência à compactação, especialmente porque uma porosidade maior significa um menor número de pontos de contatos entre as partículas minerais. Com isso, mesmo que a matéria orgânica aumente a resistência dos pontos de contato, esse efeito fica prejudicado pelo reduzido número de pontos de contato existentes.

Nas amostras mais densas, com exceção das amostras mais úmidas, observa-se que o aumento do teor de matéria orgânica resultou em redução no coeficiente de compressão do solo. Tal comportamento pode ser justificado pela capacidade da MO em estabelecer e fortalecer ligações entre as partículas minerais, em função do seu elevado número de cargas superficiais e elevada área superficial específica. Assim, o incremento em MO resultaria em aumento da força das ligações e em um provável aumento do número das mesmas, entre as partículas minerais e, pelo efeito aditivo dessas ligações, em aumento da resistência do solo à deformação. Nas amostras mais úmidas isso não se manifesta porque a compressibilidade deve estar sendo limitada pela condutividade hidráulica do solo. Assim, para esse solo argiloso, nas amostras mais úmidas (6kPa) a compressibilidade é muito limitada pelo elevado grau de saturação inicial, semelhantemente ao observado por Silva et al. (2002b), impossibilitando a manifestação do efeito da matéria orgânica. Entretanto, na medida que o solo se tornou mais seco, o grau de saturação diminuiu e a compressibilidade tornou-se maior (Figura 16), permitindo a manifestação do efeito da matéria orgânica sobre a mesma.

Por outro lado, considerando o observado na Figura 15, na qual observa-se que, para a faixa de umidade trabalhada com o Nitossolo, a

compressibilidade foi sempre decrescente com o aumento da umidade, deve-se considerar a possibilidade de que o efeito da MO sobre a compressibilidade seja o resultado de seus efeitos sobre a retenção de água. Assim, um aumento do teor de MO, por resultar em aumento da quantidade de água retida em uma mesma tensão, reduziria a compressibilidade por aumentar o grau de saturação do solo levando-o a ter a compressibilidade limitada pela condutividade hidráulica. Porém, apesar de haver uma tendência de aumento da umidade gravimétrica associado ao aumento do teor de CO (Figura 17), essa relação só é significativa para as tensões de 6 e de 500 kPa. Desse modo, pode-se supor que nem todo o efeito da MO sobre a compressibilidade pode ser justificado por seus efeitos sobre a retenção de água.

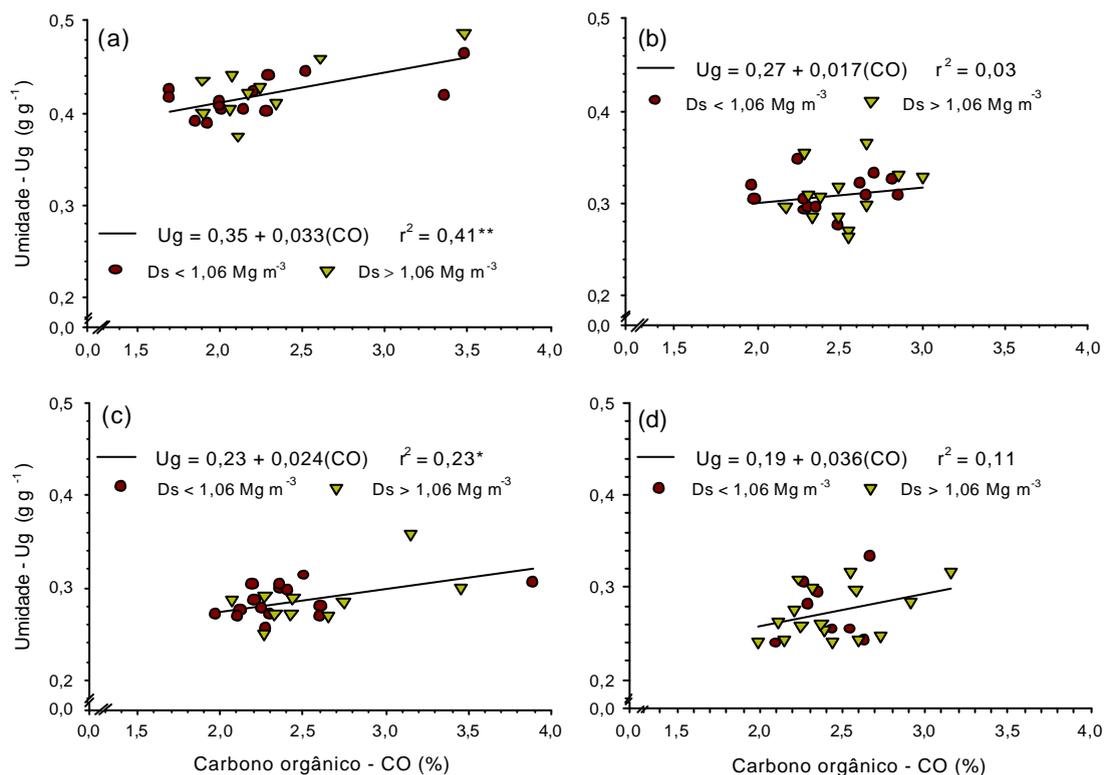


Figura 17. Umidade gravimétrica do solo em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d) > 500 kPa.

Um terceiro aspecto que poderia estar explicando o efeito da MO sobre a compressibilidade seria a existência de um aumento de densidade do solo associado ao aumento do teor de CO. Apesar desse não ser um efeito esperado da MO, isso poderia estar acontecendo porque muitas das amostras mais densas foram obtidas em parcelas de plantio direto, sistema no qual o acúmulo de MO muitas vezes ocorre concomitantemente a um aumento da densidade resultante da inexistência de revolvimento do solo.

Para todas as tensões de água estudadas o  $C_c$  decresceu linearmente com o aumento da densidade do solo (Figura 18). Entretanto, quando se avaliou a existência de correlação entre o teor de CO e a densidade do solo, separando as amostras por grupo de tensão e de densidade, verificou-se que, apesar de existir uma tendência de aumento da densidade associado ao aumento do teor de CO, isso, mais uma vez, não mostrou significância estatística (Figura 19).

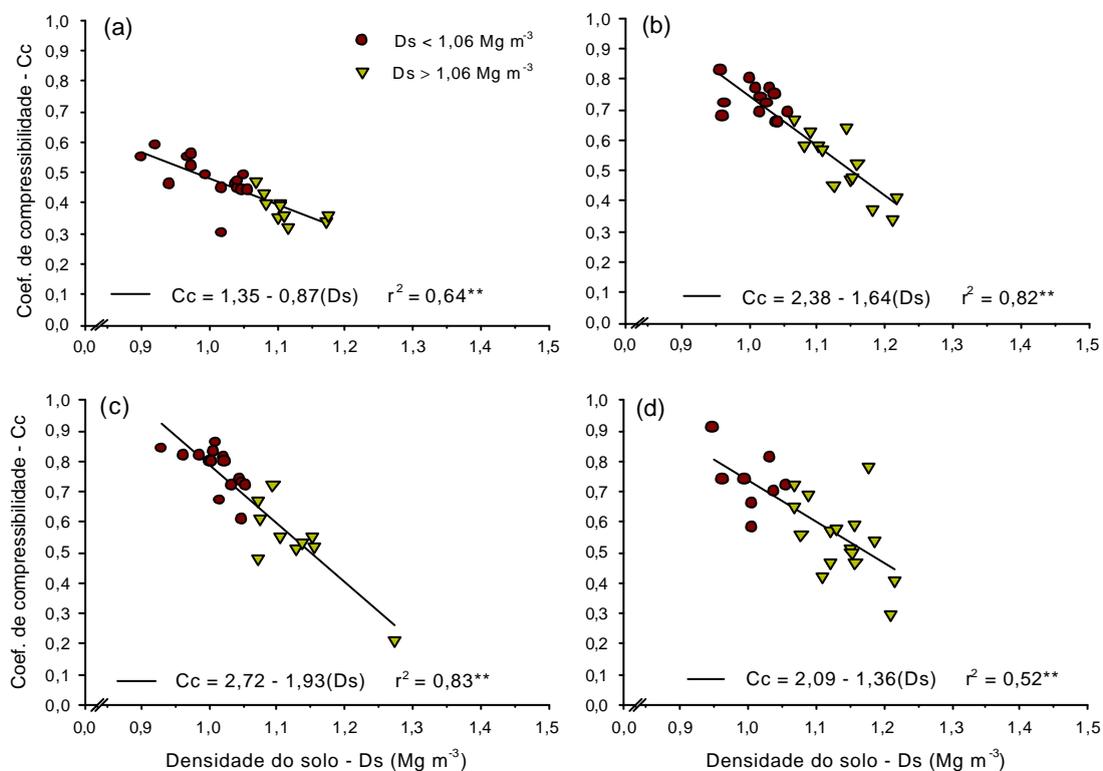


Figura 18. Coeficiente de compressibilidade do solo em função da densidade de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d) > 500 kPa.

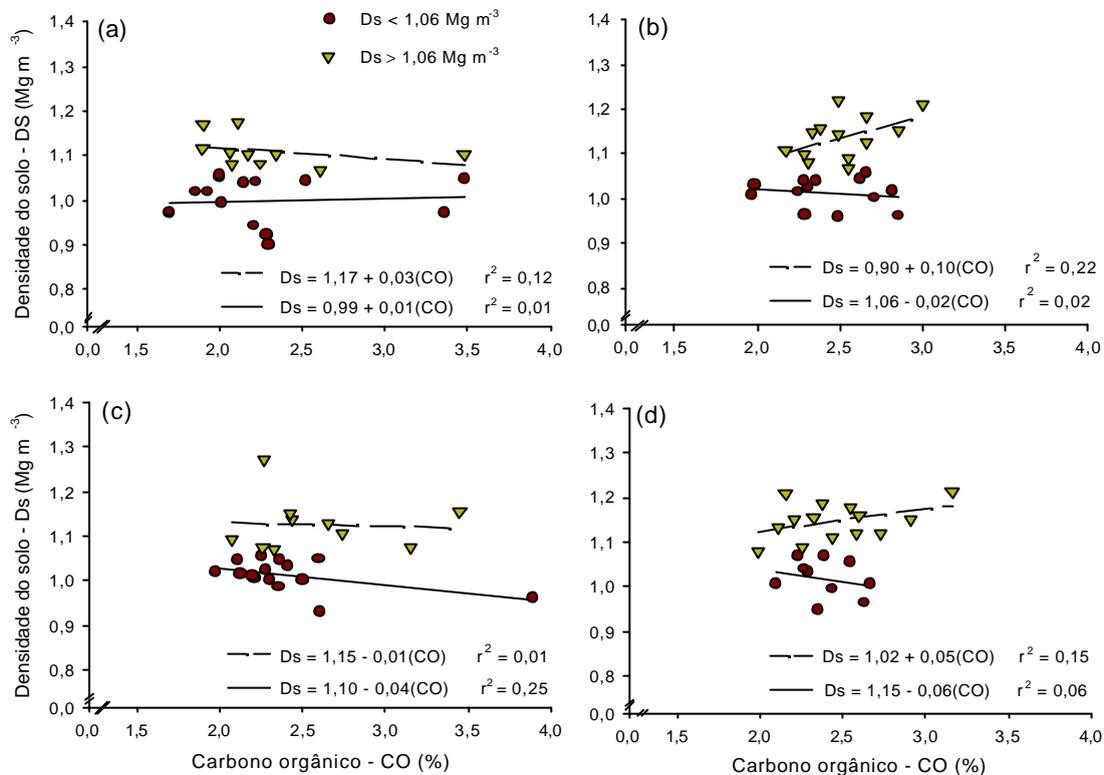


Figura 19. Densidade do solo em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água. a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d) > 500 kPa.

Portanto, o efeito da MO sobre a compressibilidade, observado para as amostras do Nitossolo com densidade maior que 1,06 Mg m<sup>-3</sup> (Figura 16), não pode ser explicado totalmente por seus efeitos isolados, quer sejam os efeitos diretos sobre a coesão, ou aqueles indiretos resultantes de seus efeitos sobre a retenção de água ou densidade do solo.

No caso do Argissolo (Figura 20), ao contrário do Nitossolo, verificou-se que, independentemente da tensão da água das amostras, o aumento do teor de CO resultou em aumento da compressibilidade do solo. Para verificar se a densidade das amostras poderia estar afetando essa relação, procedeu-se como para as amostras do Nitossolo, dividindo as amostras em dois grupos conforme a densidade das mesmas (Figura 21). Utilizando-se como parâmetro o valor de 1,30 Mg m<sup>-3</sup> que corresponde ao valor médio da densidade determinada em todas as amostras.

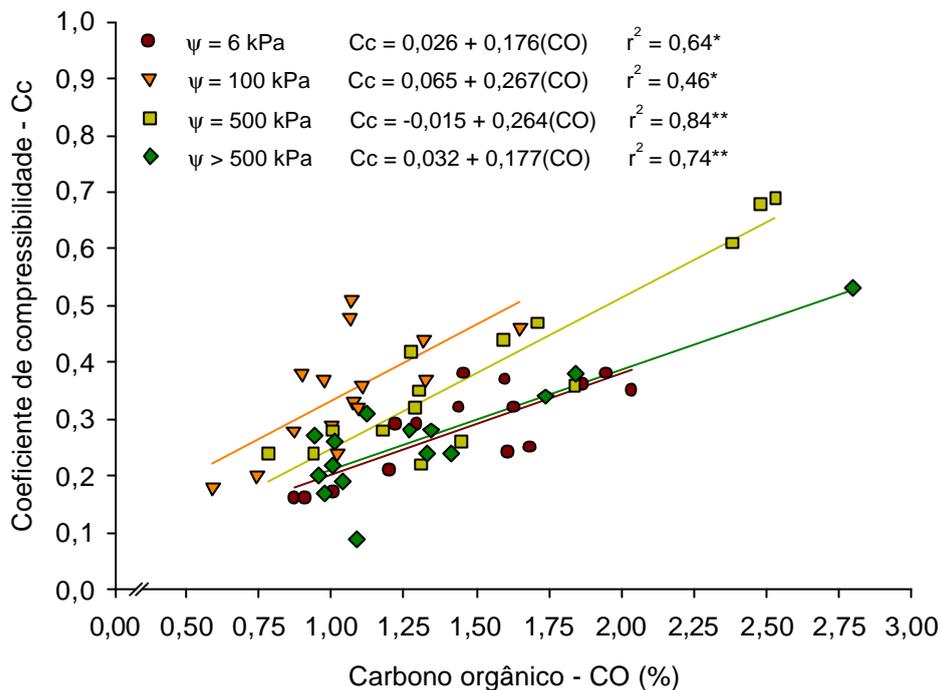


Figura 20. Coeficiente de compressibilidade como função do teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ ).

Esse agrupamento das amostras em função da densidade (Figura 21), ao contrário do observado no Nitossolo, não mudou a tendência, em nenhuma condição de umidade, do incremento de CO aumentar a compressibilidade do solo. Isso provavelmente acontece porque, para esse solo, o incremento de matéria orgânica resultou sempre em diminuição da densidade do solo, o que pode ser facilmente observado na Figura 21, onde os pontos com maior teor de CO são os de maior compressibilidade e pertencem ao grupo das amostras com densidade menor que  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ . O mesmo não se observou para o Nitossolo, como já discutido, onde muitas vezes os maiores teores de CO pertencem ao grupo de maior densidade. Essa suposição pode ser confirmada observando-se a Figura 15, na qual é mostrada a relação entre o teor de CO e a densidade do solo e onde é possível observar que, para o Argissolo, o incremento em CO resultou em decréscimo da densidade. Os valores médios de  $D_s$ , CO e  $C_c$  em função da classe de densidade das amostras são mostrados na Tabela 6, onde se observa que, para o Argissolo,

as amostras de menor densidade estão associadas a um maior teor médio de CO, enquanto que para o Nitossolo ocorre o contrário.

