

UFSM

Tese de Doutorado

**ESTADOS DE COMPACTAÇÃO E SUAS IMPLICAÇÕES
NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E NA PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS EM DOIS LATOSSOLOS SOB PLANTIO DIRETO**

Deonir Secco

Santa Maria, RS, Brasil

2003

**ESTADOS DE COMPACTAÇÃO E SUAS IMPLICAÇÕES NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO E NA PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS EM DOIS LATOSSOLOS SOB PLANTIO DIRETO**

por
Deonir Secco

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Biodinâmica de Solos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

DOUTOR EM AGRONOMIA

PPGA

Santa Maria, RS, Brasil

2003

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Agronomia**

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

**ESTADOS DE COMPACTAÇÃO E SUAS
IMPLICAÇÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E NA
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM DOIS LATOSSOLOS
SOB PLANTIO DIRETO**

elaborada por

Deonir Secco

como requisito parcial para obtenção do grau de
DOUTOR EM AGRONOMIA

COMISSÃO EXAMINADORA:

PhD. Dalvan José Reinert
(Presidente/Orientador)

Dr. Joaquim Odilon Pereira

PhD. José Miguel Reichert

PhD. Reimar Carlesso

Dr. Renato Levien

Dedico a memória de meu pai, Ângelo Amélio Secco, um exemplo a ser seguido, e a minha família (Jana, Adriel e Nayanni).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade oferecida.

À Universidade de Cruz Alta, pela liberação parcial de minhas atividades docentes para realização deste curso.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná-UNIOESTE, pelo apoio e compreensão durante a fase de conclusão deste trabalho.

Aos professores Engenheiros Agrônomos PhD Reimar Carlesso, Dr. Alessandro Dal' Col Lúcio, PhD José Miguel Reichert e Dr. José Mário Dolleis França pelos ensinamentos e sugestões.

Em especial ao professor Engenheiro Agrônomo PhD Dalvan José Reinert pela orientação, ensinamentos e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e considerações;

Ao Engenheiro Agrônomo Ulfried Arns e ao proprietário rural Sr Arnaldo Yank, pela cedência das áreas experimentais e apoio na implantação das culturas.

Aos funcionários do departamento de solos, em especial ao Flavio Fontinelli, pela amizade e sugestões, pelo chimarrão e auxílio nos trabalhos de campo.

Aos colegas do curso pela convivência e companheirismo, em especial ao Vanderlei Rodrigues da Silva, Silvio Aymone Genro Junior, Claudir José Basso, Sergio Luiz de Oliveira Machado, Luciano Golpo Gatiboni, Carlos Porto, Carlos Alberto Flores, João Alfredo Braida, Gilberto Collares e Clóvis Orlando Da Ros.

Aos bolsistas do laboratório de física do solo, Raquel Bastos Rubin, Letícia Sequinatto, Douglas Kaiser, Marcelo Kunz, e em especial a Fernando Perobelli Ferreira, pelo auxílio na execução dos trabalhos de campo e laboratório.

Em especial a minha família que me incentivou nos momentos de dificuldade e que abdicaram dos momentos de lazer e convivência diária possibilitando a realização deste trabalho.

À todos demais colegas e professores aqui não lembrados.

À Deus por existir e pela saúde.

Muito obrigado a todos, que Deus ilumine seus caminhos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Sistema plantio direto e compactação do solo.....	4
2.2. Estado de compactação do solo e crescimento das plantas.....	5
2.3. Atributos físico-mecânicos para avaliar a compactação do solo.....	7
2.3.1. Densidade do solo.....	7
2.3.2. Resistência do solo à penetração.....	10
2.3.3. Compressibilidade do solo.....	11
2.3.3.1. Fundamentos teóricos.....	11
2.3.3.2. Fundamentos práticos.....	15
2.3.3.3. Tensões impostas por máquinas agrícolas.....	17
2.3.4. Resistência ao cisalhamento direto.....	18
2.3.4.1 Fundamentos teóricos.....	18
2.3.4.2 Fundamentos práticos.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Características gerais das áreas de estudo.....	25
3.2. Solos e clima.....	25
3.3. Tratamentos	26
3.4. Determinações.....	29
3.4.1. Atributos físicos e químicos avaliados.....	29
3.4.2. Ensaio de compressão uniaxial.....	30
3.4.3. Resistência do solo à penetração.....	32
3.4.4. Resistência ao cisalhamento direto.....	33

3.4.5 Produtividade das culturas.....	35
3.5. Análise estatística.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1. Densidade do solo.....	37
4.1.1 Densidade do solo no Latossolo Vermelho (LV).....	37
4.1.2 Densidade do solo no Latossolo Vermelho dsitroférico (LVd).....	38
4.2. Resistência do solo à penetração.....	39
4.2.1 Resistência do solo à penetração no LV.....	39
4.2.2 Resistência do solo à penetração no LVd.....	42
4.3. Parâmetros de compressibilidade do solo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação em água.....	45
4.3.1 Pressão de preconsolidação no LV (σ_p).....	45
4.3.2 Índice de compressão no LV (C_c).....	49
4.3.3 Distribuição da σ_p e do índice C_c por classes de densidade e graus de saturação inicial de umidade para o LV.....	52
4.3.4 Pressão de preconsolidação no LVd.....	53
4.3.5 Índice de compressão no LVd.....	55
4.3.6 Distribuição da σ_p e do índice C_c por classes de densidade e graus de saturação inicial de umidade para o LVd.....	58
4.3.7 Estudo comparativo dos parâmetros de compressibilidade entre o LV e o LVd.....	59
4.3.7.1 Pressão de preconsolidação do solo.....	59
4.3.7.2 Índice de compressão.....	61
4.3.8 Parâmetros de cisalhamento do solo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação de água.....	63
4.3.8.1 Coesão no LV (C).....	63

4.3.8.2 Ângulo de atrito interno no LV (ϕ).....	65
4.3.8.3 Coesão no LVd	66
4.3.8.4 Ângulo de atrito interno no LVd.....	67
4.4.6. Estudo comparativo dos parâmetros de cisalhamento entre o LV e o LVd.....	68
4.4.6.1 Coesão do solo.....	68
4.4.6.2 Ângulo e atrito interno do solo.....	70
4.4.7. Correlações	71
4.4.7.1 Parâmetros de compressibilidade e cisalhamento do LV e LVd.....	72
4.4.8 Regressões - Compressibilidade.....	75
4.4.9 Regressões - Cisalhamento.....	79
4.5. Efeito dos estados de compactação do solo sobre o rendimento das culturas do trigo, soja e milho.....	82
4.5.1 Cultura do trigo.....	82
4.5.2 Cultura da soja.....	84
4.5.3 Cultura do milho.....	85
5. CONCLUSÕES.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
7. ANEXOS.....	100

RESUMO

ESTADOS DE COMPACTAÇÃO E SUAS IMPLICAÇÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E NA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM DOIS LATOSSOLOS SOB PLANTIO DIRETO