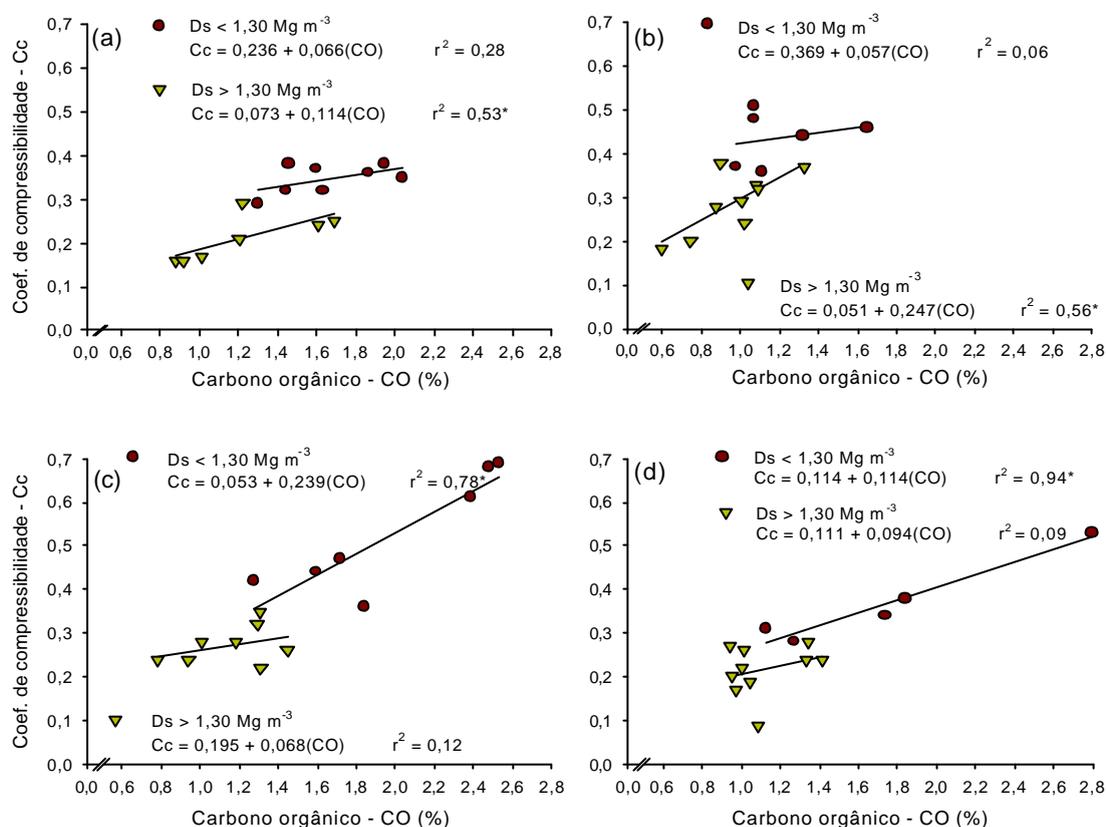


Figura 21. Coeficiente de compressibilidade em função do teor de carbono orgânico e da densidade do solo, de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a quatro tensões de água: a) 6 kPa; b) 100 kPa; c) 500 kPa; e d) > 500 kPa.

Tabela 6. Densidade do solo média (Ds), teor de carbono orgânico médio (CO) e coeficiente de compressibilidade médio (Cc) em função da classe de densidade, para um Nitossolo Vermelho distrófico e um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Solo	Classe de densidade	Número de amostras	Ds	CO	Cc
	---- $\text{Mg m}^{-3}$ ----		-- $\text{Mg m}^{-3}$ --	---- % ----	
Nitossolo	< 1,06	51	1,008	2,37	0,67
	= 1,06	49	1,130	2,46	0,51
Argissolo	< 1,30	21	1,195	1,66	0,42
	= 1,30	37	1,388	1,10	0,25

Por outro lado, no caso do Argissolo, espera-se que o efeito da matéria orgânica sobre a resistência dos pontos de contatos entre as partículas minerais não seja tão significativo quanto no Nitossolo, uma vez que as partículas de areia apresentam uma reatividade menor que a das partículas de argila, impedindo o desenvolvimento de ligações fortes entre elas e a matéria orgânica.

### ***Elasticidade do solo***

A elasticidade do solo, medida pelo índice de relaxação ( $I_r$ ) ou pelo coeficiente de descompressão ( $C_d$ ), foi significativamente afetada pela variação da tensão de água das amostras, nos dois solos estudados (Tabela 4 - página 42). Para o Nitossolo, o  $I_r$  foi maior para a tensão de água de 6 kPa em relação às demais tensões (100, 500 e > 500 kPa), que não se diferenciaram entre si. Na tensão de água de 6 kPa, o  $C_d$  foi superior ao obtido com a tensão de 100 kPa e esse foi superior aos obtidos nas tensões de 500 e > 500 kPa, que não se diferenciaram. No caso do Argissolo, com relação ao  $I_r$ , as tensões de 6 e > 500 kPa não se diferenciaram, mas foram superiores às tensões de 100 e 500 kPa que, também, não se diferenciaram. Quando se avaliou a elasticidade através do  $C_d$ , no caso do Argissolo, a mesma foi maior para a tensão de 6 kPa, seguida da tensão de 500 kPa, que foi semelhante à tensão de 100 kPa. A tensão 500 resultou no menor  $C_d$ , mas não se diferenciou da tensão de 100 kPa.

A maior elasticidade observada nas amostras com a menor tensão de água pode ser explicada pelo fato da elasticidade do solo ser dependente de dois fatores: a) da elasticidade do material que compõe o solo e b) do aprisionamento de bolhas de ar comprimido que se expandem quando cessa a aplicação da carga. No solo mais úmido (tensão de 6 kPa), a maior quantidade de água dificulta a expulsão do ar existente nos poros da amostra, aumentando o confinamento de bolhas de ar e, portanto, aumentando a elasticidade do solo.

Entretanto, para o Argissolo o índice de relaxação foi semelhante na maior e na menor tensão de água, mas isso não ocorreu para o coeficiente de descompressão. Provavelmente os altos valores para o  $I_r$  observados nas amostras mais secas sejam devidos à menor deformação que essas amostras sofreram e, assim, mesmo uma pequena expansão após a remoção da carga resultou em valores percentuais elevados. Para o Nitossolo, esse comportamento não foi observado, provavelmente porque para esse solo não se obtiveram valores baixos de umidade, quando comparamos com o Argissolo.

Com base nessas observações iniciais realizou-se a um estudo de correlação entre os índices de elasticidade do solo e o grau de saturação do mesmo, considerando duas classes de densidade conforme feito para a compressibilidade. As relações matemáticas obtidas são mostradas nas Figuras 22 e 23, respectivamente para o Nitossolo e o Argissolo.

As curvas das Figuras 22 e 23 confirmam que a elasticidade aumenta quando o solo torna-se mais úmido porque, como dito anteriormente, provavelmente nessa situação aumenta o aprisionamento de bolhas de ar no interior do solo. Quando se comparou as classes de densidade, para os dois solos, se percebe que o solo mais denso tem uma maior recuperação percentual do volume depois de cessar a aplicação da carga, mas que isso não é reflexo de um maior coeficiente de descompressão. A razão para isso, provavelmente, é que nas amostras mais densas a deformação é menor e, assim, mesmo uma pequena recuperação de volume pode significar um valor percentual elevado. Essa suposição pode ser confirmada através da avaliação dos valores absolutos do decréscimo da densidade do solo após a remoção da carga aplicada sobre o solo, em função do seu grau de saturação. Em inglês esse fenômeno é denominado *rebound* (Stone & Larson, 1980) enquanto que neste texto adotaremos a expressão *redução da densidade*. Na Figura 24 se pode ver claramente que no solo mais denso a redução da densidade é menor do que no solo menos denso, confirmando a suposição de que o maior

percentual de recuperação é função da menor deformação durante o carregamento e não de uma maior recuperação após o descarregamento.

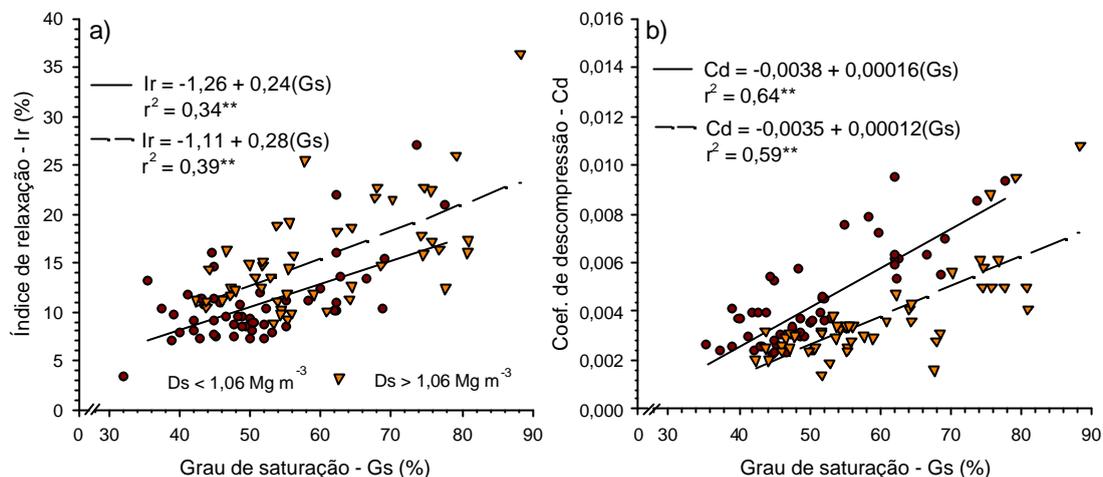


Figura 22. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) de um Nitossolo, em função da densidade e do grau de saturação do solo.

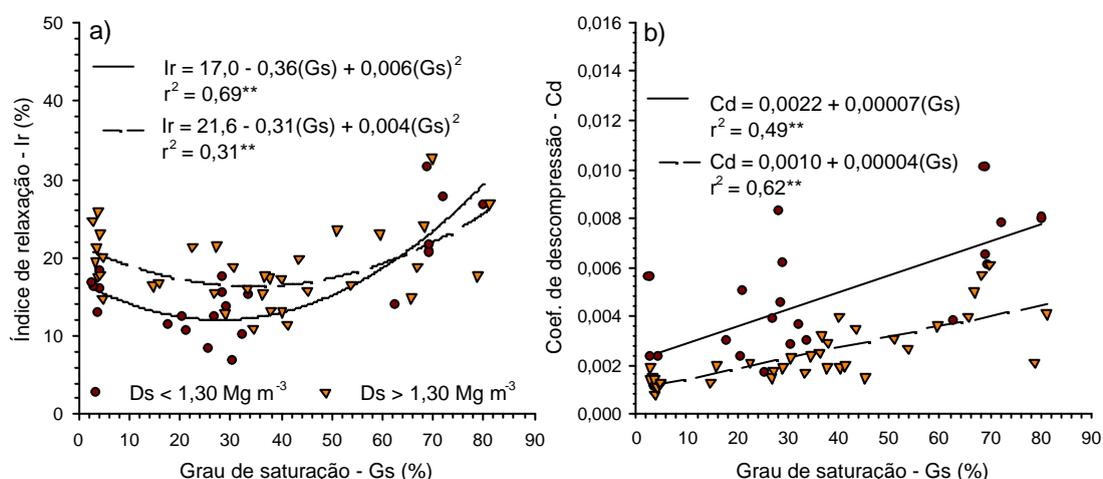


Figura 23. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) de um Argissolo, em função da densidade e do grau de saturação do solo.

O material orgânico, em função de sua flexibilidade e elasticidade, tem uma grande capacidade de recuperação da forma após a remoção de uma carga aplicada sobre ele (Soane, 1990). Essas características permitiriam que as partículas orgânicas, que ligam partículas minerais, sejam deformadas quando as partículas minerais são deslocadas durante a aplicação de uma

carga, sem que as ligações se rompam totalmente. Ao cessar a aplicação da carga, as partículas orgânicas tenderiam a retornar à forma original, deslocando consigo as partículas minerais, resultando em expansão do solo após o descarregamento.

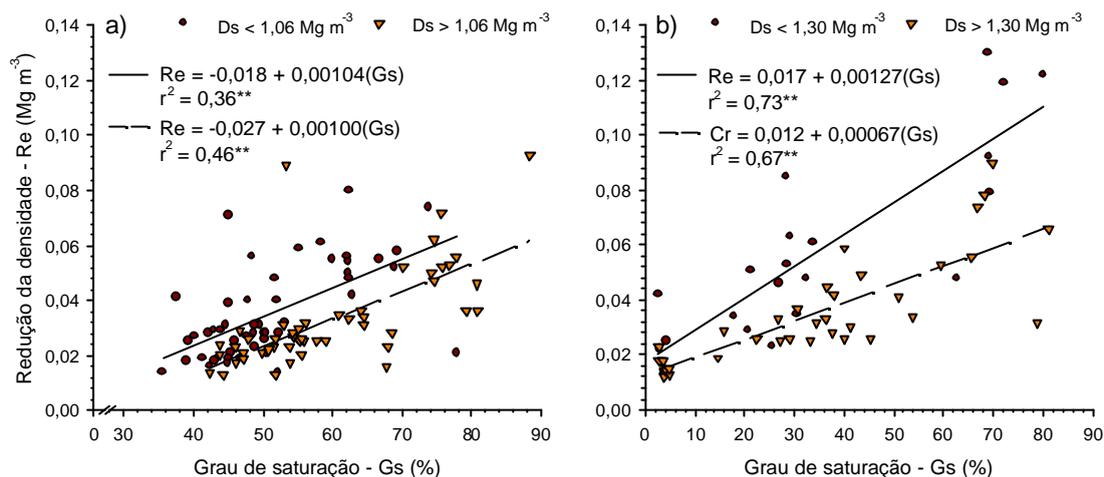


Figura 24. Redução da densidade do solo (Rebound) após o descarregamento em função do grau de saturação de um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b), para duas classes de densidade.

Nas Figuras 25 e 26, respectivamente para o Nitossolo e para o Argissolo, são mostradas as relações entre a elasticidade do solo e o teor de CO dos solos. Para o Nitossolo, o incremento de CO resultou em aumento significativo da elasticidade do solo em todas as tensões de água, com exceção para o Cd na tensão > 500 kPa.

Para o Argissolo, o incremento de CO resultou em aumento do Ir somente nas amostras mais úmidas, enquanto nas demais houve um decréscimo do Ir, mas em nenhum caso observou-se correlação significativa. O coeficiente de descompressão aumentou significativamente em todas as tensões de água quando o teor de CO cresceu. Provavelmente, isso aconteceu porque nesse solo o aumento do teor de CO foi acompanhado de uma diminuição da densidade o que resultou, nas amostras mais ricas em CO, em uma maior deformação. Assim, mesmo que o Cd dessas amostras tenha

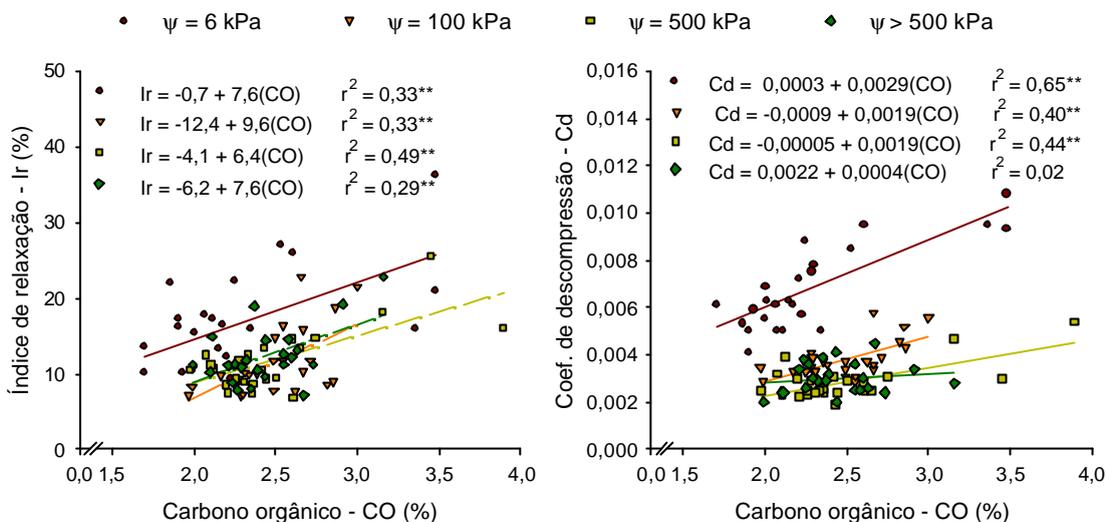


Figura 25. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) em função do teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ ).

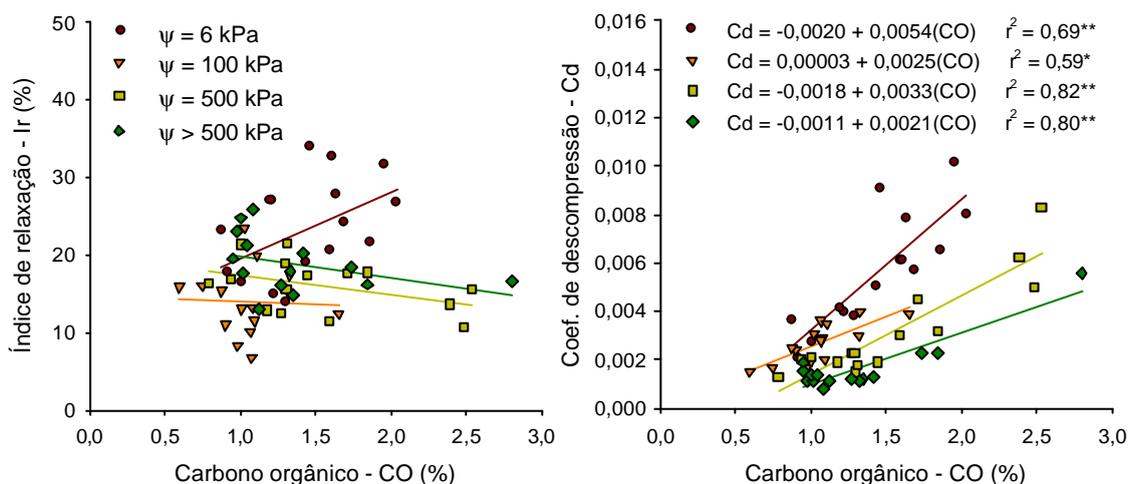


Figura 26. Índice de relaxação (a) e coeficiente de descompressão (b) em função do teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 4 tensões de água ( $\psi$ ).

aumentado, a recuperação percentual do volume não foi tão grande quanto em amostras que deformaram menos. Novamente, essa suposição foi confirmada quando se avaliou os valores absolutos da redução da densidade após a remoção das cargas, como mostrado na Figura 27. A variação da densidade após a remoção das cargas cresceu linearmente com o aumento do teor de CO do solo em todas as tensões e para os dois solos estudados. Na Tabela 7 são

apresentados, para cada tensão e solo, os valores dos parâmetros da equação linear ajustada aos dados observados, conforme o modelo:

$$Re = l + m(CO) \quad [12]$$

onde:  $Re$  = redução da densidade após remoção da carga aplicada sobre o solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

$l$  e  $m$  = parâmetros e ajuste;

$CO$  = teor de carbono orgânico (%).