Autor: Deonir Secco

Orientador: Dalvan José Reinert

Melhorar e preservar a qualidade estrutural do solo em áreas manejadas sob o sistema plantio direto, principalmente em solos de textura argilosa, é de fundamental importância quando almejamos maiores produtividades e preservação ambiental. Neste trabalho determinou-se a densidade (D_s), a resistência à penetração (R_s), a pressão de preconsolidação (σ_p), o índice de compressão (C_c), a coesão (C), o ângulo de atrito interno (Φ) e o rendimento de grãos das culturas do trigo, soja e milho, em três estados de compactação em um Latossolo Vermelho Distrófico típico-LV (550 g kg^{-1} de argila) e em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico-LVd (610 g kg^{-1} de argila), na região do planalto médio do Rio Grande do Sul. Os maiores valores de D_s e R_s , em ambos os Latossolos, ocorreram na profundidade de 0,07-0,12 m. Os parâmetros de compressibilidade e de cisalhamento direto do solo foram influenciados pelos estados de compactação. Os níveis de compactação proporcionaram aumentos de D_s , de R_s e de C , que conferiram aos dois Latossolos incrementos da σ_p e redução do índice C_c . O Φ não variou com a D_s ou com a umidade do solo e mostrou ser mais afetado pelo conteúdo de argila do solo. Quando o grau de saturação inicial (G_{si}) foi inferior a 60% a D_s apresentou maior relação com a compressibilidade e, quando o G_{si} foi superior a 60 %, o grau de saturação em água explicou melhor o comportamento compressivo nos dois Latossolos. A maior susceptibilidade à compactação ocorreu quando o G_{si} foi de 58% para o LV e 65 % para o LVd. A maior capacidade suporte ocorreu quando o grau de saturação

em água no início dos testes foi semelhante ou inferior a 40%, nos dois Latossolos. A cultura do trigo foi suscetível aos níveis de compactação existentes onde o maior estado de compactação proporcionou produtividade 18,35 % e 34,05 % menor em relação ao menor estado de compactação no LV e LVd, respectivamente. Os níveis de compactação do solo existentes nos dois Latossolos não promoveram decréscimos de produção na cultura da soja. Na cultura do milho, somente no LVd os níveis de compactação existentes promoveram decréscimo de produção, onde o maior estado de compactação proporcionou produtividade 24,31 % menor em relação ao menor estado de compactação.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Autor: Deonir Secco

Orientador: Dalvan José Reinert

Título: Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto.

Tese de Doutorado em Agronomia

Santa Maria, 06 fevereiro de 2003.

ABSTRACT

STATES OF COMPACTION AND THEIR IMPLICATIONS ON MECHANICAL BEHAVIOR AND CROP PRODUCTIVITY OF TWO HAPLORTOX UNDER NO TILLAGE

Author: Deonir Secco

Adviser: Dalvan José Reinert

To improve and to preserve the soil structural quality in areas under the no-tillage systems, especially in clayey soils, it is of fundamental importance to have larger productivities and environmental preservation. In this work it was evaluated bulk density (D_s), soil resistance to penetration (R_s), preconsolidation pressure (σ_p), compression index (C_c), cohesion (C), angle of internal friction (Φ) and yield of wheat, soybean and corn, in an Oxisol-LV ($550 \text{ g clay kg}^{-1}$) and in an Haplortox-LVd ($610 \text{ g clay kg}^{-1}$) with three states of compaction in the area of the medium plateau of Rio Grande do Sul, Brazil. The largest values of D_s and R_s , in both soils, happened in the depth of 0,07-0,12 m. The compressibility parameters and shear strength were affected by the states of compaction. The compacting levels provided increase of D_s , of R_s and of C , that caused increment of σ_p and reduction of the index C_c , for both Oxisols. Φ didn't vary with D_s or with the soil moisture and it showed to be more affected by soil clay content. When the initial saturation of water (G_{si}) was smaller than 60%, D_s presented larger relationship with the compressibility and, when G_{si} was greater than 60%, initial saturation of water explained the compressive behavior better. The largest compaction susceptibility

happened when Gsi was around 58% to LV and 65% for LVd. The higher soil bear capacity occurred for initial water saturation smaller than 40%, for both Oxisols. The states of compaction affected the wheat yield, where the largest state of compaction provided productivity 18% and 34% smaller than the smallest state of compaction, respectively, for LV and LVd. The levels of soil compaction for the two soils didn't promote production decreases in soybean yield. However, the largest state of compaction provided corn productivity 24% smaller as related to the smallest compacting state for the LVd soil, which is a clayey soil.

FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA
GRADUATE PROGRAM IN AGRONOMY

Author: Deonir Secco

Adviser: Dalvan José Reinert

Title: States of compaction and their implications on mechanical behavior and crop productivity of two haplortox under no tillage.

Thesis of Doctorate in Agronomy

Santa Maria, February 6, 2003.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos estados de compactação no Latossolo Vermelho e no Latossolo Vermelho distroférico, em função da resistência à penetração (Rs) e densidade do solo (Ds).....	27
Tabela 2. Atributos físicos dos solos utilizados no experimento (média de três repetições).....	29
Tabela 3. Atributos químicos dos solos utilizados no experimento (valores médios dos três estados de compactação do solo).....	30
Tabela 4. Seqüência de cultivos nas safras agrícolas 1999/2000 e 200/2001 de inverno e verão, nas áreas experimentais de Cruz Alta e de Coronel Barros.....	35
Tabela 5. Valores médios de densidade ($Mg\ m^{-3}$) de duas épocas do Latossolo Vermelho, sob três tensões de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	37
Tabela 6. Valores médios de densidade ($Mg\ m^{-3}$) de duas épocas do Latossolo Vermelho distroférico, sob três tensões de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	38
Tabela 7. Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) de duas épocas em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	47
Tabela 8. Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	48

Tabela 9. Valores médios do índice de compressão de duas épocas em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	49
Tabela 10. Valores médios do índice de compressão em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	51
Tabela 11. Distribuição da pressão de preconsolidação e do índice de compressão por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o Latossolo Vermelho. Cruz Alta, RS, 2001.....	52
Tabela 12. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) de duas épocas em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	53
Tabela 13. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	55
Tabela 14. Valores médios do índice de compressão de duas épocas em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	56
Tabela 15. Valores médios do índice de compressão em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	57

Tabela 16. Distribuição da pressão de preconsolidação e do índice de compressão por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o Latossolo Vermelho Distroférico. Coronel Barros, Rs, 2001.....	59
Tabela 17. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) de duas épocas entre os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em tensões de água para os solos LV e LVd.....	60
Tabela 18. Valores médios de índice de compressão de duas épocas entre os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em tensões de água para os solos LV e LVd.....	62
Tabela 19. Valores médios de coesão (kPa), de duas épocas, em um Latossolo Vermelho, sob dois graus de saturação inicial de água, três estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	64
Tabela 20. Valores médios de ângulo de atrito, em um Latossolo Vermelho, sob dois graus de saturação inicial de água, três estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.....	65
Tabela 21. Valores médios de coesão (kPa), em um Latossolo Vermelho distroférico, sob dois conteúdos de água, três estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	66
Tabela 22. Valores médios de ângulo de atrito, em um Latossolo Vermelho distroférico, sob dois conteúdos de água, três estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.....	68
Tabela 23. Valores médios de coesão (kPa) para os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em duas tensões de água para os solos Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho distroférico.....	69

Tabela 24. Valores médios de ângulo de atrito interno para os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em duas tensões de água para os solos Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho distroférico.....	70
Tabela 25. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água(Gsi). Cruz Alta, RS, 2001.....	72
Tabela 26. Valores de “r” de correlações para parâmetros de compressibilidade(σ_p e C_c) e cisalhamento(C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água(Gsi).Coronel Barros, RS, 2001.....	73
Tabela 27. Correlações (r) para parâmetros de compressibilidade(σ_p e C_c) e cisalhamento(C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água(Gsi).....	74
Tabela 28. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi). Cruz Alta, RS, 2001.....	76
Tabela 29. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi). Coronel Barros, RS, 2001.....	77