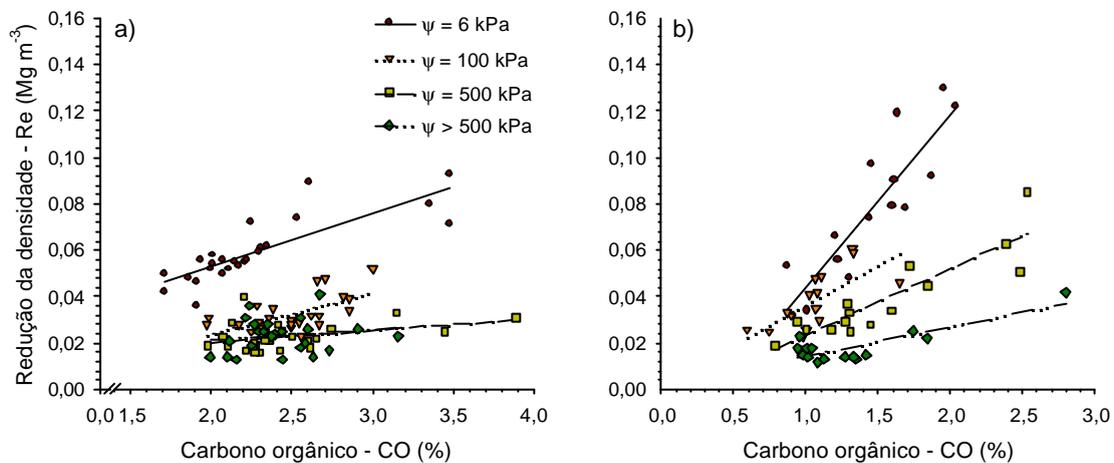


Figura 27. Redução da densidade após o descarregamento do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e para um Argissolo Vermelho Amarelo arênico (b) submetidos a 4 tensões de água ( $\psi$ ).

De maneira geral, a redução da densidade do solo após a remoção das cargas aplicadas foi sensivelmente afetada pela variação do teor de CO do solo, assim como, pela umidade e pela densidade. Entretanto, os valores médios observados foram inferiores a  $0,08 \text{ Mg m}^{-3}$ , corroborando as observações de Stone & Larson (1980) e Macedo (1993), que observaram reduções inferiores a  $0,05$  e  $0,03 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Para os autores esses valores são negligíveis, podendo ser desconsiderados em modelos matemáticos para previsão da compactação do solo.

Tabela 7. Valores médios da redução da densidade e do teor de carbono orgânico e valores dos parâmetros e do coeficiente de determinação da Equação [12] em função da tensão de água no solo, para amostras de um Nitossolo Vermelho distrófico e de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Solo/tensão	CO	Re	a	b	R <sup>2</sup>
Nitossolo	-- % --	Mg m <sup>-3</sup>			
6 kPa	2,27	0,059a <sup>1/</sup>	-0,007	0,023	0,68**
100 kPa	2,47	0,032b	-0,011	0,017	0,38*
500 kPa	2,49	0,023c	0,010	0,005	0,15
> 500 kPa	2,44	0,023c	0,012	0,004	0,03
Argissolo					
6 kPa	1,45	0,078A	-0,030	0,075	0,78**
100 kPa	1,06	0,038B	-0,002	0,034	0,49**
500 kPa	1,54	0,039B	-0,005	0,028	0,80**
> 500 kPa	1,33	0,018C	-0,002	0,013	0,67**

1/ Médias seguidas de mesma letra são estatisticamente iguais pelo teste DMS com 5% de significância.

## Conclusões

O acúmulo de matéria orgânica no solo está associado a alterações da pressão de pré-consolidação, compressibilidade e elasticidade do solo. A magnitude e o tipo de efeito, no entanto, é dependente da textura do solo e de efeitos associados sobre a retenção de água, coesão e densidade do solo.

No presente estudo, resumidamente, foi observado que:

1. Para um mesmo teor de água, especialmente no solo argiloso, o incremento de CO resultou em aumento da pressão de pré-consolidação.

2. Para o solo arenoso o enriquecimento de CO resultou sempre em aumento da compressibilidade do solo. Para o solo argiloso com densidade superior a 1,06 Mg m<sup>-3</sup>, o incremento de CO foi associado a uma redução da compressibilidade, enquanto que em amostras com densidade menor a esse valor a compressibilidade foi independente do teor de CO.

3. O acúmulo de CO no solo resultou em aumento significativo da elasticidade do solo. Entretanto, a redução média da densidade, observada após a remoção das cargas aplicadas sobre o solo, foi inferior a  $0,08 \text{ Mg m}^{-3}$ .

# ESTUDO III. “PARÂMETROS DO CISALHAMENTO E TEOR DE CARBONO ORGÂNICO DE UM NITOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO E DE UM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO ARÊNICO”.

## Introdução

A determinação dos parâmetros do cisalhamento pode ser útil na agricultura para a avaliação da capacidade de suporte (Olu et al., 1986) e da resistência à tração do solo (Balastreire, 1987) e, conseqüentemente, na definição de máquinas e equipamentos mais apropriados para o manejo do mesmo; como indicador do estado de compactação (Schjonning, 1991); e na avaliação da susceptibilidade ao voçorocamento e, portanto, no estudo de técnicas que visem a estabilidade de taludes (Rocha et al., 2002).

A resistência ao cisalhamento do solo pode ser expressa pela equação de Coulomb (Equação 6 -  $t = c + \sigma \tan \phi$ ), que define a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo. Nessa equação, os parâmetros  $c$  e  $\phi$  representam, respectivamente, a coesão entre as partículas do solo e o coeficiente de atrito entre as mesmas. Esses parâmetros são características intrínsecas do solo, pois são dependentes de outras propriedades e atributos seus, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e conteúdo de água (Lebert & Horn, 1991; Schjonning, 1991; Zhang, 1994; Rocha et al., 2002).

O sistema de plantio direto, onde o revolvimento do solo é praticamente inexistente, permite que, após alguns anos de cultivo, o solo adquira uma estrutura caracterizada por apresentar agregados mais densos e resistentes e que estão mais próximos entre si (Chaney e al., 1985). Além disso, nesse sistema observa-se um aumento do teor de matéria orgânica do solo, especialmente na camada superficial (Machado & Brum, 1978; Centurion

*et al.*, 1985; Merten & Mielniczuk, 1991; Ismail *et al.*, 1994; Bayer & Mielniczuk, 1997; Corazza *et al.*, 1999; Amado *et al.*, 2001).

Essas alterações permitem que o solo se torne mais resistente, sendo capaz de suportar o tráfego sem apresentar deformação significativa. Essa maior resistência, geralmente, é associada ao aumento da densidade do solo, mas é possível que parte desse efeito seja devido ao incremento de matéria orgânica, especialmente pela influência desta sobre a coesão entre as partículas do solo.

A matéria orgânica atua sobre os parâmetros do cisalhamento de diferentes formas. Basicamente, espera-se um aumento da coesão entre as partículas do solo, resultante do aumento da força das ligações e/ou estabelecimento de novas ligações entre as mesmas, seja pelas características físicas e químicas das moléculas orgânicas, seja em função de “amarrações” de partículas produzidas por filamentos orgânicos como hifas de fungos e raízes (Soane, 1990).

Quando produz redução da densidade do solo, a matéria orgânica pode produzir reduções no ângulo de atrito interno, por reduzir o número de pontos de contato entre as partículas e, ainda, por ser um material mais flexível e de menor dureza que as partículas minerais. No entanto, em baixos teores de água, as substâncias orgânicas, por reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas (Soane, 1990; Zhang & Hartge, 1990).

De fato, a matéria orgânica pode ser associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: a) aumento da força de ligação entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (diminuição da densidade) (Ekwue, 1990; Zhang, 1994, Horn & Lebert, 1994). O aumento ou redução da resistência do solo dependerá do balanço entre seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang *et al.*, 1997).

Assim, na literatura se encontram resultados divergentes, mostrando situações em que maiores teores de matéria orgânica são acompanhados de diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (Ohu et

al., 1985; Ohu et al., 1986; Ekwue, 1990) e, outros, nos quais essa aumenta (Davies, 1985; Ekwue,1990). Provavelmente, essas diferenças são função da origem da matéria orgânica (Ekwue, 1990), do tempo decorrido após a incorporação da matéria orgânica, do teor de água no solo (Davies, 1985; Zhang & Hartge, 1990) e textura do solo. Considerando, ainda, que o comportamento mecânico do solo é dependente do comportamento mecânico de seus agregados (Horn, 1990), é possível que parte dos resultados divergentes existentes na literatura sejam produzidos por diferenças estruturais existentes nas amostras avaliadas.

Para solos agregados, a envoltória de Mohr do solo pode ser dividida em dois segmentos, com declividades e interceptos diferentes e, segundo Lebert & Horn (1991), isso está relacionado à resistência dos agregados do solo. Assim, uma primeira envoltória mais inclinada e com intercepto menor, representaria a envoltória de ruptura definida pelo atrito e coesão interagregados (maior atrito e menor coesão), enquanto que a segunda envoltória seria definida pelo atrito e coesão intraagregados (menor atrito e maior coesão), que só se manifestariam quando os agregados são rompidos, ou seja, quando se empregam tensões normais maiores que a resistência dos agregados.

O presente estudo foi proposto com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento de um Argissolo e de um Nitossolo, com diferentes teores de carbono orgânico, buscando verificar se os parâmetros do cisalhamento são afetados sensivelmente pelo acúmulo de matéria orgânica no solo.

## **Material e Métodos**

O presente estudo foi realizado a partir de amostras tomadas em dois solos, sendo um Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa. As amostras foram coletadas em duas áreas experimentais, buscando-se uma ampla

variação do teor de carbono orgânico em cada um dos solos. O Nitossolo foi amostrado em um experimento no qual estão sendo avaliadas combinações de sistemas de manejo do solo e dos resíduos culturais e insumos orgânicos, localizado na Estação Experimental da EPAGRI, no município de Campos Novos – SC (Veiga & Pandolfo, 1998). O Argissolo foi amostrado em um experimento cujos tratamentos constituíam-se de combinações de doses de esterco líquido de suínos e plantas de cobertura no sistema de plantio direto, instalado na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, no município de Santa Maria – RS (Giacomini, 2001).

No experimento de Campos Novos, foram escolhidas 11 parcelas nas quais foram coletadas amostras superficiais (0 a 3 cm de profundidade), em caixas de cisalhamento (5 cm de lado e 2 cm de altura), com estrutura preservada. Num primeiro momento, em dezembro de 2001, foram coletadas 9 amostras por parcela que, depois, no laboratório foram divididas em 3 conjuntos de 3 amostras, sendo um deles posto para equilibrar na tensão de 6 kPa na mesa de tensão, enquanto os outros 2 foram equilibrados nas tensões 100 e 500 kPa, em placas cerâmicas. Depois de equilibrada a umidade, cada conjunto de 3 amostras foi submetido ao ensaio de cisalhamento direto, usando-se pressões normais de 48,9; 98,2 e 196,4 kPa.

Num segundo momento, cerca de 8 meses depois da primeira coleta, foram coletados 2 conjuntos de 7 amostras em 1 parcela, totalizando 14 amostras. Essas amostras foram equilibradas na tensão de 500 kPa (placa cerâmica) e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, no qual se empregaram pressões normais de 24,4; 48,9; 98,2; 196,4; 294,6; 392,8 e 491,8 kPa. Coletou-se, ainda, uma amostra com estrutura deformada que, depois de seca ao ar, foi peneirada separando-se agregados pertencentes as seguintes classes de diâmetro: < 0,25; 0,25 – 0,50, 0,50 – 1,00; 1,00 – 2,00 e 2,00 – 4,00 mm. Esses agregados foram umedecidos com cerca de 30% de água, buscando atingir uma umidade semelhante à umidade média observada nas amostras com estrutura preservada e submetidas à tensão de 500 kPa. Com esses agregados foram realizados ensaios de cisalhamento direto,

empregando-se pressões normais de 24,4; 48,9; 73,5; 147,3; 294,6; 441,9; 589,2 e 736,6 kPa. Para cada pressão normal, utilizou-se uma porção de 72 g de agregados úmidos, colocados diretamente na caixa do aparelho de cisalhamento.

Para o Argissolo, foram coletadas amostras em 4 parcelas do experimento de Santa Maria e em uma área de pousio ao lado do mesmo, todas na camada superficial (0 a 3 cm de profundidade). Em novembro de 2002 fez-se a primeira coleta, na qual foram tomadas 18 amostras por parcela, totalizando 90 amostras (18 amostras em 5 parcelas). No laboratório as amostras obtidas em cada parcela foram divididas em conjuntos de 6 amostras que, depois de equilibradas nas tensões de 6, 100 ou 500 kPa, foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. Nesses ensaios, utilizaram-se pressões de 13,6; 27,3; 54,8; 148,4; 295,7 e 443,0 kPa. Com base nos resultados obtidos com as amostras da primeira coleta, efetuou-se uma segunda coleta, em abril de 2003, tomando-se 60 amostras (12 amostras por parcela) que, depois de equilibradas na tensão de 6, 100 ou 500 kPa, foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto com as pressões normais de 27,3; 54,8; 148,4 e 295,7 kPa.

Nos ensaios de cisalhamento direto empregou-se uma velocidade de deslocamento horizontal de  $0,25 \text{ mm min}^{-1}$ , com um deslocamento horizontal máximo de 15 mm. As cargas normais foram aplicadas 5 minutos antes de iniciar efetivamente o ensaio de cisalhamento. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito interno, foram calculados conforme proposto por Lambe & Witman (1979). No caso dos ensaios em que se verificou efeito dos agregados sobre a envoltória de resistência, estimou-se a resistência dos agregados conforme a metodologia proposta por Lebert & Horn (1991).

Para estimar o conteúdo de matéria orgânica do solo todas as amostras, de ambos os solos, foram submetidas à análise do teor de carbono orgânico (EMBRAPA, 1979). Foram calculadas, ainda, a densidade do solo, a umidade gravimétrica, o grau de saturação e a porosidade total de cada

amostra, com base em pesagens realizadas, na densidade de partículas de cada solo e nas dimensões das caixas de cisalhamento.

Para a análise estatística, considerou-se um delineamento completamente casualizado, com 3 tratamentos (3 tensões de água) e 11 repetições no caso do Nitossolo e 10 repetições no caso do Argissolo. Para a análise da variância da variável coesão, que apresentou valores iguais a zero, os dados foram transformados fazendo-se  $y' = \sqrt{y + 0,5}$ . Também foram realizados estudos de correlações entre as diversas variáveis, fazendo-se o ajuste de equações através do programa Sigma Plot® 8.0. Os ajustes significativos são indicados por asteriscos colocados junto ao coeficiente de determinação das equações, sendo um e dois asterisco para os níveis de 5% e 1%, respectivamente.

## Resultados e Discussão

As envoltórias de resistência ao cisalhamento do Nitossolo Vermelho distrófico, médias para cada tensão de água utilizada, são apresentadas na Figura 28. Os valores médios para densidade do solo, teor de carbono orgânico, umidade gravimétrica, grau de saturação, porosidade total, ângulo de atrito interno e coesão são apresentados na Tabela 8. Os valores obtidos com cada conjunto de 3 amostras estão listados no Anexo E.

O ângulo de atrito interno não foi afetado pela tensão de água das amostras, sendo que foram observados valores entre 22° e 52° (Anexo E), enquanto que a coesão se tornou maior à medida que aumentou a tensão da água no solo. Quando comparou-se os valores de  $f$  com resultados encontrados na bibliografia, verificou-se que os mesmos são relativamente altos para um solo argiloso. Dias (1989), em trabalho com Latossolos argilosos do Rio Grande do Sul e do Paraná, relata valores variando entre 16 e 30°, tanto para solo saturado como para solo não saturado. Para solos arenosos, o autor observou valores entre 28 e 30°. Rocha et al. (2002) observaram valores entre 6 e 24° para um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa equilibrado

na tensão de água de 0,01 Mpa, enquanto Carpenedo (1994) observou valores entre 9 e 16 graus para um Latossolo Roxo distrófico argiloso.