Tabela 30. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (C _c e σ_p) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água (G _{si}).....	78
Tabela 31. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água. Cruz Alta, RS, 2001.....	79
Tabela 32. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água. Coronel Barros, RS, 2001.....	80
Tabela 33. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento (C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água.....	82
Tabela 34. Produtividade e produção relativa da cultura do trigo em Latossolo Vermelho, safra 1999, em três estados de compactação no município de Cruz Alta, RS.....	83
Tabela 35. Produtividade e produção relativa da cultura do trigo em Latossolo Vermelho Distroférico, safra 2000, em três estados de compactação no município de Coronel Barros, RS.....	83
Tabela 36. Produtividade da cultura da soja em Latossolo Vermelho, safras 1999/2000 e 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Cruz Alta, RS.....	84

Tabela 37. Produtividade (Mg ha^{-1}) e produção relativa (%) da cultura da soja em Latossolo Vermelho distroférico, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Coronel Barros, RS....	84
Tabela 38. Produtividade e produção relativa da cultura do milho em Latossolo Vermelho, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Cruz Alta, RS.....	85
Tabela 39. Produtividade e produção relativa da cultura do milho em Latossolo Vermelho distroférico, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Coronel Barros, RS....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva característica de compressão de um solo submetido a pressões crescentes.....	13
Figura 2. Distribuição da resistência do solo à penetração, na profundidade de 7,5 cm, na área experimental do município de Cruz Alta, RS.....	28
Figura 3. Distribuição da resistência do solo à penetração, na profundidade de 7,5 cm, na área experimental do município de Coronel Barros, RS.....	28
Figura 4. Determinação dos parâmetros de cisalhamento: coesão (C) e ângulo de atrito interno (ϕ).....	34
Figura 5. Resistência do Latossolo Vermelho sob quatro condições de água média de 0 a 0,3 m, três estados de compactação e em área escarificada. a) $U_g=0,22 \text{ kg kg}^{-1}$; b) $U_g=0,23 \text{ kg kg}^{-1}$; c) $U_g= 0,27 \text{ kg kg}^{-1}$; d) $U_g=0,29 \text{ kg kg}^{-1}$. Cruz Alta, RS, 2001.....	40
Figura 6. Variação da resistência do solo no Latossolo Vermelho, nos três estados de compactação e na área escarificada, sob quatro conteúdos de água. a) EC1; b) EC2; c) EC3; d) Área escarificada. Cruz Alta, RS, 2001.....	41
Figura 7. Resistência do Latossolo Vermelho distroférico sob quatro condições de água média de 0 a 0,3 m, três estados de compactação e em área escarificada. a) $U_g=0,24 \text{ kg kg}^{-1}$; b) $U_g=0,26 \text{ kg kg}^{-1}$; c) $U_g= 0,29 \text{ kg kg}^{-1}$; d) $U_g=0,31 \text{ kg kg}^{-1}$. Coronel Barros, RS, 2001.....	43

Figura 8. Variação da resistência do solo no Latossolo Vermelho, nos três estados de compactação e na área escarificada, sob quatro conteúdos de água.

a)EC1; b)EC2;c)EC3; d)Área escarificada. Coronel Barros, RS, 2001..... 44

LISTA DE SÍMBOLOS

τ - tensão de cisalhamento.

σ - tensão normal total.

ϕ - ângulo de atrito interno.

C - coesão do solo.

e - índice de vazios.

C_c - índice de compressão.

σ_p - pressão de preconsolidação.

R_s - resistência do solo.

D_{si} - densidade inicial do solo.

G_{si} - grau de saturação em água inicial.

Arg - conteúdo de argila.

EC - estado de compactação do solo.

LV - Latossolo Vermelho Distrófico.

LVd – Latossolo Vermelho Distroférrico.

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, nas tensões de 33 e 300 kPa. Cruz Alta, RS, 2001.....	100
Anexo 2. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, nas tensões de 33 e 300 kPa. Coronel Barros, RS, 2001.....	101
Anexo3. Valores de “r” de correlações para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento(C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, nas tensões de 33 e 300 kPa.....	102
Anexo 4. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa. Cruz Alta, RS, 2001.....	103
Anexo 5. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa. Coronel Barros, RS, 2001.....	104

Anexo 6. Valores de “R ² ” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c), para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água (G_{si}), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa.	105
---	-----

1. INTRODUÇÃO

As áreas cultivadas sob o sistema plantio direto vêm sendo incrementadas gradativamente e sucessivamente, principalmente pelos produtores do sul do Brasil. Esse sistema de manejo do solo tem apresentado resultados animadores na contribuição para melhoria das características químicas e biológicas do solo, assim como grande redução da erosão do solo. Entretanto quanto às características físicas, pode-se verificar através de resultados de pesquisas, que isso nem sempre é verdadeiro, pois de maneira geral tem ocorrido incremento na densidade e na resistência à penetração do solo e redução da macroporosidade, principalmente em solos de textura mais argilosa. Nestes solos, em virtude da maior retenção de água, por apresentarem maior volume de microporos quando comparados a solos de textura arenosa, e da forma e disposição das partículas laminares, tem favorecido o processo de compactação dos mesmos.

A compactação devida ao sucessivo tráfego de máquinas e implementos agrícolas impõe ao solo tensões compactantes que condicionam maior grau de orientação de partículas, culminando no aumento da densidade do solo e na redução do espaço poroso, principalmente os macroporos. Esse efeito é maior quando as condições de umidade do solo estão acima do ponto de friabilidade e próximo ao limite plástico, onde os solos são mais sensíveis à compactação. A suscetibilidade de um solo à compactação depende de suas propriedades físico-mecânicas, as quais são funções do tipo de solo e do conteúdo de água aliadas ao seu estado estrutural.

As propriedades físico-mecânicas do solo como umidade, aeração, temperatura e resistência do solo à penetração, afetam diretamente a produção das culturas, as quais são dependentes da textura, estrutura, densidade, característica do perfil do solo, etc. Essas propriedades são afetadas pela compactação do solo, em maior ou menor intensidade, dependendo do nível de compactação; na maioria das vezes, de forma negativa, restringindo o

desenvolvimento do sistema radicular das plantas, reduzindo a absorção de água e nutrientes, comprometendo o pleno desenvolvimento das mesmas. O nível de compactação atual de um determinado solo tem sido referenciado como “estado de compactação”.

Entender a relação entre a tensão imposta por pneumáticos e deformação sofrida pelo solo é de extrema importância quando se deseja minimizar a degradação física do mesmo. Há a necessidade de manejar o solo visando a melhoria das condições físicas, por outro lado, quando o solo está bem estruturado, este se torna mais suscetível à deformação. O novo desafio é fazer com que a pressão dos pneumáticos seja adaptada de forma a não comprometer a estabilidade estrutural, ou seja, a tensão imposta deve ser adequada a resistência à deformação do solo.

Uma correta adequação da pressão aplicada ao solo combinado à condição de umidade, pode assegurar a manutenção das boas condições físicas do mesmo. O controle das condições de umidade do solo tem sido difícil face ao curto período de tempo, principalmente quando da instalação e colheita das culturas. A tensão imposta ao solo está diretamente relacionada ao peso e potência dos tratores, sendo que nas últimas três décadas tem ocorrido um acréscimo destes fatores devido à falta de critérios técnicos no dimensionamento e seleção de máquinas e implementos agrícolas. Já a resistência à deformação é função da resistência interagregados e intra-agregados, além da textura e da matéria orgânica.

A curva de compressão do solo relaciona o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da carga aplicada sobre o solo e, a partir dela, obtém-se a pressão de preconsolidação (parâmetro que expressa a capacidade do solo em suportar cargas) e o índice de compressão (parâmetro indicativo da suscetibilidade do solo à compactação). A pressão de preconsolidação determina o valor da tensão limite entre as deformações recuperáveis (plásticas) e irreversíveis ou permanentes (elásticas). Através desses parâmetros podemos

determinar a carga máxima capaz de ser suportada pelo solo sem que a estrutura sofra danos irreversíveis.

Em hipótese temos: a) o sistema plantio direto induz o solo a um maior estado de compactação aumentando a resistência do solo à penetração; b) para cada espécie cultivada existe um estado de compactação, a partir do qual ocorre comprometimento da produtividade; c) os parâmetros de compressibilidade e de resistência ao cisalhamento são função da saturação do solo em água, estado inicial da compactação e do conteúdo de argila do solo.

Deste modo, os objetivos deste trabalho foram determinar as implicações de três estados de compactação no comportamento mecânico de dois Latossolos e na produtividade das culturas do trigo, soja e milho sob sistema plantio direto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema plantio direto e compactação do solo

No sistema plantio direto, a ausência de revolvimento do solo e a manutenção de teores de umidade mais elevados em virtude da manutenção dos resíduos culturais, aliada ao tráfego sistemático de máquinas, podem promover compactação excessiva na superfície do solo, principalmente em solos com elevados teores de argila. A compactação por pneumáticos pode ser superficial, induzida pela insuflagem de ar nos pneus e subsuperficial, provocada pelo peso por eixo (Hakansson & Voorhes, 1996; Salire *et al.*, 1994).

A pressão provocada pelos pneumáticos de máquinas e implementos agrícolas é o principal fator responsável pela compactação do solo quando cultivado sob o sistema plantio direto. À medida que a superfície de contato rodado-solo é menor e o peso por eixo é maior, as forças compressivas (tensão de compressão) tende a compactar mais profundamente o solo. Quando a carga aplicada for maior de 6 toneladas por eixo pode causar sérias compactações abaixo de 40 cm. A profundidade máxima de efeito da compactação imposta por máquinas e implementos agrícolas, independentemente do tipo de solo e do peso da maquinaria, não excede 50 cm segundo Daniel & Maretti (1990).

A compactação do solo é um processo de densificação em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas, a resistência é aumentada e muitas mudanças são induzidas na estrutura do solo (Soane & Ouwerkerk, 1994). Pode também ser conceituada como um processo em que há redução da porosidade por forças compressivas aplicadas ao solo. A compactação altera as propriedades físicas do solo, geralmente com aumento da densidade, redução na porosidade total e na aeração (Carter, 1988). Essa compactação altera várias propriedades do solo, notadamente aquelas relacionadas à física do solo, como a densidade do solo, a porosidade e os parâmetros hídricos, provocando alterações indesejáveis

no espaço poroso do solo. Os fatores preponderantes que determinam o comportamento dos diferentes solos quando submetidos à compactação são a granulometria, o teor de matéria orgânica e o conteúdo de umidade do solo (Bodman & Constantin, 1966).

As propriedades físico-mecânicas do solo como umidade, aeração, temperatura e resistência do solo, afetam diretamente a produção das culturas, as quais são dependentes da textura, estrutura, densidade, característica do perfil do solo, etc. Essas propriedades são afetadas pela compactação do solo, em maior ou menor intensidade, dependendo do nível de compactação; muitas vezes, de forma negativa, restringindo o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, reduzindo a absorção de água e nutrientes, comprometendo o pleno desenvolvimento das mesmas.

As operações agrícolas quando realizadas sem o controle da umidade do solo, provocam aumento da área compactada do solo (Pedrotti & Dias Junior, 1996), o que pode reduzir a infiltração e conseqüentemente a disponibilidade de água para as plantas, comprometendo a produtividade. Registros de pesquisas têm mostrado redução de até 50 % da produtividade de culturas em solos de textura argilosa.

2.2 Estado de compactação do solo e o crescimento das plantas

A determinação do grau da influência da compactação do solo sobre o crescimento vegetal, baseia-se no estudo da forma e tipo de crescimento radicular, já que qualquer alteração na resistência do solo, pode ocasionar efeitos no crescimento destas (Taylor et al., 1966).

O crescimento do sistema radicular das culturas é afetado por diversos fatores ambientais que influenciam o desenvolvimento da parte aérea, bem como por fatores do solo. Dentre eles, destacam-se o impedimento mecânico, a disponibilidade de oxigênio e nutrientes, a presença de substâncias e elementos

tóxicos, compactação e dilaceramento radicular, a temperatura e a umidade, e o ataque de pragas e moléstias (Taylor & Arkin, 1981; Camargo & Alleoni, 1997).

A compactação do solo modifica o comprimento, diâmetro e distribuição das raízes das plantas no solo (Shierlaw & Alston, 1984), que por sua vez pode interferir no crescimento e na taxa de absorção de nutrientes (Barber *et al.*, 1988) e da água pelas raízes (Kuchenbuch & Barber, 1987). A distribuição espacial das raízes tem um efeito na absorção de água, porque a absorção ocorre num raio médio de 2cm (Tardieu, 1988). Bauder *et al.* (1985) afirmam que a compactação do solo em superfície é motivada pela ausência de revolvimento do solo e a frequência de tráfego, principalmente de colhedoras carregadas, e que a alta impedância mecânica resultante dessa compactação interfere no ambiente de crescimento das raízes, reduzindo a produtividade das culturas.

O nível da água no solo é o principal fator que afeta o crescimento das raízes das plantas (Barber *et al.*, 1988). Makay & Barber (1985) verificaram que o comprimento das raízes de milho aumentou de 41 para 52% quando o conteúdo volumétrico de água foi incrementado de 0,22 para 0,27 m.m⁻³, mas a partir deste teor o crescimento diminuiu. Assim, o conteúdo de água no solo afeta a relação entre a resistência do solo à penetração e o alongamento da raiz.

Na literatura existem inúmeros relatos dos níveis de compactação do solo cultivado sob o sistema plantio direto. Por outro lado, existem algumas dúvidas, tais como: em que nível a compactação do solo cultivado no sistema plantio direto influe negativamente na produção das culturas e, quais os limites críticos dos atributos físico-mecânicos para limitar o pleno desenvolvimento das plantas.

Os efeitos negativos de estados de compactação do solo no rendimento de culturas em condições de lavoura são escassos, face a dificuldade de isolar o fator compactação do solo. Adams & Wulfsohn (1997), trabalhando com solo franco siltoso e franco argiloso encontraram reduções nos rendimentos de 13 % no trigo e 7,5 % no milho, quando a densidade do solo passou de 1,07 para 1,19 Mg m⁻³. McAfee *et al.*(1989) encontraram redução do rendimento de 30 % na cultura da

aveia sobre um solo de textura argilosa, sendo que a resistência do solo variou entre 3,5 a 4,5 MPa.

2.3 Atributos físico-mecânicos para avaliar a compactação do solo

2.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo é uma relação entre a massa de sólidos e o seu volume e pode ser usada como medida direta do estado de compactação do solo. É afetada por sistemas de manejo do solo que alteram o espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando nas propriedades físico-hídricas importantes como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração, de acordo com Klein(1998).

Sistemas de manejo do solo condicionam alterações diferenciadas nos atributos físicos do solo, onde no sistema plantio direto há um maior favorecimento do processo de compactação do solo. Alguns estudos indicam maior compactação no sistema plantio direto em relação aos sistemas de manejo convencional e reduzido em virtude do acúmulo de pressões impostas pelos pneumáticos de máquinas agrícolas e do adensamento natural das partículas (Reinert, 1990; Klein, 1998).