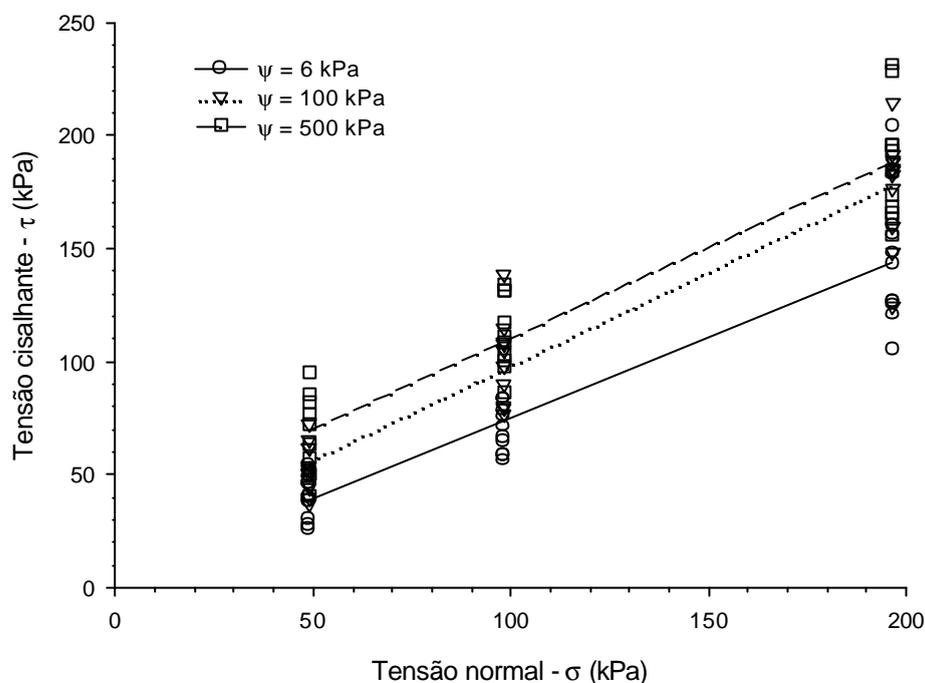


Figura 28. Envolvórias de resistência ao cisalhamento de um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a 3 tensões de água ( $\psi$ ).

Tabela 8. Densidade do solo ( $D_s$ ), teor de carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica ( $U_g$ ), grau de saturação ( $G_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) de um Nitossolo Vermelho distrófico, em função da tensão de água nas amostras (médias de 11 repetições).

Tensão	$D_s$	CO	$U_g$	$G_s$	$P_t$	$\phi$	$c$
kPa	$Mg\ m^{-3}$	%	$g\ g^{-1}$	%	%	$^{\circ}$	kPa
6	1,133	3,35a <sup>1</sup>	0,34 <sup>a</sup>	65,4a	0,596	35,1	8,5b
100	1,110	2,48b	0,30b	54,4b	0,604	39,3	15,0ab
500	1,110	3,09a	0,28b	51,4b	0,604	38,6	28,9 <sup>a</sup>

1. Letras iguais na mesma coluna, indicam médias semelhantes pelo teste LSD com 5% de significância. Ausência de letras indica ausência de variância significativa em função das tensões estudadas.

Considerando as observações de Lebert & Horn (1991) sobre o efeito da resistência dos agregados sobre a envoltória de resistência ao

cisalhamento, realizou-se uma avaliação para verificar se os ângulos de atrito obtidos aqui não seriam referentes ao atrito entre os agregados do solo, uma vez que esse solo se caracteriza por apresentar, na camada superficial, uma estrutura pequena e forte formada por pequenos agregados granulares muito resistentes e com superfície rugosa, algumas vezes descrita como “grumosa”. Esses agregados, muitas vezes, comportam-se como grãos de areia, o que explicaria a observação de ângulos de atrito interno maiores do que os geralmente descritos na literatura para solos argilosos, como visto anteriormente.

Assim, realizou-se um conjunto de ensaios de cisalhamento direto, usando pressões normais de até 750 kPa, em amostras com estrutura preservada e em amostras constituídas apenas de agregados de diversas classes de tamanho, buscando verificar se a envoltória de Mohr desse solo pode ser dividida em duas partes como sugerem Lebert & Horn (1991) e se isso pode ser explicado pelo tipo de agregado existente no mesmo. Os resultados desses ensaios são mostrados na Figura 29, onde se observa claramente a existência de 2 segmentos nas envoltórias obtidas. Comportamento semelhante foi observado por Carpenedo (1994) e Gaggero (1998).

O primeiro segmento compreende pressões normais de até 300 kPa e o segundo, pressões normais iguais ou superiores a esse valor (Figura 29). Segundo Lebert e Horn (1991), a pressão normal correspondente ao ponto de inflexão da envoltória, ponto de cruzamento do primeiro com o segundo segmento, seria a resistência dos agregados do solo. Quando se utiliza cargas normais menores que esse valor, os agregados permanecem intactos e a envoltória é definida pelo atrito e a coesão entre os mesmos, resultando em um ângulo de atrito maior, em função da rugosidade superficial e do tamanho dos agregados, e em uma coesão menor, já que o número de pontos de contato e a força das ligações nesses pontos são menores do que nos espaços intraagregados. Quando se aplicam pressões normais maiores que a resistência dos agregados, esses se rompem e a envoltória de cisalhamento

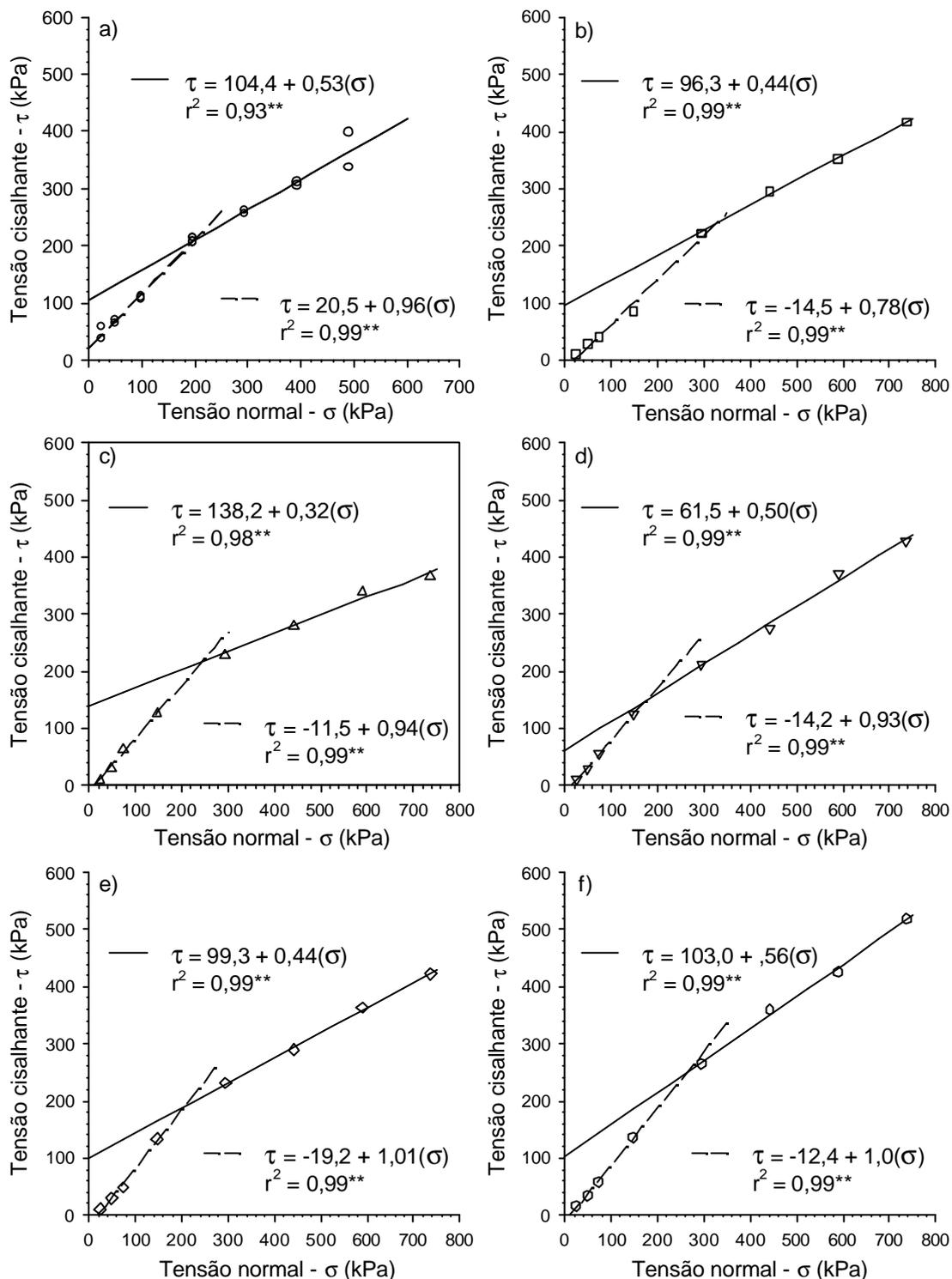


Figura 29. Envoltória de resistência ao cisalhamento de um Nitossolo Vermelho distrófico, em amostras com estrutura preservada (a) e em amostras de agregados de diferentes classes de tamanho: b) < 0,25 mm; c) 0,25 a 0,50 mm; d) 0,50 a 1,00 mm; e) 1,00 a 2,00 mm; e f) 2,00 a 4,00 mm.

passa a ser definida pela coesão e atrito entre as partículas primárias do solo. Nesse caso a coesão é maior, em função da maior interação entre as partículas primárias, e o ângulo de atrito interno é menor devido à reduzida rugosidade e ao menor tamanho das partículas (Lebert e Horn, 1991).

Visualmente, observando-se fotos da superfície de ruptura das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento (Figura 30), verifica-se que nas pressões menores (25 e 75 kPa) a superfície de cisalhamento ainda mostra uma rugosidade determinada pelos agregados, enquanto que nas pressões maiores isso não acontece, especialmente naquelas maiores que 300 kPa. Nas maiores pressões, a fricção produziu uma orientação das partículas de argilas, tornando a superfície de cisalhamento espelhada, em função da orientação das partículas de argila, confirmando que nessa situação ocorre atrito entre partículas primárias do solo.

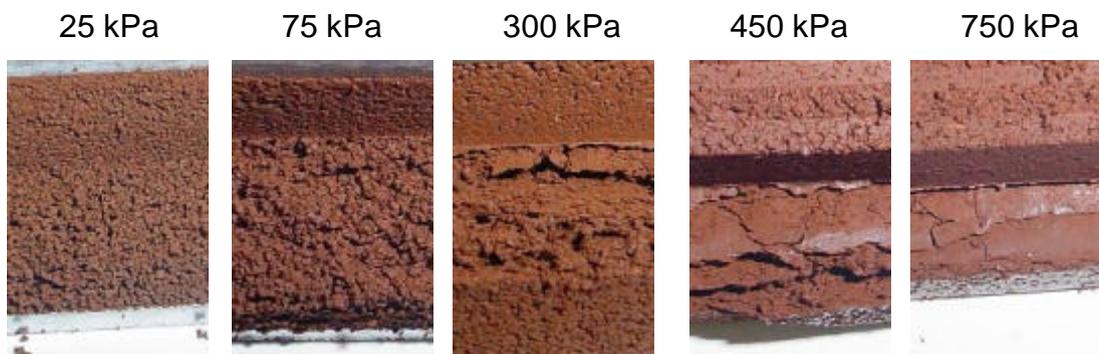


Figura 30. Imagens da superfície de ruptura de amostras de agregados submetidas ao ensaio de cisalhamento direto com cargas de 25, 75, 300, 450 e 750 kPa (Escala aproximada 1:1).

Na Tabela 9 são apresentados os valores de coesão e do ângulo de atrito interno inter e intraagregados e, ainda, a resistência dos agregados, estimados conforme Lebert & Horn (1991). Esses resultados corroboram as observações desses autores, e confirmam que os agregados do solo podem estar influenciando de maneira significativa sua envoltória de resistência ao cisalhamento.

Tabela 9. Coesão (c) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) inter e intraagregados e resistência dos agregados (R) de um Nitossolo Vermelho distrófico, determinados a partir de amostras com estrutura não deformada e de agregados de 5 classes de tamanho.

Agregados (mm)	Ug g g <sup>-1</sup>	Argila g kg <sup>-1</sup>	Interagregados		intraagregados		R (kPa)
			c (kPa)	$\phi$ °	c (kPa)	$\phi$ °	
< 0,25	0,314	797	0	37,9	96,3	23,6	324,3
0,25 – 0,50	0,313	793	0	43,1	138,2	17,7	242,8
0,50 – 1,00	0,294	805	0	43,0	61,5	26,7	176,9
1,00 – 2,00	0,304	794	0	45,4	99,3	23,8	206,5
2,00 – 4,00	0,289	769	0	44,9	103,0	29,3	265,9
Média	0,303		0	43,0	99,7	24,3	243,3
Solo	0,294	787	20,5	43,7	104,4	27,9	196,7

Em função da inexistência de repetições para os ensaios com amostras de agregados, não foi possível submeter esses dados à análise estatística. Entretanto, considerando os valores do coeficiente de determinação das equações obtidas, nos próximos parágrafos são feitas algumas comparações e considerações sobre os valores encontrados.

A coesão interagregados para as amostras de agregados foi sempre igual a zero, o que era esperado, já que os ensaios foram realizados com agregados soltos colocados diretamente na caixa de cisalhamento do aparelho de cisalhamento direto. Para as amostras com estrutura preservada, observou-se um valor de coesão interagregados (20,5 kPa) cerca de 5 vezes menor do que aquele observado para os espaços intraagregados (104,4 kPa), provavelmente pela proximidade entre as partículas e pelo maior número e tipo de pontos de contatos existentes nos espaços intraagregados. O ângulo de atrito interno interagregados médio obtido com os agregados foi, numericamente, muito semelhante ao obtido com as amostras com estrutura preservada para esses espaços.

Os valores médios da coesão e do ângulo de atrito interno intraagregados, obtidos a partir dos ensaios com os agregados, são semelhantes aos valores obtidos com as amostras com estrutura preservada. Deve-se considerar que as diferenças observadas podem ser devidas ao fato de que no solo cada classe de agregados contribui de forma e magnitude diferentes na determinação do  $f$  e da  $c$ , enquanto que no cálculo da média aqui realizado, essas diferenças não foram consideradas. Isso justificaria, ainda, a diferença observada para a resistência dos agregados. Nesse caso deve-se considerar, também, que o processo de obtenção dos agregados pode ter contribuído para a seleção de agregados mais resistentes, especialmente nas classes de maior tamanho, o que não ocorre quando se empregam amostras com estrutura preservada.

As diferenças observadas nos parâmetros do cisalhamento entre as diferentes classes de tamanho de agregados são, provavelmente, devidas a diferenças nos mecanismos de agregação, teor e tipo de matéria orgânica e a diferenças texturais existentes entre os agregados de cada classe de tamanho.

Todavia, esses resultados confirmam que os parâmetros da resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios realizados com carga normal máxima de 196,4 kPa (Tabela 8) possam ser relativos aos espaços interagregados, ou ao menos estarem sob forte influência das condições reinantes nesses espaços, especialmente nas amostras equilibradas nas tensões de 100 e 500 kPa, cujas umidades médias estavam mais próximas da umidade das amostras usadas nos ensaios com agregados. Assim, a partir de agora aqueles resultados serão discutidos, admitindo-se isso como verdadeiro.

O ângulo de atrito interno dos espaços interagregados (Tabela 8) não apresentou variação significativa em função das diferentes tensões de água utilizadas. Talvez a falta de diferenciação no que se refere ao conteúdo médio de água e ao grau de saturação das amostras, entre as tensões de 100 e 500 kPa, tenha contribuído para a falta de diferenciação do ângulo de atrito interno. Entretanto, considerando que, teoricamente, esses resultados referem-se ao atrito entre agregados e, ainda, que a menor tensão de água utilizada foi

de 6 kPa, significando que em todas as amostras havia água somente no interior dos microporos. Além disso, pode-se considerar que, para este solo argiloso e com agregação bem desenvolvida, os microporos estão predominantemente dentro dos agregados. Sendo isso verdade, as diferentes tensões usadas não seriam diferentes entre si no que se refere aos espaços interagregados, justificando a ausência de efeitos significativos das mesmas sobre o ângulo de atrito interno nesses espaços.

Apesar de não mostrar variação significativa em função da tensão de água nas amostras de solo, o  $f$  apresentou correlação significativa com o teor de água e o grau de saturação (Figura 31) e, ainda, com o teor de carbono orgânico das amostras (Figura 32). Em todos esses casos, o aumento dessas variáveis está associado a uma diminuição do atrito entre os agregados.

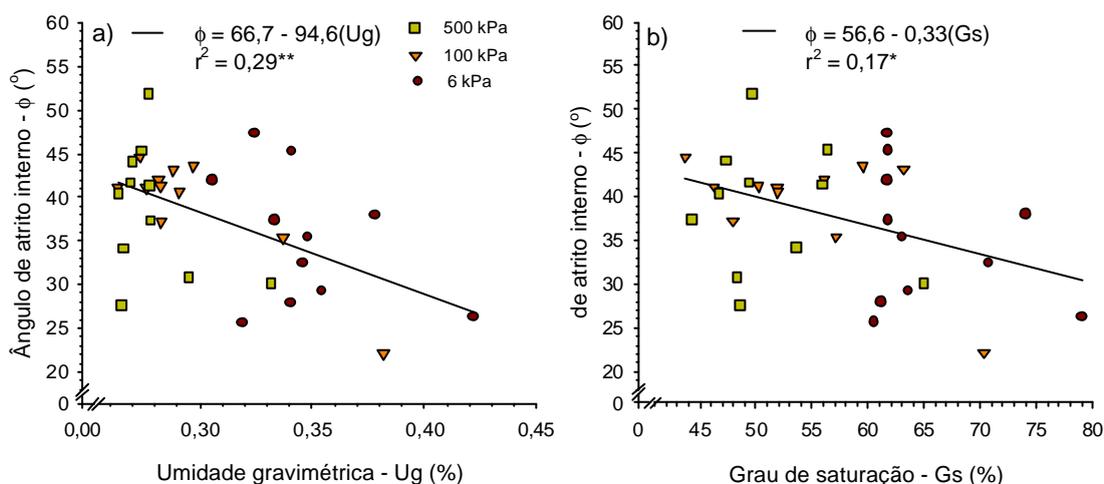


Figura 31. Ângulo de atrito interno de um Nitossolo Vermelho distrófico em função da umidade gravimétrica (a) e do grau de saturação do solo (b).

Observando os gráficos da Figura 31 é possível perceber que 4 pontos, referentes a amostras com  $U_g > 0,35 \text{ g g}^{-1}$  ou  $G_s > 70\%$ , são determinantes para a significância da correlação existente entre essas variáveis e o  $f$ , o que foi confirmado quando excluímos esses pontos da análise. O significado dessa observação é que, quando a umidade dentro dos agregados começa a ficar demasiado alta, os agregados passam a perder

resistência e, talvez, nessas condições a mesma seja menor que a máxima carga normal empregada no ensaio. Assim, os agregados rompem-se em agregados menores ou sua rugosidade superficial torna-se menor, resultando em um atrito menor.

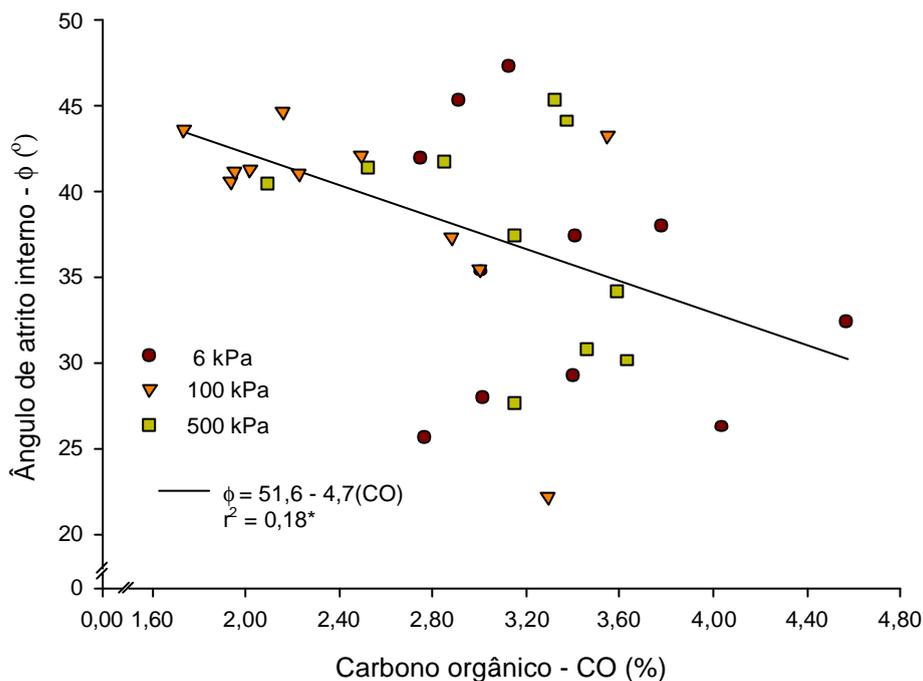


Figura 32. Ângulo de atrito interno de um Nitossolo Vermelho distrófico em função do teor de carbono orgânico.

A redução observada no  $f$  em função do aumento do teor de matéria orgânica pode ser associada a dois efeitos da MO sobre o solo: aumento da água retida em uma mesma tensão e redução da densidade do solo. Como se pode observar na Figura 33, há uma tendência do aumento do teor de CO estar associado a um aumento da umidade e do grau de saturação das amostras, especialmente nas tensões menores. Por outro lado, assim como já foi observado nas amostras usadas no estudo sobre compressibilidade, no caso do Nitossolo o incremento em CO não está associado significativamente a mudanças na densidade do solo. Portanto, o efeito do CO sobre  $f$  pode ser, no presente caso, creditado a seus efeitos sobre a quantidade de água retida nas amostras.

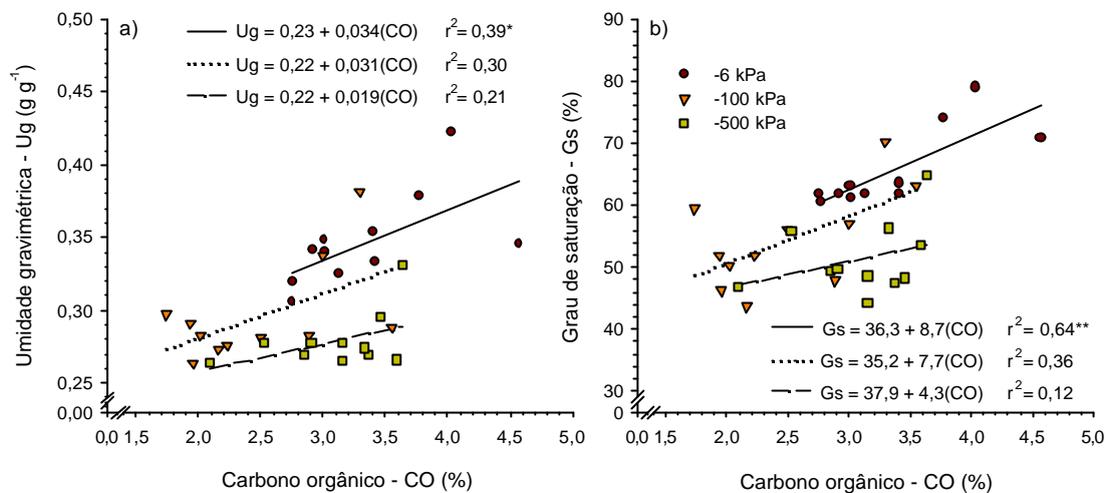


Figura 33. Umidade gravimétrica (a) e grau de saturação (b) do solo em função do teor de carbono orgânico para um Nitossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes tensões de água.

A coesão observada para os espaços interagregados do Nitossolo foi afetada significativamente pela tensão de água das amostras. De maneira geral, observou-se que, à medida que cresceu a tensão, maior foi a coesão observada. Isso acontece porque quanto maior a tensão da água no solo, menor é seu efeito redutor sobre a coesão verdadeira existente entre as partículas sólidas e maior é a coesão aparente, resultante da formação de meniscos de água junto aos pontos de contato entre as partículas.

Apesar do efeito significativo da variação da tensão de água sobre a coesão dos espaços interagregados do Nitossolo, os estudos de correlação não mostraram associação significativa entre a coesão e o teor de água e o grau de saturação do solo. Também não se observou correlação significativa com nenhuma outra variável estudada, como o teor de CO, densidade e porosidade total.

Para o Argissolo, as envoltórias de resistência ao cisalhamento (Figura 34), para todas as tensões estudadas, apresentaram uma inclinação constante ao longo de toda a faixa de pressões normais utilizadas. Isso acontece porque nesse solo, especialmente na sua camada superficial que contém cerca de 63% de areia e apenas 16% de argila (Tabela 1), a agregação é fraca. Assim, os agregados não apresentam resistência suficiente para

produzir mudanças significativas na inclinação e no intercepto da envoltória. Portanto, podemos afirmar que mesmo as pressões normais mais baixas empregadas (14 kPa) seriam suficientes para romper os agregados desse solo, de maneira que a envoltória de resistência é definida exclusivamente por suas características texturais.

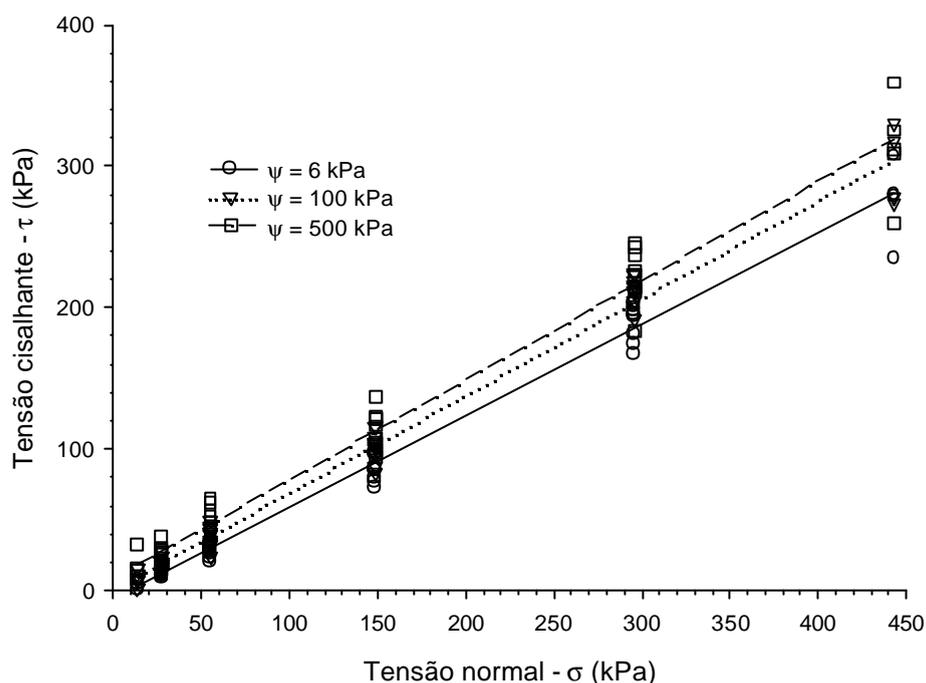


Figura 34. Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a 3 tensões de água ( $\psi$ ).

Os valores médios da densidade do solo, teor de carbono orgânico, umidade gravimétrica, grau de saturação, porosidade total, ângulo de atrito interno e coesão do Argissolo, em função da tensão de água nas amostras, são apresentados na Tabela 10. Os resultados originais constam do Anexo F. O ângulo de atrito interno e a coesão apresentaram variação significativa em função da tensão de água no solo, tornando-se maiores à medida que o solo se tornou mais seco.

O efeito da tensão de água sobre o ângulo de atrito interno está associado ao efeito lubrificante que a água exerce quando recobre as partículas sólidas. Assim, na medida que a tensão aplicada sobre a água do

solo aumenta, os filmes de água existentes sobre as partículas vão se desfazendo, reduzindo seu efeito lubrificante e, portanto, aumentando o atrito entre as mesmas. Na Figura 35 as relações do  $f$  com a  $Ug$  e com o  $Gs$  são mostradas. Nelas podemos ver que o  $f$  decresce com o aumento do conteúdo de água dentro da faixa estudada.

Tabela 10. Densidade do solo ( $D_s$ ), teor de carbono orgânico (CO), umidade gravimétrica ( $Ug$ ), grau de saturação ( $Gs$ ), porosidade total ( $Pt$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa, em função da tensão de água nas amostras (médias de 10 repetições).

Tensão	$D_s$	CO	$Ug$	$Gs$	$Pt$	$\phi$	$c$
Kpa	$Mg\ m^{-3}$	%	$g\ g^{-1}$	%	%	°	kPa
6	1,375	1,40	0,21a <sup>1/</sup>	62,7 <sup>a</sup>	46,6	32,5b	0,00b
100	1,363	1,45	0,14b	39,1b	47,1	34,9a	1,06b
500	1,354	1,25	0,09c	24,6c	47,4	35,4a	7,95 <sup>a</sup>

1/ Letras iguais indicam médias semelhantes pelo teste DMS com 5% de significância.

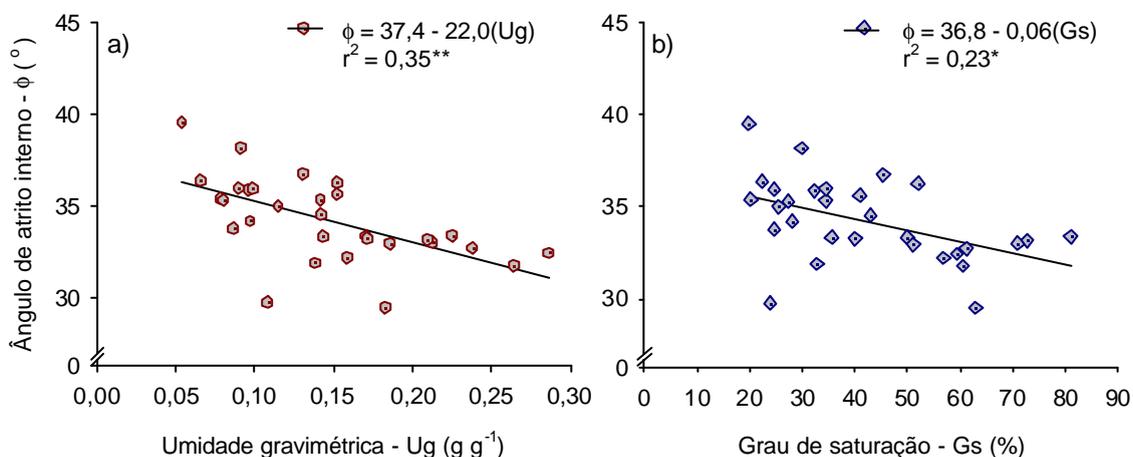


Figura 35. Ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa, em função da umidade gravimétrica (a) e do grau de saturação (b).

Para as tensões de água de 6 e 100 kPa o ângulo de atrito interno mostrou-se independente da variação do teor de CO, mas para a tensão de 500 kPa houve uma tendência significativa do mesmo diminuir com o

aumento do teor de CO do solo (Figura 36). Teoricamente o aumento do teor de matéria orgânica poderia aumentar o atrito, já que as partículas orgânicas reteriam a água existente no solo junto de si, dificultando a formação de películas de água sobre as partículas minerais. Nas tensões de água menores isso não acontece porque, provavelmente, a quantidade de água existente é suficiente para suprir a demanda de água da MO e, ainda, para formar filmes lubrificantes sobre todas as partículas minerais.

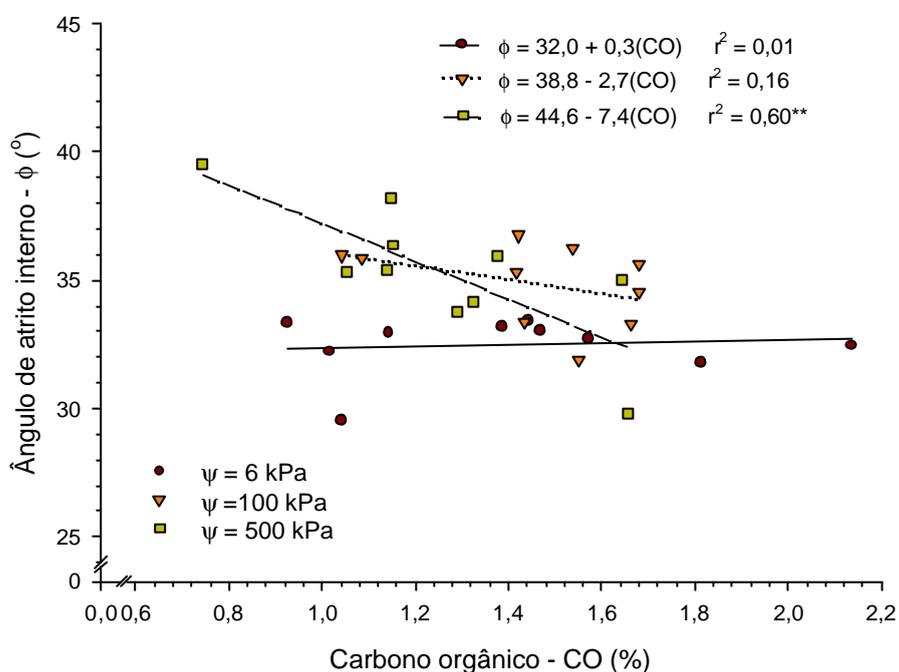


Figura 36. Ângulo de atrito interno de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, em função do teor de carbono orgânico em amostras submetidas a 3 tensões de água ( $\psi$ ).

Na tensão de água igual a 500 kPa, o incremento de MO do solo é associado a uma redução do  $f$  (Figura 36), provavelmente porque o incremento de MO resultou em redução da densidade (Figura 37a) e em aumento do teor de água em uma mesma tensão (Figura 37b). A redução da densidade do solo significa redução do número de pontos de contato entre as partículas e, portanto, do atrito entre elas. Com relação ao aumento da água retida em uma mesma tensão, deve-se considerar que, à medida que temos mais matéria

orgânica no solo, provavelmente sua distribuição entre as partículas minerais será mais uniforme. Assim, se existe mais matéria orgânica e mais água e se elas estão distribuídas mais uniformemente sobre as partículas minerais, então é possível que exista uma redução do atrito, como foi observado no presente trabalho.