Klein (1998), avaliando a densidade do solo em área com plantio direto submetido a diferentes manejos em um Latossolo Vermelho Escuro distrófico, com 3 anos de plantio direto, concluiu que a descompactação do solo persiste por aproximadamente um ano, e que segundo ele, isso demonstra que o efeito da descompactação do solo em áreas com plantio direto não é muito duradouro, e que após um certo período o solo tende novamente a ser compactado, ou por adensamento natural ou pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre

a superfície do solo com umidades elevadas, chegando a níveis semelhantes ao solo não descompactado.

Outros fatores de diferentes naturezas também são normalmente relacionados com o aumento da densidade do solo. Atributos e condicionantes físicos e químicos, principalmente, e em menor escala, as características mineralógicas, sedimentológicas e de mecânica do solo são alguns dos fatores relacionados com o fenômeno, embora, na maioria das vezes, todos sejam avaliados de forma isolada. A contribuição do conjunto desses fatores e mesmo suas possíveis interações é algo pouco estudado e que deveria merecer maior atenção por parte dos cientistas do solo. No que diz respeito à gênese de tais camadas, por exemplo, além dos efeitos sabidamente conhecidos de máquinas e equipamentos, ocupa posição de destaque, embora com menos enfoque nos trabalhos tradicionais, o papel das partículas do solo, cuja distribuição pode influenciar de maneira significativa a predisposição a esse empacotamento. Tal afirmação encontra subsídio no fato da observação de camadas adensadas em solos naturais, em que nunca se processou qualquer tipo de atividade antrópica. Independente da ação humana, quando tal distribuição ocorre de forma uniforme em vários tamanhos, não se concentrando em determinadas classes, a chance de as partículas se ajustarem, umas nos espaços deixados pelas outras, é muito facilitada, potencializando a compactação.

Mantovani (1987), também afirma que solos, cuja constituição seja de partículas de mesmo tamanho, são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados àqueles onde há mistura de argila, silte e areia. Segundo ele, isto se deve ao fato das partículas de tamanho diferentes se arranjam e preencherem os poros, quando submetidas a uma pressão no solo. Ainda segundo este autor, as pressões aplicadas à superfície do solo por um pneu de trator são aproximadamente iguais àquela de inflar um pneu.

Resultados de pesquisas indicam que o estado de compactação mais intenso em área manejadas sob sistema plantio direto, indicado pela densidade do

solo e/ou resistência do solo à penetração, ocorre em média, a partir de 7 cm até aproximadamente 15 cm de profundidade, o que segundo Vieira (1981), o sistema plantio direto apresenta a tendência à compactação na camada superficial (0-15 cm), que pode ser evidenciado pelo aumento da densidade do solo.

Não existe um consenso entre os autores em relação ao valor crítico para a densidade do solo (valor a partir do qual o solo pode ser considerado como compactado). Shierlaw & Alston (1984), afirmam que a penetração do sistema radicular da cultura do milho deixou de ocorrer quando a densidade do solo atingiu valores de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, em solo de textura média. Moraes et al. (1991) ao avaliarem a influencia de camadas subsuperficiais compactadas em um Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada, afirmam que ocorreu redução na massa seca de raízes de soja de 59,98 % para o Latossolo Roxo com densidade de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ e de 50,65 % para a Terra Roxa Estruturada com densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$. Fernandez *et al.* (1995) encontraram inibição completa do crescimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho Escuro, textura média, a partir de $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ de densidade do solo. Camargo & Alleoni (1997) consideram que $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ como sendo um valor crítico em solos franco-argilosos a argilosos. Maria et al. (1999) constataram que acima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, em Latossolo Roxo, ocorre restrição ao desenvolvimento de raízes quando o solo estiver na capacidade de campo. Entretanto Reinert et al., (2001), afirma que de maneira generalizada, baseado nos experimentos realizados e em alguns resultados relatados na literatura disponível, propõem os seguintes valores críticos de densidade do solo, caracterizando determinado estado de compactação como solo compactado: horizonte de textura argilosa, com mais de 55% de argila = $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$; horizonte de textura média, com argila entre 20 e 55% = $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$; horizonte de textura arenosa, com menos de 20 % de argila = $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$.

2.3.2 Resistência do solo à penetração

Durante as operações de manejo do solo e semeadura são aplicadas forças compactativas que afetam a resistência do solo à penetração (Voorhees *et al.*, 1989), o que ocorre devido às modificações das condições físicas do mesmo. A alta resistência do solo que se estabelece causa prejuízo ao crescimento do sistema radicular (Taylor & Ratcliff, apud Rosalem *et al.*, 1999). A resistência do solo à penetração é devida a dois fatores: a) “compressão” das partículas primárias e b) fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento relativo da raiz (Groenevelt *et al.*, 1984); ou melhor, a resistência à penetração é resultante de forças oriundas da compactação, que é definida pela densidade aparente, pelo teor de água e textura do solo.

Em geral a resistência mecânica do solo à penetração aumenta proporcionalmente com o aumento da densidade e decresce com o conteúdo de água, segundo Cassel & Lal (1992).

A resistência que o solo oferece ao desenvolvimento das raízes difere da resistência medida pelos penetrômetros. A raiz cresce através dos poros e pontos de menor resistência, enquanto os penetrômetros avaliam a resistência média que o solo oferece à introdução do equipamento. No entanto, esse valor apresenta boa correlação com o desenvolvimento de raízes, validando a sua utilização no preparo de substratos para testes de plantas com capacidade de vencer altas resistências (Taylor, 1974).

Por sua vez, Taylor e Brar (1991), afirmam que as raízes exercem pressões que variam de 0,6–1,5 MPa, e que quando a resistência do solo for maior que estes valores, as raízes diminuem seu crescimento e modificam sua morfologia. Bengough & Mullins (1990) reportaram que a máxima pressão radial que as raízes podem exercer é entre 0,9 e 1,3 MPa, e que a elongação das raízes no solo param quando a resistência à penetração for entre 0,8 e 5,0 MPa dependendo da espécie vegetal e do tipo de solo.

Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada (Taylor *et al.*, 1966). Num latossolo roxo, Petter (1990) verificou que a resistência de 2,8 MPa foi limitante para o crescimento radicular da soja. Por sua vez, Nesmith (1987), adotou o valor de 2,0 MPa como limite crítico de resistência para a penetração de raízes. Hakansson (1992) encontrou valores críticos para a resistência à penetração do solo, de 2 a 3 MPa. Segundo Mendes (1989), verificou que quando os valores de resistência à penetração ficaram acima de 1,8 MPa, reduziram em 70 % o enraizamento da cultura do milho em um Latossolo muito argiloso.

De maneira geral, aceita-se o valor de 2,0 MPa como sendo o valor limite ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas e o solo passa a ser considerado como sendo compactado, porém em função da resistência à penetração estar diretamente relacionada a umidade do solo, apresentando relação inversa, têm sido bastante difícil estabelecer a nível de campo os valores críticos de resistência em função do processo de umedecimento e secagem devidos a chuvas, que alteram rapidamente de uma possível condição limitante para não limitante, em termos de resistência do solo à penetração.

2.3.3 Compressibilidade do solo

2.3.3.1 Fundamentos teóricos

Devido às restrições que o processo de compactação pode causar às plantas e ao solo, como limitação da adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento radicular, diversos atributos do solo têm sido usados na identificação deste problema. As propriedades físicas do solo mais usada nessa identificação têm sido a densidade do solo, sua resistência à penetração, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, pressão crítica na qual os agregados sofrem cisalhamento e mais

recentemente a pressão de pré-consolidação (σ_p) (Dias Junior, 1994). O mesmo autor afirma que a pressão de pré-consolidação (história de tensão: pode ser entendida como sendo a maior pressão que o solo já suportou no passado, o que em termos de agricultura reflete o tipo de manejo utilizado) é o único atributo físico do solo capaz de quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados ao solo sem que haja compactação adicional.

Segundo Kondo & Dias Junior (1997), um dos grandes entraves à mecanização intensiva do solo refere-se à sua suscetibilidade à compactação, que torna-se crítica em condições de umidade excessiva. A determinação da curva de compressão é a base necessária para esse entendimento, a qual representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios e faz previsão de prejuízo à estrutura do solo quando as pressões aplicadas excederem a capacidade suporte do mesmo.

A curva de compressão do solo (Figura 1), entretanto, tem sido usada com base comum para modelar a suscetibilidade do solo à compactação. Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear, entretanto, quando o solo já experimentou pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, a variação das pressões atuando sobre o solo determinará a formação de duas regiões distintas na curva de compressão: a curva de compressão secundária e a reta de compressão virgem (Lebert & Horn, 1991). A curva de compressão secundária representa os níveis de pressões experimentados pelo solo no passado, enquanto a reta de compressão virgem representa as primeiras pressões aplicadas ao solo. É na região da curva de compressão secundária, porém, que o solo deve ser cultivado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional. É esse componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo e que está sendo negligenciado nas metodologias utilizadas para avaliar a susceptibilidade à compactação dos solos, segundo Dias Junior (1994). Assim, a pressão de pré-consolidação divide a curva

de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária), e uma de deformações plásticas e não recuperáveis (reta de compressão virgem). Portanto, na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão previamente aplicada ao solo deve ser evitada para que não ocorra compactação adicional.

Assim, através da compressibilidade podemos estudar a relação tensão/deformação dos solos para que possamos estabelecer a capacidade suporte de cargas (pressão de pré-consolidação) e a sua suscetibilidade à compactação (índice de compressão).

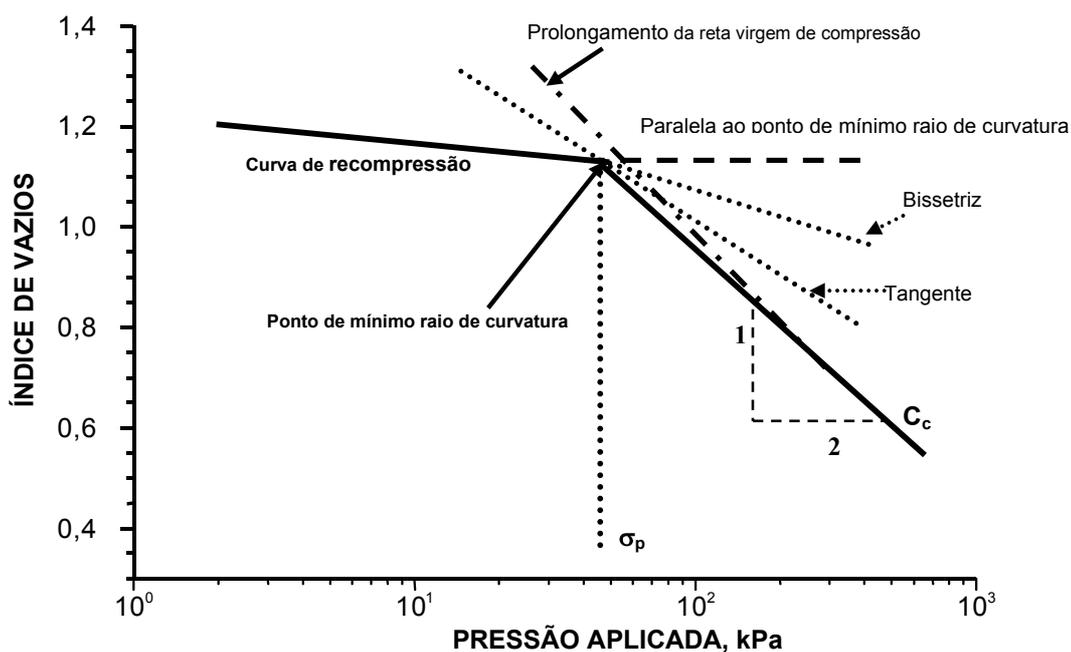


Figura 1. Curva característica de compressão de um solo submetido a pressões crescentes.

Compressibilidade é definida como a resistência que o solo oferece à redução de volume quando é sujeito a carga mecânica (Horn & Lebert, 1994). A intensidade com que a deformação se manifesta, quando submetidos à tensões, está relacionada diretamente com a compressibilidade.

Os fatores internos que influenciam na resistência do solo à deformação de acordo com Horn & Lebert (1994) são a distribuição do tamanho dos grãos, densidade do solo, potencial de água no solo, conteúdo de matéria orgânica e agregação do solo. Já os fatores externos que afetam a resistência são o tipo de carga (estática ou dinâmica), a duração do carregamento e o número de eventos de carregamento e o potencial de água durante o carregamento. Quando a tensão aplicada exceder a resistência do solo, ocorre um decréscimo no volume de poros, porque as partículas minerais são incompressíveis.

A compressibilidade é menos pronunciada em solo com estrutura grosseira e menos agregada, assim solos pedregosos são menos compressíveis que solos arenosos ou de textura fina (Horn, 1988). Entretanto, qualquer desvio de partículas de formato esférico, resultam num incremento na resistência ao cisalhamento e assim na resistência do solo (Gudehus, 1981; Hartge & Horn, 1991).

Com o aumento da quantidade de substâncias orgânicas, a resistência ao cisalhamento torna-se maior comparado ao mesmo material (Horn, 1981). Entretanto, o tipo de substância orgânica também deve ser considerado (Bachmann, 1988). Em solos agrícolas com similares propriedades químicas e físicas, o valor da pressão de preconsolidação, o ângulo de atrito interno e a coesão, parecem ser maior com a maior proporção de carboidratos, lignina, ácidos polímeros alifáticos e matéria orgânica total (Hempfling et al., 1990).

O incremento da resistência ao cisalhamento pode ser resultado do aumento do número de pontos de contato entre partículas (Hartge & Horn, 1984). Entretanto em solos com densidades semelhantes, a resistência pode ser diferente. Essa aparente anomalia ocorre devido a densidade de partículas e do tamanho de agregados (como é relatado o número de pontos por unidade de

volume) e a proporção de poros intra-agregados são sempre maior no solo que apresentar maior densidade de partículas (Horn, 1986; Gunzelmann, 1990; Becher, 1991).

Entretanto a resistência do agregado também depende da intensidade do secamento e do número de eventos de secagens. Para a mesma densidade, a tensão de cisalhamento também varia quando o agregado foi reumedecido para um mesmo conteúdo de água. A explicação é que a resistência do solo não depende somente da densidade do solo e da densidade de partículas, mas também da livre entropia, como é relatado o rearranjo do tamanho das partículas no agregado. Durante repetidos ciclos de umedecimento e secagem, normal e residual contração podem causar consideráveis mudanças neste arranjo (Horn & Dexter, 1989). Adicionalmente, nos agregados do solo, a distribuição do tamanho de partículas influencia nos parâmetros de cisalhamento. Quando o conteúdo de argila excede 40 %, a resistência do solo a um potencial conhecido de umidade, pode ocorrer pequeno incremento por causa das mudanças do raio efetivo e pressões neutras (Horn, 1990).