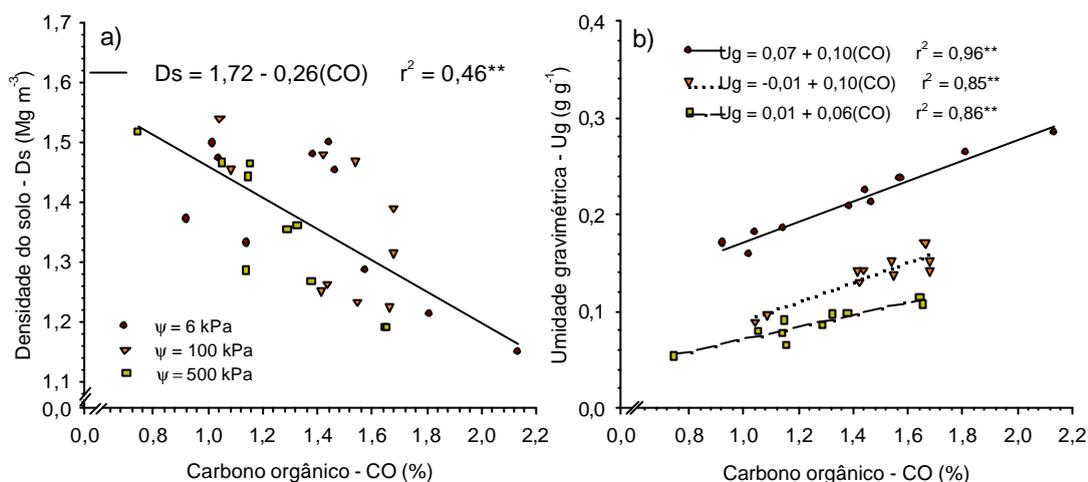


Figura 37. Densidade do solo (a) e umidade gravimétrica (b) de um Argissolo Vermelho Amarelo arenoso, em função do teor de carbono orgânico.

A coesão no Argissolo variou significativamente com a variação da tensão de água nas amostras, tornando-se menor à medida que essa diminuiu. Na tensão de 6 kPa o solo não apresentou coesão significativa. Na Figura 38 observa-se que a coesão decresce rapidamente para teores de água de até  $0,15 \text{ g g}^{-1}$  ou grau de saturação de 35%. Provavelmente isso aconteça porque as quantidades de argila e matéria orgânica, existentes nesse solo, sejam suficientes para estabelecer um “cimento” entre os grãos de areia, conferindo-lhe uma coesão relativamente alta quando seco. No entanto, essa coesão é facilmente suprimida com a hidratação do sistema.

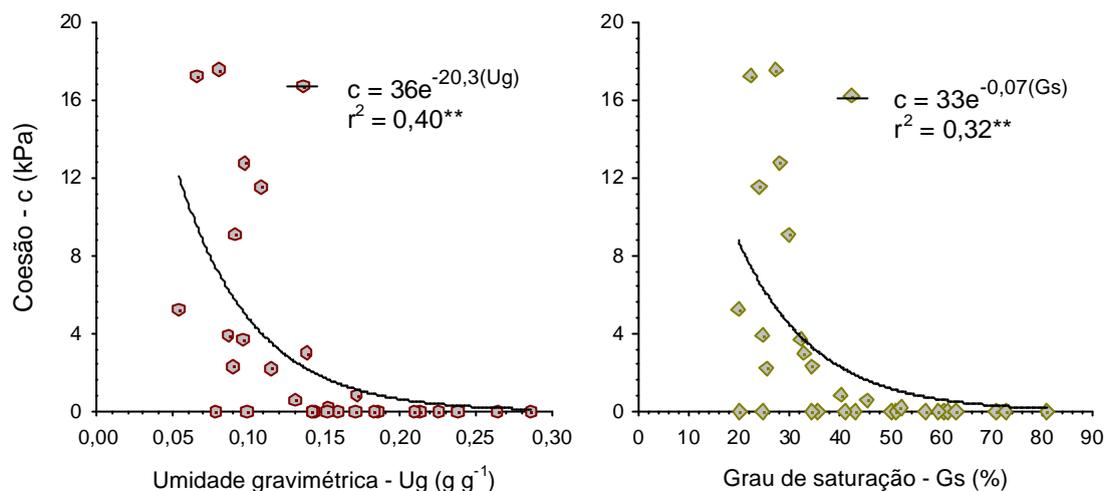


Figura 38. Coesão do solo em função da umidade gravimétrica e do grau de saturação de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Além disso, em baixos teores de água provavelmente exista uma maior coesão aparente resultante da formação de meniscos de água nos pontos de contato entre as partículas. À medida que o teor de água vai aumentando essa coesão aparente vai diminuindo, pois a curvatura dos meniscos de água vai diminuindo. Zhang & Hartge (1990), em trabalho com solo arenoso, observaram que a coesão cresceu com o aumento da tensão de água no solo até que essa atingiu um valor entre 4 e 7 kPa, tornando-se decrescente depois disso. Provavelmente naquele solo, os teores de matéria orgânica e de argila eram insuficientes para produzir coesão significativa entre as partículas de areia quando o solo se encontrava seco. Assim, a coesão observada era quase que exclusivamente devido ao efeito da formação de meniscos de água nos pontos de contato, existindo uma umidade que propicia uma combinação de número e de curvatura de meniscos que resulta num valor máximo de coesão aparente. No solo usado no presente estudo, no entanto, as quantidades de argila e matéria orgânica existentes resultam em uma forte coesão verdadeira do solo quando este está seco e, por isso, a coesão é sempre decrescente com o aumento do teor de água.

Apesar do teor de matéria orgânica poder estar contribuindo para o desenvolvimento da coesão verdadeira desse solo, não se verificou correlação

significativa entre o teor de CO e a coesão determinada pelo ensaio de cisalhamento direto. Provavelmente isso ocorra em função dos efeitos da MO sobre a densidade e a retenção de água do solo (Figura 37).

## **Conclusões**

Os resultados indicam que, para o Nitossolo Vermelho distrófico usado neste estudo, a agregação deve ser considerada na definição das cargas normais a serem utilizadas no ensaio de cisalhamento direto, bem como na análise dos resultados, pois a mesma tem efeitos sobre a envoltória de resistência ao cisalhamento. Os estudos aqui relatados indicam que os agregados definem a resistência ao cisalhamento do solo para cargas de até 300 kPa, dependendo da umidade do solo.

Para o Argissolo Vermelho Amarelo arênico a envoltória de resistência ao cisalhamento mostrou-se única em toda a faixa de cargas normais empregadas, que foi de 14 a 450 kPa.

O ângulo de atrito interno, nos dois solos, decresceu com o aumento do teor de matéria orgânica do solo.

A coesão determinada pelo ensaio de cisalhamento direto mostrou-se independente do teor de matéria orgânica, nos dois solos em estudo. Nos dois casos, no entanto, a coesão decresceu com o aumento do teor de água do solo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com os estudos aqui relatados apontam para a confirmação da hipótese geral em estudo, confirmando que a condução do sistema de plantio direto, com vistas a permitir a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo e o enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica, pode ser usada como estratégia para reduzir os efeitos daninhos, ao solo, do tráfego de máquinas e do pisoteio animal.

Os estudos de compactação confirmaram que os resíduos vegetais na superfície do solo possuem capacidade de dissipar parte da energia compactante no ensaio Proctor. Entretanto, é necessário validar esses resultados com experimentos de campo, buscando determinar a magnitude desse efeito para as condições reais de trabalho nas lavouras.

Os ensaios de compactação mostraram, ainda, que o enriquecimento do solo com matéria orgânica resulta em aumento da umidade crítica para compactação, ao mesmo tempo em que reduz a densidade máxima obtida, significando um aumento do intervalo de umidade em que solo está apto para suportar tráfego sem sofrer compactação excessiva.

O valor médio da umidade crítica para compactação, determinada pelo ensaio Proctor para os dois solos, foi muito semelhante ao valor médio de umidade em que se observou o maior valor médio de compressibilidade, determinada pelo ensaio de adensamento uniaxial. Para o solo arenoso, observou-se ainda que o ângulo de atrito interno, determinado pelo ensaio de cisalhamento direto, decresce em umidades menores que a umidade crítica de compactação e torna-se mínimo e constante para umidades superiores. Essas observações confirmam a validade do ensaio Proctor para determinar a umidade crítica para compactação do solo e, ainda, indicam que, talvez, a mesma possa ser estimada a partir do ensaio de adensamento uniaxial.

Por outro lado, os resultados do ensaio Proctor demonstraram que para o solo arenoso não é possível estimar a umidade crítica a partir do limite de plasticidade, como sugere Ojeniyi & Dexter (1979), pois o mesmo mostrou-se não plástico. Para o solo argiloso, a razão  $U_{g_c}/LP$  decresce com o aumento do teor de matéria orgânica, impedindo que se use um valor constante dessa razão para estimar a  $U_{g_c}$  a partir do LP, como sugerem esses autores. Se o fizermos, estaremos ou subestimando o valor da  $U_{g_c}$  para baixos teores de MO ou superestimando a  $U_{g_c}$  quando o teor de MO for alto.

A partir da  $U_{g_c}$  média determinada para cada solo e usando as equações que descrevem a relação entre a pressão de pré-consolidação e a umidade do solo, verificou-se que nessa umidade os 2 solos não poderiam suportar as cargas médias normalmente aplicadas sobre o solo pelas máquinas agrícolas, que se situam entre 100 e 200 kPa (Carpenedo, 1994). Trabalhando com um valor médio de 150 kPa de carga, estimou-se que o solo argiloso poderia ser trafegado em umidade máximas correspondentes a 90% da  $U_{g_c}$ , enquanto que no solo arenoso isso seria possível apenas quando a umidade for inferior a 38% da  $U_{g_c}$ .

Os ensaios de adensamento uniaxial mostraram uma tendência do aumento de carbono orgânico do solo estar associado a uma maior pressão de pré-consolidação em uma mesma umidade do solo, especialmente no solo argiloso. Entretanto, a falta de controle sobre alguns fatores que podem estar influenciando esses resultados, como a densidade do solo, indicam a necessidade de novos estudos para confirmar os resultados aqui relatados.

Quanto à compressibilidade, os resultados obtidos não são, isoladamente, suficientes para confirmar ou refutar as pressuposições teóricas sobre o tema, especialmente para o solo argiloso (Nitossolo). Isso aconteceu, provavelmente, porque para esse solo empregaram-se amostras obtidas em parcelas com diferentes sistemas de cultivo, diminuindo o controle sobre fatores importantes na determinação do efeito da matéria orgânica sobre a resistência do solo como a densidade, a estrutura e a condutividade hidráulica. Assim, sugere-se a realização de novos estudos, utilizando amostras com

diferentes graus de compactação e diferentes teores de matéria orgânica, fazendo-se o monitoramento da tensão de água nas amostras durante o ensaio de adensamento.

Os estudos sobre elasticidade do solo confirmaram a hipótese de que o aumento do teor de matéria orgânica está associado a um aumento dessa propriedade do solo. Entretanto, os valores médios máximos de redução da densidade do solo, após a remoção da carga aplicada sobre o solo, foram de cerca de  $0,08 \text{ Mg m}^{-3}$ , o que, talvez, seja muito pouco para que exista um efeito significativo sobre a densidade do solo. Ainda assim, considerando que nos ensaios relatados aqui o tempo de carregamento do solo foi de 5 minutos, muito superior ao tempo real de carregamento quando uma máquina trafega sobre o solo, recomenda-se a realização de novos ensaios usando tempo de carregamento menores, semelhantes aos tempos de carregamentos reais observados no campo quando da passagem de uma máquina ou animal sobre o solo, para verificar se nessas condições as diferenças na elasticidade podem resultar em diferenças maiores na densidade final.

Finalmente, nos ensaios de cisalhamento direto observou-se que, para solos com estrutura bem desenvolvida como, por exemplo, o Nitossolo aqui utilizado, deve-se considerar os efeitos da estrutura sobre a envoltória de resistência ao cisalhamento. Nesses solos a resistência dos agregados faz com que o solo tenha duas envoltórias de resistência, uma para pressões normais menores que a resistência dos agregados e outra para pressões normais maiores. Para o Argissolo, isso não foi observado, provavelmente porque esse solo apresenta uma estrutura fraca na camada superficial onde foram tomadas as amostras usadas nos ensaios realizados. Com relação a esse aspecto, acredita-se ser necessário o desenvolvimento de novas pesquisas para verificar se o efeito da matéria orgânica sobre a resistência dos agregados produz efeitos significativos nos parâmetros do cisalhamento do solo, tanto aqueles determinados por suas características texturais como aqueles determinados por suas características estruturais. Também nesse caso, é importante realizar o monitoramento da tensão de água das amostras durante o

ensaio de cisalhamento direto, para verificar se o desenvolvimento de pressões neutras não está interferindo nos resultados dos ensaios. Além disso, recomenda-se realizar estudos para avaliar a resistência dos agregados do solo através de outros métodos para comparar com os resultados obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- Acharya, C.L. & Sharma, P.D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. **Soil Tillage Res.**, 32:291-302, 1994.
- Amado, T.J.C.; Bayer, C.; Eltz, F.L.F.; Brum, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:189-197, 2001.
- Aragón, A.; García, M.G.; Filgueira, R.R.; Pachepsky, Ya. A. Maximum compactability of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. **Soil Tillage Res.**, 56:197-204, 2000.
- Arvidsson, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil Tillage Res.**, 49:159-170, 1998.
- Balastreire, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole. 1987. 310p.
- Ball, B.C.; Campbell, D.J.; Hunter, E.A. Soil compactability in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. **Soil Tillage Res.**, 57:83-91, 2000.
- Baumgartl, T. & Horn, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil Tillage Res.**, 19:203-213, 1991.
- Bayer, C. & Mielniczuk, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:235-239, 1997.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J.; Martin-Neto, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:599-607, 2000.
- Bishop, A.W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, 39:859-863. 1959.
- Baver, L.D.; Gardner, W.H. & Gardner, W.R. **Soil physics**. 4 ed. New York : John Wiley & Sons. 1972. 498p.
- Campos, B.C. de; Reinert, D.J.; Nicolodi, R.; Ruedell, J.; Petreire, C.. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 19:121-126, 1995.
- Canellas, L.P.; Santos, G.A. Amaral, N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: Santos, G.A. & Camargo, F.A.O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508p.
- Caputo, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. v.1, 5 ed. rev. e ampliada. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1981. 219p.
- Carpenedo, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

- 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.
- Centurion, J.F. & Demattê, J.L.I.. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 9:263-266, 1985.
- Centurion, J.F.; Demattê, J.L.I.; Fernandes, F.M.. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 9:267-270, 1985.
- Chaney, K.; Hogdson, D.R; Braim, M.A. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. **J. Agr. Sci.**, Cambridge, 104(1):125-133, 1985.
- Corazza, E.J.; Silva, J.E.; Resck, D.V.S.; Gomes, A.C.. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:425-432, 1999.
- D'Agostini, L.R. **Variações temporais da coesividade entre agregados de solo**. 1992. 82f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo).Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Dao, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agronomy Journal**, 88:141-148, 1996.
- Davies, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. **Journal of Soil Science**, 36:299-306. 1985.
- Dias, R.D. Geomecânica dos solos lateríticos do sul do Brasil. In: COLÓQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, Porto Alegre, 1989. **Anais**, Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1989.
- Dias Junior, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de doutorado).
- Dias Junior, M.S. & Pierce, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:175-182, 1996.
- Ekwue, E.I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil Tillage Res.**, 16:289-297, 1990.
- Ekwue, E.I. & Stone, R.J. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 38:357-365, 1995.
- Ekwue, E.I. & Stone, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 40:317-323, 1997.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, EMBRAPA. 1979.