2.3.3.2 Fundamentos práticos

O estudo da compressibilidade do solo é de fundamental importância para conhecermos duas características do solo: a capacidade de suportar cargas se que ocorra compactação adicional ou deformações permanentes e, a susceptibilidade à compactação. Em relação a susceptibilidade à compactação, esta pode ser imprescindível para nos auxiliar na definição do momento em que o mesmo se encontra com o conteúdo de água mais adequado para a realização das operações de implantação e manejo das culturas e/ou na estimativa da deformação caso as tensões aplicadas ao solo forem maior que sua capacidade de suportar cargas.

Kondo & Dias Junior (1999), ao realizarem estudo dos parâmetros de compressibilidade em três Latossolos na região de Lavras-MG, concluíram que com o incremento do conteúdo de água, ocorreu redução na capacidade suporte destes, independente do tipo de manejo a que haviam sido submetidos. Os mesmo autores afirmam que o conteúdo de água do solo foi o fator principal e regulador do comportamento compressivo destes solos e que a densidade inicial alterou as curvas de compressão.

Carpenedo (1994), estudou a variação do conteúdo de água nas tensões de 6, 100 e 300 kPa, nos solos Podzólico Vermelho-Escuro, Podzólico Vermelho-Amarelo e Latossolo Roxo distrófico, onde concluiu que os parâmetros de compressibilidade (pressão de preconsolidação e índice de compressão) foram influenciados pelos sistemas de manejo, tensões de umidade e pelos solos. Concluiu também que 91 % da variabilidade do índice de compressão pode ser explicada pela densidade do solo e o ângulo de atrito inter-agregados e 64 % da variabilidade da pressão de preconsolidação pode ser explicada pela resistência dos agregados, grau de compactação inicial, umidade volumétrica e coesão entre os agregados.

Reinert (1990) estudando o comportamento compressivo de solos sob sistema plantio direto e convencional através de amostras indeformadas, encontrou relação significativa entre a densidade do solo e o grau de saturação inicial de água. Quando o grau de saturação foi inferior a 45 % a densidade do solo apresentou maior relação com a compressibilidade e, quando grau de saturação foi superior a 45 %, o grau de saturação em água apresentou maior relação com a compressibilidade. Concluiu que a compressibilidade do solo quando mais seco foi limitada pelo estado inicial de compactação e quando mais úmido pelo estado inicial de saturação em água.

Silva et al. (2000), ao avaliarem a suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo, sob os sistemas de manejo convencional e plantio direto e diferentes graus de saturação

inicial de umidade, concluiu que a deformação do solo apresentou comportamento diferenciado para cada solo. Em relação ao Latossolo Vermelho-Escuro, objeto deste estudo, quando o grau de saturação em água foi menor que 30 %, a relação entre deformação e densidade inicial foi curvilínea, enquanto, para graus de saturação mais elevado, foi praticamente linear. O índice de compressão relacionou-se negativamente com a densidade inicial do solo nos dois solos. Para níveis de densidade inicial maiores que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, a maior suscetibilidade à compactação ocorreu quando o grau de saturação ficou próximo de 70%, e para níveis de densidade inicial $< 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, a maior suscetibilidade à compactação ocorreu quando o grau de saturação ficou próximo de 50%. Concluiu ainda que as equações de regressão múltipla para a pressão de preconsolidação, utilizando somente valores de densidade inicial e grau de saturação, apresentaram coeficientes de determinação baixos ($=0,32$ para o Latossolo), apesar de significativos.

Imhoff (2002), avaliando a influência da umidade, matéria orgânica, teor de argila e densidade do solo, nos parâmetros de compressibilidade em Latossolos e Argissolos Vermelhos, concluiu que o índice de compressão foi significativamente relacionado com o teor de argila e densidade do solo. A pressão de preconsolidação foi significativamente relacionada com a umidade, densidade e teor de argila do solo e que, a compressibilidade foi dependente da densidade do solo.

2.3.3.3 Tensões impostas por máquinas agrícolas

A importância em conhecermos as tensões impostas por máquinas agrícolas ao solo, reside no fato de que na medida do possível devemos adequar a pressão imposta a capacidade suporte do solo, para que deformações plásticas (irrecuperáveis) não ocorram. Caso não consigamos adequar a tensão aplicada à capacidade suporte do solo, devemos estabelecer às condições limites de

umidade, tendo em vista que a capacidade suporte dos solos ser inversamente proporcional ao conteúdo de água no solo.

Hakansson & Voorhes (1997), afirmam que a intensidade do tráfego e as características das máquinas, como peso, carga por eixo, tipo de rodado e/ou de pneus e pressão de insuflagem, como as principais causas da compactação do solo. Já, em relação às características intrínsecas do solo, a compactação é influenciada pela matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995), pela estrutura (Horn et al., 1988), pelo conteúdo de água e densidade inicial do solo (Reinert, 1990).

De acordo com Chancellor (1976), as tensões dinâmicas aplicadas na superfície do solo pelas máquinas agrícolas, são semelhantes à pressão de insuflagem dos pneus. Fekete, 1972, citado por Soane et al. (1982), afirma que a pressão de insuflagem de pneus de colhedoras automotrizes variam de 50 a 150 kPa e a pressão de insuflagem dos pneus de reboques e caminhões variam de 300 a 600 kPa.

Reaves & Cooper (1960), afirmam que pressões de 50 a 300 kPa, são comumente aplicadas pelos rodados dos tratores agrícolas. Rusanov (1991) observou que no preparo do solo com trator de esteira a pressão exercida foi de 150 kPa, já o trator com pneus, exerceu uma pressão de 180 a 200 kPa. Carpenedo (1994), afirma que normalmente as pressões médias aplicadas sobre a superfície do solo pelos pneus de tratores e colhedoras automotrizes estão entre 100 e 200 kPa, enquanto as carretas agrícolas exercem pressões que, dependendo da carga e em função da menor superfície de contato rodado-solo dos pneus destas, podem chegar a valores próximos de 600 kPa.

2.3.4 Resistência ao cisalhamento direto

2.3.4.1 Fundamentos teóricos

A resistência ao cisalhamento normalmente é definida como a resistência que o solo oferece para ocorrer uma nova deformação. Quando submetido a

forças externas, o solo reage de diferentes modos, de acordo com as características da tensão, como ocorre sua distribuição, orientação e magnitude. Cada modo corresponde a uma nova relação tensão-deformação, que pode envolver a compactação, falhas com dilatação e/ou fluxo plástico com mudança de volume. A teoria assim como os processos no material solo são complexos (muitos são heterogêneos e descontínuos).

Segundo Lebert & Horn (1991), através do cisalhamento direto obtém-se a linha de ruptura de Mohr-Coulomb, onde é possível determinar-se a coesão e o ângulo de atrito de solos estruturados.

As propriedades que determinam a resistência ao cisalhamento do solo são: forma e distribuição do tamanho de partículas do solo, conteúdo de umidade, estrutura, densidade, tipo de argilomineral presente, tipo e quantidade de cátions trocáveis e as forças de atração e repulsão entre as partículas (McCormack & Wilding, 1979). Horn et al., (1994) afirmam que a textura influi fortemente na resistência ao cisalhamento, devido a que a abundância de partículas finas afetam a intensidade de compactação, a qual tende a aumentar a resistência ao cisalhamento, segundo Voorhees et al., 1978.

A resistência ao cisalhamento dependerá, da tensão normal efetiva que atua no plano considerado e do ângulo de atrito interno do material. A importância de cada fenômeno é diferente em solos de distinta granulometria, sendo o cisalhamento nas areias devido a forças de massas, enquanto nas argilas o fenômeno se explica por forças de superfície (Martins, 1992).