- Figueiredo, L.H.A.; Dias Junior, M.S. & Ferreira, M.M. Umidade crítica de compactação máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:487-493, 2000.
- Fiori, A. P. & Carmignani, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR. 2001. 550p.
- Gaggero, M.R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998.v125f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Giacomini, S.J. **Consortiação de plantas de cobertura no outono/inverno e fornecimento de nitrogênio ao milho em sistemas plantio direto**. 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Gupta, S.C.; Schneider, E.C; Larson, W.E.; Hadas, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, 51:207-212, 1987.
- Hillel, D. **Fundamentals of soil Physics**. New York, Academic Press. 1980. 413p.
- Holtz, R.D. & Kovacs, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- Horn, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil Tillage Res.**, 17:265-289, 1990.
- Horn, R. & Lebert, M. Soil compactability and compressibility. In: Soane, B.D. & Ouwerkerk, C van. (Edi.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier. 1994. 662p.
- Horn, R.; Taubner, H.; Wuttke, M.; Baumgartl, T. Soil physical properties related to soil structure. **Soil Tillage Res.**, 30:187-216, 1993
- Ismail, I.; Blevins, R.L.; Frye, W.W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:193-198, 1994.
- Kondo, M.K. & Dias Junior, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:497-506, 1999.
- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. **Soil Mechanics, SI Version**. New York, J. Wiley & Sons. 1979. 553p. (Series in soil engineering)
- Lebert, M. & Horn, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Res.**, 19:275-286, 1991.
- Macedo, V.R.M. **Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado**. 1993. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

- Machado, J.A. & Brum, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 2:81-84, 1978.
- Merten, G.H. & Mielniczuk, J.. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:369-374, 1991.
- Meurer, E.J.; Rhenheimer, D. & Bissani, C.A. Fenômenos de superfície. In: Meurer, E.J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. 174p.
- Mosaddeghi, M.R.; Hajabbasi, M.A.; Hemmat, A.; Afyuni, M. Soil compactability as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil Tillage Res.**, 55:87-97, 2000.
- Oades, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, 76:319-337, 1984.
- Ohu, O.J.; Folorunso, O.A.; Raghavan, G.S.V. & Adeniji, F.A. Critical content as an index of compactability of agricultural soils in Borno state of Nigeria. **Soil Technology**, 2:211-219, 1989.
- Ohu, O.J.; Raghavan, G.S.V. & McKyes, E. Peat moss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, 28:420-424. 1985.
- Ohu, O.J.; Raghavan, G.S.V.; McKyes, E. & Mehuys, G. Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, 29:351-355. 1986.
- Ojeniyi, S.O. & Dexter, A.R. Soil factor affecting the macrostructure produced by tillage. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, 22:339-343, 1979.
- Paladini, F.L.S. & Mielniczuk, J.. Distribuição de tamanho de agregados de um Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:135-140, 1991.
- Pinheiro, R.J.B. & Soares, J.M.D. Mecânica do solo: notas de aula. Santa Maria, UFSM-Depto. de Transportes, 2000. 253p. (Apostila da disciplina de Mecânica de Solos).
- Raghavan, G.S.V.; McKyes, E.; Amir, I.; Chasse, M.; Broughton, N.S. Prediction of compaction due to off-road vehicle traffic. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 19:610-613, 1976.
- Reinert, D.J.; Robaina, A.; Reichert, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. cd-rom.
- Rocha, W.W.; Dias Junior, M.S.; Lima, J.M.; Miranda, E.E.V. & Silva, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **R. Bras. Ci. Solo**, 26:297-303. 2002.
- Schjonning, P. Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil Tillage Res.**, 12:277-283. 1991.

- Secco, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas** 2003, 108f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Sidiras, N.; Vieira, S.R.; Roth, C.H.. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **R. Bras. Ci. Solo**, 8:265-268, 1984.
- Silva, A.P.; Libardi, P.L.; Camargo, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 10:91-95, 1986.
- Silva, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003, 171f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:191-199, 2000.
- 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. I – estado inicial de compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:1-8, 2002a.
- 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. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:9-15, 2002b.
- Soane, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil Tillage Res.**, 16:179-201, 1990.
- Stone, J.A. & Larson, W.E. Rebound of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, 44:819-822, 1980.
- Stone, R.J. & Ekwue, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 36(6):1713-1719. 1993.
- Stone, R.J. & Ekwue, E.I. Soil compressibility as influenced by sewage sludge incorporation. **J. Agric. Eng. Res.**, 64:227-235, 1996.
- Streck, C.A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003, 83f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33:141-163, 1982.
- Vargas, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil. 1977. 509p.
- Veiga, M.; Pandolfo, C.M. **Técnicas melhoradas de manejo de resíduos de colheita e outros insumos orgânicos para uma agricultura sustentável**. EPAGRI-EECN. 1998 (Projeto de Pesquisa)

- Zhang, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil Tillage Res.**, 31:263-275, 1994.
- Zhang, H.; Hartge, K.H. & Ringe, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:239-245. 1997.
- Zhang, H.Q. & Hartge, K.H. Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter. **Soil Technology**, 3:311-326. 1990.

## **ANEXOS**

Anexo A. Teor de carbono orgânico (CO), densidade máxima ( $D_{s_{max}}$ ), umidade gravimétrica crítica ( $U_{gc}$ ), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez do Nitossolo Vermelho distrófico.

Amostra	CO	$D_{s_{max}}$	$U_{gc}$	LP	LL
	---- % ----	--- $Mg\ m^{-3}$ ---	---- $g\ g^{-1}$ ----		
1	2,43	1,432	0,274	35	50
2	2,27	1,435	0,271	35	49
3	2,36	1,408	0,277	36	46
4	2,26	1,420	0,274	36	45
5	2,73	1,412	0,274	38	48
6	2,45	1,435	0,281	-	-
7	3,30	1,356	0,292	41	52
8	3,09	1,381	0,293	40	51
9	2,42	1,408	0,275	35	45
10	2,50	1,408	0,281	35	44
11	2,40	1,420	0,274	35	45
12	2,48	1,427	0,263	34	45
13	2,64	1,400	0,283	36	47
14	2,53	1,402	0,280	36	48
15	2,49	1,400	0,287	37	48
16	2,78	1,396	0,290	40	52
17	3,08	1,353	0,304	-	-
18	2,61	1,391	0,298	-	-
19	2,36	1,405	0,288	37	46
20	2,44	1,392	0,292	37	47

Anexo B. Teor de carbono orgânico (CO), densidade máxima ( $D_{s_{max}}$ ), umidade gravimétrica crítica ( $U_{g_c}$ ) e limite de liquidez do Argissolo Vermelho amarelo arênico de textura franco arenosa.

Amostra	CO	$D_{s_{max}}$	$U_{g_c}$	LL
	---- % ----	--- $Mg\ m^{-3}$ ---	---- $g\ g^{-1}$ ----	
1	1,26	1,838	0,111	14
2	1,43	1,815	0,112	13
3	1,19	1,816	0,109	16
4	1,27	1,842	0,109	16
5	1,03	1,895	0,103	17
6	1,25	1,832	0,110	14
7	1,00	1,865	0,111	15
8	1,23	1,840	0,111	16
9	0,96	1,877	0,098	12
10	0,80	1,926	0,094	14
11	1,89	1,794	0,136	-
12	1,08	1,924	0,108	-
13	0,95	1,901	0,112	-
14	0,65	1,981	0,095	-
15	0,98	1,912	0,111	-

Anexo C. Teor de carbono orgânico (CO), densidade inicial (Dsi), índice de vazios inicial (ei), umidade gravimétrica inicial (Ugi), porosidade total inicial (Pti), grau de saturação inicial (Gsi), coeficiente de compressibilidade (Cc), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), coeficiente de descompressão (Cd), índice de relaxação (Ir) e redução da densidade após a remoção das cargas (Re) de amostras de um Nitossolo Vermelho distrófico submetidas ao ensaio de adensamento uniaxial.

Tensão Rep.	CO	Dsi	ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_p$	Cd	Ir	Re	
- kPa-	--% --	- Mg m <sup>-3</sup> -		- g g <sup>-1</sup> -	--- % ---	--- % ---		-- kPa --		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -	
6	1	2,53	1,043	1,688	0,444	62,8	73,8	0,47	42,3	0,0085	27,0	0,074
6	2	2,07	1,109	1,528	0,405	60,5	74,2	0,36	28,7	0,0061	17,8	0,050
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	4	2,61	1,068	1,626	0,459	61,9	79,2	0,47	33,2	0,0095	26,0	0,089
6	5	2,25	1,083	1,589	0,429	61,4	75,6	0,40	25,7	0,0088	22,4	0,072
6	6	3,48	1,104	1,540	0,485	60,6	88,4	0,40	41,1	0,0108	36,4	0,093
6	7	2,00	1,051	1,668	0,412	62,5	69,3	0,49	30,5	0,0069	15,3	0,058
6	8	2,17	1,105	1,538	0,421	60,6	76,8	0,39	25,9	0,0061	16,4	0,053
6	9	1,90	1,117	1,510	0,436	60,2	80,9	0,32	37,5	0,0041	17,3	0,036
6	10	2,22	1,041	1,694	0,292	62,9	48,4	0,45	8,6	0,0057	9,4	0,056
6	11	2,35	1,102	1,545	0,411	60,7	74,6	0,35	11,7	0,0050	15,9	0,062
6	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	13	2,29	0,922	2,041	0,401	67,1	55,1	0,59	13,2	0,0075	11,0	0,059
6	14	1,70	0,969	1,894	0,425	65,4	62,9	0,55	21,1	0,0061	13,5	0,042
6	15	1,86	1,019	1,752	0,390	63,7	62,4	0,30	30,6	0,0053	21,9	0,048
6	16	2,30	0,901	2,112	0,440	67,9	58,4	0,55	9,1	0,0078	11,1	0,061
6	17	2,21	0,942	1,977	0,423	66,4	60,0	0,46	10,0	0,0072	12,3	0,055
6	18	2,07	1,081	1,594	0,442	61,5	77,7	0,43	16,7	0,0050	12,4	0,056
6	19	1,70	0,974	1,879	0,417	65,3	62,2	0,52	14,1	0,0061	10,1	0,050
6	20	1,93	1,019	1,752	0,388	63,7	62,2	0,45	8,6	0,0059	10,1	0,056
6	21	1,90	1,172	1,393	0,401	58,2	80,7	0,34	29,7	0,0050	16,1	0,046
6	22	2,01	0,995	1,818	0,403	64,5	62,2	0,49	13,1	0,0063	10,9	0,054
6	23	2,15	1,040	1,696	0,403	62,9	66,7	0,46	18,4	0,0063	13,2	0,055
6	24	2,00	1,056	1,655	0,407	62,3	68,9	0,44	12,8	0,0055	10,3	0,052
6	25	3,36	0,973	1,882	0,418	65,3	62,3	0,56	16,5	0,0095	15,9	0,080
6	26	3,48	1,049	1,673	0,464	62,6	77,8	0,44	25,5	0,0093	20,9	0,071
6	27	2,11	1,174	1,388	0,375	58,1	75,7	0,36	33,5	0,0050	17,2	0,052
100	1	2,82	1,017	1,757	0,326	63,7	52,1	0,74	55,4	0,0046	8,6	0,040

## Anexo C. Continuação ...

Tensão	Rep.	CO	Dsi	ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_p$	Cd	Ir	Re
- kPa-	--% --	- Mg m <sup>-3</sup> -		- g g <sup>-1</sup> -	--- % ---	--- % ---		-- kPa --		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -	
100	2	2,55	1,066	1,630	0,271	62,0	46,7	0,67	158,3	0,0029	16,3	0,029
100	3	2,33	1,150	1,438	0,287	59,0	55,9	0,47	63,7	0,0028	9,9	0,025
100	4	2,85	0,961	1,918	0,308	65,7	45,1	0,68	62,7	0,0052	9,0	0,039
100	5	2,66	1,124	1,495	0,299	59,9	56,1	0,45	74,2	0,0034	15,8	0,032
100	6	2,86	1,151	1,436	0,330	59,0	64,4	0,48	113,0	0,0043	18,7	0,034
100	7	2,71	1,001	1,801	0,332	64,3	51,7	0,80	74,5	0,0039	11,8	0,048
100	8	2,28	1,038	1,701	0,304	63,0	50,2	0,75	105,9	0,0035	9,2	0,026
100	9	2,28	1,101	1,547	0,354	60,7	64,1	0,58	72,6	0,0041	11,3	0,036
100	10	2,66	1,058	1,650	0,308	62,3	52,3	0,69	101,4	0,0036	10,3	0,028
100	11	2,38	1,159	1,419	0,308	58,7	60,9	0,52	58,9	0,0036	10,1	0,035
100	12	2,49	1,218	1,302	0,318	56,6	68,5	0,41	93,6	0,0031	14,8	0,028
100	13	1,97	1,009	1,779	0,319	64,0	50,2	0,77	74,5	0,0035	7,2	0,028
100	14	2,31	1,081	1,594	0,309	61,5	54,4	0,58	82,5	0,0033	10,2	0,027
100	15	2,17	1,107	1,533	0,297	60,5	54,3	0,57	81,1	0,0033	9,8	0,028
100	16	2,49	0,958	1,927	0,276	65,8	40,1	0,83	80,6	0,0037	7,8	0,027
100	17	2,35	1,041	1,694	0,295	62,9	48,9	0,66	64,0	0,0037	8,4	0,031
100	18	2,62	1,042	1,691	0,321	62,8	53,2	0,66	55,4	0,0037	7,7	0,032
100	19	2,25	1,015	1,763	0,348	63,8	55,3	0,69	83,1	0,0033	8,4	0,025
100	20	1,99	1,031	1,720	0,304	63,2	49,5	0,77	84,9	0,0029	8,3	0,031
100	21	2,55	1,089	1,575	0,265	61,2	47,2	0,63	141,5	0,0031	11,7	0,023
100	22	2,29	0,964	1,909	0,292	65,6	42,9	0,72	48,6	0,0039	7,1	0,029
100	23	2,31	1,026	1,733	0,295	63,4	47,7	0,72	72,0	0,0033	7,3	0,027
100	24	2,49	1,142	1,455	0,286	59,3	55,1	0,64	122,0	0,0034	11,8	0,030
100	25	2,66	1,182	1,372	0,365	57,8	74,6	0,37	62,6	0,0058	22,8	0,047
100	26	3,00	1,210	1,317	0,330	56,8	70,2	0,34	52,4	0,0056	21,5	0,052
100	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	1	2,26	1,054	1,660	0,277	62,4	46,7	0,72	152,3	0,0023	9,4	0,019
500	2	2,65	1,128	1,486	0,269	59,8	50,8	0,51	141,3	0,0025	13,5	0,022
500	3	2,27	1,274	1,201	0,290	54,6	67,7		118,8	0,0016	21,7	0,016
500	4	3,89	0,962	1,915	0,305	65,7	44,6	0,82	151,3	0,0054	16,0	0,031
500	5	2,60	1,049	1,673	0,269	62,6	45,1	0,61	178,6	0,0028	14,6	0,021
500	6	2,74	1,105	1,538	0,284	60,6	51,8	0,55	131,8	0,0031	14,8	0,026
500	7	2,28	1,023	1,741	0,256	63,5	41,3	0,80	196,0	0,0029	11,7	0,019
500	8	2,36	1,045	1,683	0,303	62,7	50,5	0,74	128,4	0,0024	8,7	0,021

## Anexo C. Continuação ...

Tensão Rep.	CO	Dsi	ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_p$	Cd	Ir	Re	
- kPa-	--% --	- Mg m <sup>-3</sup> -		- g g <sup>-1</sup> -	--- % ---	--- % ---		-- kPa --		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -	
500	9	2,43	1,152	1,434	0,271	58,9	52,9	0,55	201,3	0,0019	13,5	0,017
500	10	2,50	1,003	1,796	0,313	64,2	48,9	0,80	138,3	0,0029	9,5	0,023
500	11	2,41	1,034	1,712	0,297	63,1	48,7	0,72	107,1	0,0031	10,6	0,028
500	12	2,44	1,138	1,464	0,289	59,4	55,3	0,53	139,3	0,0024	9,3	0,025
500	13	2,21	1,007	1,785	0,286	64,1	44,9	0,83	148,3	0,0022	7,5	0,017
500	14	2,13	1,016	1,760	0,276	63,8	43,9	0,67	88,6	0,0039	10,7	0,029
500	15	2,10	1,048	1,676	0,269	62,6	45,1	0,73	178,4	0,0023	11,2	0,019
500	16	2,36	0,986	1,844	0,298	64,8	45,4	0,82	106,2	0,0026	7,4	0,021
500	17	2,20	1,010	1,776	0,303	64,0	47,8	0,86	175,2	0,0030	8,6	0,040
500	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	19	2,61	0,931	2,012	0,280	66,8	39,1	0,84	104,2	0,0025	6,9	0,018
500	20	1,97	1,021	1,746	0,271	63,6	43,5	0,81	181,5	0,0025	10,6	0,019
500	21	2,26	1,075	1,608	0,251	61,7	43,7	0,61	152,1	0,0025	11,1	0,020
500	22	2,30	1,002	1,798	0,271	64,3	42,3	0,80	174,8	0,0024	9,0	0,016
500	23	2,33	1,072	1,616	0,272	61,8	47,2	0,67	169,5	0,0025	12,5	0,021
500	24	2,07	1,094	1,563	0,287	61,0	51,6	0,72	174,7	0,0032	12,5	0,023
500	25	3,15	1,073	1,613	0,359	61,7	62,3	0,48	98,4	0,0047	18,2	0,033
500	26	3,45	1,155	1,428	0,299	58,8	57,7	0,52	222,4	0,0030	25,5	0,025
500	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 500	1	2,91	1,150	1,438	0,285	59,0	55,6	0,51	173,4	0,0034	19,2	0,026
> 500	2	2,21	1,152	1,434	0,275	58,9	53,9	0,50	68,6	0,0034	11,1	0,031
> 500	3	2,44	1,110	1,526	0,241	60,4	44,2	0,42	194,7	0,0020	14,4	0,013
> 500	4	2,73	1,120	1,504	0,247	60,1	46,1	0,47	176,0	0,0024	11,2	0,017
> 500	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 500	6	2,60	1,158	1,421	0,243	58,7	47,9	0,47	95,4	0,0030	12,2	0,026
> 500	7	3,16	1,215	1,308	0,317	56,7	68,0	0,41	187,9	0,0028	22,8	0,023
> 500	8	2,58	1,121	1,501	0,297	60,0	55,5	0,57	178,3	0,0025	14,5	0,020
> 500	9	2,25	1,089	1,575	0,258	61,2	46,0	0,69	175,2	0,0026	11,3	0,019
> 500	10	2,55	1,178	1,380	0,317	58,0	64,4	0,78	182,3	0,0036	12,6	0,031
> 500	11	2,67	1,005	1,790	0,333	64,2	52,1	0,66	30,7	0,0045	7,2	0,041
> 500	12	2,63	0,963	1,912	0,242	65,7	35,5	0,74	217,3	0,0026	13,1	0,014
> 500	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 500	14	2,32	1,156	1,426	0,300	58,8	59,0	0,59	135,8	0,0029	11,8	0,025
> 500	15	2,24	1,068	1,626	0,309	61,9	53,3	0,72	73,2	0,0038	8,8	0,036

## Anexo C. Continuação ...

Tensão Rep.	CO	Dsi	ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_p$	Cd	Ir	Re	
- kPa-	--% --	- Mg m <sup>-3</sup> -		- g g <sup>-1</sup> -	--- % ---	--- % ---		-- kPa --		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -	
> 500	16	2,39	1,067	1,628	0,254	62,0	43,8	0,65	120,4	0,0032	10,5	0,024
> 500	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 500	18	2,55	1,056	1,655	0,255	62,3	43,1	0,72	184,2	0,0025	11,2	0,018
> 500	19	1,99	1,078	1,601	0,241	61,6	42,3	0,56	199,1	0,0020	11,2	0,014
> 500	20	2,37	1,187	1,362	0,261	57,7	53,7	0,54	211,6	0,0029	18,9	0,023
> 500	21	2,27	1,039	1,699	0,305	63,0	50,4	0,70	75,7	0,0036	7,9	0,028
> 500	22	2,43	0,995	1,818	0,254	64,5	39,2	0,74	158,5	0,0041	9,6	0,025
> 500	23	2,35	0,948	1,958	0,294	66,2	42,1	0,91	91,3	0,0039	8,0	0,028
> 500	24	2,11	1,131	1,479	0,263	59,7	49,8	0,58	188,3	0,0024	14,9	0,021
> 500	25	2,10	1,005	1,790	0,239	64,2	37,5	0,58	146,3	0,0024	10,2	0,014
> 500	26	2,29	1,032	1,717	0,281	63,2	45,9	0,81	143,5	0,0030	10,8	0,025
> 500	27	2,15	1,209	1,319	0,243	56,9	51,7	-	173,5	0,0014	15,2	0,013

Anexo D. Teor de carbono orgânico (CO), densidade inicial (Dsi), índice de vazios inicial (ei), umidade gravimétrica inicial (Ugi), porosidade total inicial (Pti), grau de saturação inicial (Gsi), coeficiente de compressibilidade (Cc), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_c$ ), coeficiente de descompressão (Cd), índice de relaxação (Ir) e redução da densidade após a remoção das cargas (Re) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico de textura franco arenosa.

Tens. Rep.	CO	Dsi	ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_c$	Cd	Ir	Re	
kPa	%	Mg m <sup>-3</sup>		g g <sup>-1</sup>	%	%		kPa		%	Kpa	
6	1	2,04	1,289	0,997	0,310	49,9	80,1	0,35	21,4	0,0080	26,65	0,122
6	2	1,22	1,306	0,971	0,248	49,3	65,7	0,29	25,3	0,0040	14,95	0,056
6	3	1,01	1,333	0,932	0,194	48,2	53,7	0,17	20,9	0,0027	16,55	0,034
6	4	1,46	1,132	1,275	-	56,0	-	0,38	37,9	0,0091	33,86	0,097
6	5	1,20	1,456	0,768	0,242	43,5	81,1	0,21	39,0	0,0041	26,91	0,066
6	6	1,44	1,302	0,978	0,254	49,4	66,9	0,32	27,3	0,0050	18,92	0,074
6	7	1,87	1,234	1,086	0,292	52,1	69,1	0,36	26,6	0,0065	21,51	0,092
6	8	1,95	1,165	1,210	0,324	54,8	68,9	0,38	21,7	0,0101	31,62	0,130
6	9	1,30	1,280	1,012	0,246	50,3	62,7	0,29	25,5	0,0038	13,96	0,048
6	10	1,63	1,292	0,993	0,278	49,8	72,2	0,32	20,7	0,0078	27,69	0,119
6	11	1,60	1,211	1,126	0,303	53,0	69,3	0,37	31,6	0,0061	20,70	0,079
6	12	1,61	1,388	0,855	0,232	46,1	69,9	0,24	36,2	0,0061	32,73	0,090
6	13	0,87	1,456	0,768	0,178	43,5	59,6	0,16	21,6	0,0036	23,05	0,053
6	14	1,69	1,306	0,972	0,257	49,3	68,2	0,25	21,6	0,0057	24,06	0,078
6	15	0,91	1,513	0,702	0,215	41,2	78,8	0,16	46,6	0,0021	17,72	0,032
100	1	1,65	1,154	1,232	0,129	55,2	26,9	0,46	51,5	0,0039	12,37	0,046
100	2	1,32	1,246	1,066	0,140	51,6	33,8	0,44	56,6	0,0030	15,13	0,061
100	3	0,98	1,290	0,997	0,099	49,9	25,6	0,37	73,9	0,0017	8,28	0,023
100	4	1,02	1,359	0,894	0,177	47,2	50,9	0,24	77,9	0,0031	23,56	0,041
100	5	1,33	1,318	0,954	0,149	48,8	40,1	0,37	61,5	0,0040	17,40	0,059
100	6	0,90	1,307	0,970	0,130	49,2	34,4	0,38	81,5	0,0024	11,02	0,032
100	7	1,08	1,356	0,898	0,132	47,3	37,9	0,33	58,3	0,0029	13,23	0,042
100	8	1,00	1,407	0,830	0,130	45,4	40,2	0,29	95,7	0,0019	13,11	0,026
100	9	1,09	1,370	0,879	0,141	46,8	41,3	0,32	77,8	0,0020	11,48	0,030
100	10	1,07	1,164	1,213	0,152	54,8	32,4	0,48	40,5	0,0036	10,06	0,048
100	11	1,07	1,098	1,345	0,159	57,4	30,5	0,51	33,2	0,0028	6,74	0,035
100	12	1,11	1,337	0,986	0,156	48,1	43,4	0,36	92,3	0,0035	19,81	0,049
100	13	0,75	1,434	0,796	0,103	44,3	33,3	0,20	75,9	0,0017	16,10	0,025
100	14	0,87	1,333	0,931	0,131	48,2	36,3	0,28	67,7	0,0025	15,40	0,033
100	15	0,59	1,545	0,667	0,117	40,0	45,3	0,18	78,5	0,0015	15,87	0,026
500	1	1,59	1,192	1,160	0,080	53,7	17,8	0,44	73,7	0,0030	11,49	0,034
500	2	1,27	1,278	1,015	0,081	50,4	20,7	0,42	114,2	0,0023	12,49	0,029
500	3	0,94	1,319	0,953	0,059	48,8	15,8	0,24	72,7	0,0020	16,82	0,029

## Anexo D. Continuação ...

Tens.	Rep.	CO	Dsi	Ei	Ugi	Pti	Gsi	Cc	$\sigma_p$	Cd	lr	Re
- kPa -		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -		-- g g <sup>-1</sup> --	--- % ---	--- % ---		-- kPa --		--- % ---	-- kPa --
500	4	1,30	1,345	0,915	0,095	47,8	26,8	0,35	109,7	0,0015	15,55	0,033
500	5	2,38	1,042	1,472	0,166	59,5	29,1	0,61	43,2	0,0062	13,65	0,063
500	6	1,84	1,303	0,986	0,139	49,4	36,6	0,36	83,0	0,0032	17,77	0,045
500	7	1,18	1,394	0,848	0,096	45,9	29,0	0,28	90,1	0,0019	12,91	0,026
500	8	1,45	1,453	0,773	0,113	43,6	37,7	0,26	120,3	0,0019	17,46	0,028
500	9	2,48	0,997	1,582	0,130	61,3	21,2	0,68	46,2	0,0050	10,68	0,051
500	10	1,71	1,231	1,093	0,121	52,2	28,5	0,47	95,2	0,0045	17,62	0,053
500	11	2,53	0,972	1,650	0,182	62,3	28,4	0,69	35,4	0,0083	15,49	0,085
500	12	1,29	1,378	0,869	0,103	46,5	30,6	0,32	111,0	0,0023	18,91	0,037
500	13	1,31	1,426	0,806	0,085	44,6	27,1	0,22	128,4	0,0018	21,52	0,025
500	14	1,00	1,375	0,873	0,076	46,6	22,5	0,28	161,6	0,0021	21,40	0,026
500	15	0,78	1,442	0,786	0,045	44,0	14,6	0,24	159,2	0,0013	16,43	0,019
> 500	1	0,95	1,360	0,893	0,011	47,2	3,3	0,27	187,4	0,0015	19,55	0,018
> 500	2	0,98	1,458	0,771	0,012	43,4	4,1	0,17	184,1	0,0011	23,03	0,015
> 500	3	1,01	1,346	0,914	0,013	47,7	3,7	0,26	210,9	0,0011	17,55	0,014
> 500	4	1,84	1,159	1,222	0,014	55,0	3,0	0,38	136,8	0,0023	16,22	0,022
> 500	5	1,09	1,551	0,661	0,010	39,8	3,8	0,09	156,3	0,0008	25,91	0,012
> 500	6	2,80	0,922	1,793	0,018	64,2	2,6	0,53	49,5	0,0056	16,63	0,042
> 500	7	1,34	1,310	0,965	0,018	49,1	4,9	0,28	178,3	0,0012	14,84	0,013
> 500	8	1,33	1,375	0,872	0,014	46,6	4,2	0,24	215,3	0,0011	17,84	0,014
> 500	9	1,41	1,324	0,945	0,018	48,6	4,8	0,24	203,6	0,0013	20,20	0,015
> 500	10	1,74	1,226	1,101	0,019	52,4	4,4	0,34	130,9	0,0023	18,34	0,025
> 500	11	1,27	1,291	0,995	0,016	49,9	4,1	0,28	192,4	0,0012	16,08	0,014
> 500	12	1,12	1,295	0,988	0,015	49,7	3,8	0,31	191,8	0,0011	12,98	0,013
> 500	13	0,96	1,413	0,823	0,009	45,1	2,8	0,20	219,3	0,0019	43,38	0,023
> 500	14	1,00	1,366	0,884	0,010	47,0	2,8	0,22	189,9	0,0014	24,74	0,018
> 500	15	1,04	1,380	0,866	0,012	46,4	3,5	0,19	143,0	0,0014	21,33	0,018

Anexo E. Teor de carbono orgânico (CO), densidade do solo (Ds), umidade gravimétrica (Ug), porosidade total (Pt), coeficiente de atrito ( $\tan \phi$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão (c) de um Nitossolo Vermelho distrófico.

Tensão	Rep	CO	Ds	Ug	Gsi	Pti	$\tan \phi$	$\phi$	Coesão
- kPa -		--- % ---	- Mg m <sup>-3</sup> -	-- g g <sup>-1</sup> --	-- % --	---% ---		-- ° --	- kPa -
6	1	3,78	1,170	0,378	74,1	56,9	0,7803	38,0	0,0
6	2	3,41	1,117	0,333	61,8	60,2	0,7618	37,3	8,7
6	3	3,13	1,136	0,325	61,7	59,5	1,0826	47,3	0,0
6	4	3,41	1,090	0,354	63,6	61,1	0,5600	29,2	13,4
6	5	2,92	1,103	0,341	61,8	60,7	1,0094	45,3	0,0
6	6	3,01	1,105	0,348	63,1	60,6	0,7086	35,3	4,8
6	7	2,76	1,132	0,319	60,5	59,6	0,4790	25,6	31,2
6	8	3,02	1,095	0,341	61,2	60,9	0,5296	27,9	24,8
6	9	4,04	1,123	0,422	79,0	59,9	0,4928	26,2	10,5
6	10	4,57	1,182	0,346	70,7	57,8	0,6336	32,4	0,0
6	11	2,75	1,175	0,306	61,7	58,1	0,8967	41,9	0,0
100	1	3,55	1,232	0,288	63,1	56,1	0,9391	43,2	34,1
100	2	2,50	1,168	0,281	56,1	58,4	0,9012	42,0	11,0
100	3	2,02	1,090	0,282	50,2	61,1	0,8764	41,2	1,6
100	4	2,23	1,126	0,276	51,9	59,8	0,8707	41,0	15,6
100	5	1,94	1,092	0,291	52,0	61,1	0,8563	40,6	20,2
100	6	2,88	1,058	0,283	47,9	62,3	0,7607	37,3	13,7
100	7	2,16	1,018	0,273	43,7	63,7	0,9856	44,6	0,0
100	8	1,96	1,080	0,263	46,3	61,5	0,8730	41,1	17,2
100	9	3,00	1,056	0,337	57,1	62,3	0,7104	35,4	8,5
100	10	3,29	1,113	0,382	70,3	60,3	0,4074	22,2	43,0
100	11	1,74	1,166	0,297	59,5	58,4	0,9523	43,6	0,5
500	1	3,32	1,188	0,274	56,3	57,6	1,0126	45,4	32,5
500	2	3,58	1,172	0,266	53,6	58,2	0,6783	34,1	64,0
500	3	3,37	1,079	0,270	47,4	61,5	0,9692	44,1	3,0
500	4	2,90	1,091	0,277	49,7	61,1	1,2722	51,8	0,0
500	5	2,85	1,109	0,269	49,4	60,5	0,8903	41,7	0,7
500	6	3,15	1,015	0,278	44,2	63,8	0,7642	37,4	13,2
500	7	2,10	1,085	0,264	46,7	61,3	0,8507	40,4	19,3
500	8	3,15	1,109	0,265	48,6	60,4	0,5233	27,6	54,7
500	9	3,46	1,033	0,295	48,3	63,1	0,5958	30,8	54,9
500	10	3,63	1,152	0,332	65,0	58,9	0,5806	30,1	51,6
500	11	2,53	1,173	0,277	55,9	58,2	0,8812	41,4	24,6

Anexo F. Teor de carbono orgânico (CO), densidade do solo (Ds), umidade gravimétrica (Ug), porosidade total (Pt), coeficiente de atrito ( $\text{tg } \phi$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão (c) de um Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

Tensão	Rep.	CO	Ds	Ug	Pt	GS	$\text{tg } \phi$	$\phi$	c
- kPa -		--- % ---	- Mg m <sup>3</sup> -	--- g g <sup>-1</sup> ---	--- % ---	--- % ---		°	kPa
6	1	0,93	1,371	0,170	46,7	50,0	0,6586	33,4	0,0
6	2	1,44	1,500	0,225	41,7	81,0	0,6594	33,4	0,0
6	3	1,14	1,331	0,185	48,3	51,1	0,6486	33,0	0,0
6	4	1,47	1,453	0,213	43,6	70,9	0,6497	33,0	0,0
6	5	1,81	1,213	0,264	52,9	60,5	0,6200	31,8	0,0
6	6	1,57	1,287	0,238	50,0	61,2	0,6427	32,7	0,0
6	7	2,14	1,150	0,286	55,4	59,4	0,6360	32,5	0,0
6	8	1,39	1,479	0,209	42,6	72,7	0,6539	33,2	0,0
6	9	1,04	1,473	0,183	42,8	62,9	0,5661	29,5	0,0
6	10	1,02	1,497	0,159	41,9	56,8	0,6303	32,2	0,0
100	1	1,44	1,264	0,143	50,9	35,5	0,6582	33,4	0,0
100	2	1,54	1,468	0,152	43,0	52,0	0,7341	36,3	0,2
100	3	1,66	1,227	0,171	52,4	40,1	0,6559	33,3	0,8
100	4	1,68	1,390	0,142	46,0	42,9	0,6885	34,5	0,0
100	5	1,42	1,252	0,142	51,4	34,5	0,7092	35,3	0,0
100	6	1,68	1,316	0,152	48,9	40,9	0,7171	35,6	0,0
100	7	1,55	1,234	0,138	52,1	32,8	0,6228	31,9	3,0
100	8	1,42	1,480	0,130	42,5	45,4	0,7471	36,8	0,6
100	9	1,08	1,456	0,096	43,5	32,2	0,7238	35,9	3,7
100	10	1,04	1,540	0,090	40,2	34,4	0,7261	36,0	2,3
500	1	1,14	1,287	0,078	50,0	20,1	0,7107	35,4	0,0
500	2	1,15	1,442	0,091	44,0	29,8	0,7863	38,2	9,1
500	3	1,38	1,268	0,099	50,8	24,6	0,7250	35,9	0,0
500	4	1,32	1,362	0,097	47,1	28,1	0,6795	34,2	12,8
500	5	1,64	1,192	0,115	53,7	25,5	0,7004	35,0	2,2
500	6	1,29	1,354	0,086	47,4	24,7	0,6688	33,8	3,9
500	7	1,65	1,191	0,108	53,7	23,9	0,5721	29,8	11,5
500	8	1,05	1,466	0,080	43,1	27,2	0,7085	35,3	17,5
500	9	1,15	1,464	0,066	43,1	22,3	0,7368	36,4	17,2
500	10	0,74	1,517	0,054	41,1	19,8	0,8255	39,5	5,2