Os fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento em solos coesivos são: estado de adensamento do solo, fragilidade ou estabilidade da estrutura do solo, condições de drenagem e velocidade de aplicação de cargas. Já em solos com areias merecem destaque àquelas características que afetam o ângulo de atrito interno, quais sejam, a forma e a granulometria das partículas (Caputo, 1967).

Os efeitos no solo (deformações ou fraturas), são dependentes de tensões efetivas. Usando os círculos de Mohr, pode-se correlacionar as causas (variações de estado de tensões) com seus efeitos.

A tensão de cisalhamento, pode ser expressa pela fórmula adaptada a critério de Mohr, chamada reta de Coulomb (válida para solos não coesos):

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg } \phi \quad (1)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (kPa);

σ = tensão normal efetiva (kPa);

ϕ = ângulo de obliquidade ou de atrito interno.

A força tangencial necessária para vencer o atrito entre dois corpos é independente da área de contato aparente entre elas e proporcional a força normal sobre os mesmos. Esta força oposta ao deslocamento das partículas é constituída por uma mistura de pressões de escorregamento e de rolamento entre grãos. O coeficiente de atrito é definido matematicamente como (Schafer & Johnson, 1982):

$$\mu = F_f / N = \text{tg } \phi \quad (2)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito (adimensional)

F_f = força tangencial à superfície de atrito (N);

N = força normal, perpendicular à superfície (N);

ϕ = ângulo de obliquidade ou de atrito interno.

O coeficiente de atrito é uma propriedade dinâmica, porque a equação se refere às forças que surgem durante o movimento de um corpo rígido do solo sobre outro. O coeficiente de atrito μ é independente da força normal aplicada, da área da superfície e da velocidade de escorregamento. O coeficiente de atrito μ para solos variam de 0,2 a 0,8.

O coeficiente de atrito do solo sobre outro material qualquer também pode ser determinado como uma propriedade do solo, e deve ser representado por um símbolo diferente de μ . No caso de máquinas agrícolas, o coeficiente de atrito solo-metal é de grande interesse na determinação do esforço de tração necessário (Balastreire, 1990).

Para solos com maiores teores de argila (coesos), a equação toma a seguinte forma:

$$\tau = C + \sigma \cdot \text{tg } \phi \quad (3)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (kPa);

C = coesão do solo (resistência cisalhamento de um solo na ausência de pressão);

σ = tensão normal efetiva (kPa);

ϕ = ângulo de obliquidade ou de atrito interno.

O cálculo do potencial de tração do solo é feito a partir da adaptação da equação de Coulomb, feita por Micklethwaite (1944):

$$P = C \cdot A + \sigma \cdot \text{tg } \phi \quad (4)$$

Onde:

P= potencial de tração (kPa);

C= coesão do solo;

A= área de contato rodado-solo.

O potencial de tração, no caso de solo argiloso úmido, pode ser aumentado através do aumento da área de contato dos pneumáticos, já que multiplica o fator mais importante neste tipo de solo (coesão). Para o caso de solos arenosos, onde existem maiores ângulos de atrito interno, se obtém aumento de tração com aumentos na carga sobre o pneu de tração.

2.3.4.2 Fundamentos práticos

A resistência ao cisalhamento associada ao da penetrabilidade, constitui a propriedade mecânica do solo que afeta grandemente o crescimento do sistema radicular das plantas (Forsythe,1975) e o comportamento eficiente de ferramentas agrícolas (Voorhees et al., 1978).

Os solos apresentam a propriedade de suportar cargas (capacidade suporte) conservando sua estabilidade. Este fenômeno se conhece como resistência ao cisalhamento.

A curva de resistência ao cisalhamento, em termos práticos, normalmente permite conhecer dois comportamentos que correspondem a resistência dos agregados e o da massa do solo. A primeira está determinada pelos fenômenos de coesão molecular, enquanto que a resistência de massa do solo depende da coesão superficial e do atrito entre partículas.

A partir do ensaio de cisalhamento direto, pode ser determinado o potencial de tração do solo, e desse modo, determinar os efeitos de preparo (ou de manejo) e de pastejo sobre a capacidade suporte do solo.

As características de resistência ao cisalhamento determinam o desenvolvimento de forças solo-trator ou solo-implemento, afetando a eficiência de tração (Stafford & Tanner, 1983). A mais efetiva forma de reduzir a compactação requer do uso de mínima carga e a máxima área de contato (Blackwell & Soane, 1981).

Segundo Larson & Gill (1973) o máximo de pressão sobre o solo é entre 2 a 3 vezes a pressão de inflação dos pneus. Quando a pressão interna do pneu é de 108 kPa, a pressão no solo corresponderá a faixa de 216 a 324 kPa, o que é maior que a tensão de cisalhamento de muitos solos em uma tensão de água de 33 kPa (capacidade de campo de solos argilosos).

As possíveis aplicações da teoria de Coulomb são:

- Na estimativa do potencial de tração do solo;
- Na determinação da coesão, ângulo de atrito interno e na resistência ao cisalhamento de solos (capacidade de suportar cargas);
- Como medida direta do estado de compactação dos solos, comparando diferentes sistemas de manejo do solo;
- Na melhor adequação das pressões impostas ao solo por pneumáticos (dimensões e lastragens), visando obter um melhor desempenho de tração e/ou minimização da compactação do solo;
- Na determinação do esforço de tração necessários pelos implementos de preparo do solo;
- Os dados de resistência ao cisalhamento poderão ser utilizados na confecção e validação de modelos matemáticos de predição de reações do solo (alterações nas propriedades físico-mecânicas) e de culturas (redução crescimento de planta e do sistema radicular, bem como da produtividade)

quando submetidos a diferentes pressões (mesmo quando as pressões ultrapassarem a capacidade suporte do solo);

- Ao obtermos os valores de coesão e ângulo de atrito interno do solo, poder-se-á estabelecer a tensão de cisalhamento (também denominada de resistência ao corte), onde estes valores poderão ser utilizados no dimensionamento de sulcadores de semeadoras-adubadoras, pois os mesmos deverão suportar tensões superiores às oferecidas pelo solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido em dois Latossolos onde identificou-se 3 estados de compactação que se originaram em virtude da intensidade de tráfego a que foram submetidos. Neste estudo procurou-se avaliar o impacto destes estados de compactação sobre os atributos físicos mecânicos do solo como a densidade, a resistência do solo, os parâmetros de compressibilidade (pressão de preconsolidação e índice de compressão) e de cisalhamento direto (coesão e ângulo de atrito interno) e, sobre a produtividade das culturas. Nos anos agrícolas de 1999/2000 e 2000/2001 foram cultivado trigo, soja, aveia preta e milho.

3.1 Características gerais das áreas de estudo

O experimento foi instalado em dois locais, um no município de Cruz Alta e o outro no município de Coronel Barros, ambos no Rio Grande do Sul. Em Cruz Alta a área destinada à instalação do experimento vinha sendo cultivada há quatorze anos em sistema plantio direto, com rotação de culturas no inverno (trigo, aveia, nabo) e verão (milho e soja). Em Coronel Barros, a área vinha sendo cultivada há sete anos em sistema plantio direto com o cultivo sucessivo de trigo no inverno e soja no verão, sem rotação de culturas.

3.2. Solos e clima

Em Cruz Alta o solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico-LV (Haplortox), semelhante à unidade de mapeamento Passo Fundo, e em Coronel Barros é um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico-LVd (Haplortox), pertencente à unidade de mapeamento Santo Angelo (EMBRAPA, 1999), que se caracterizam pela coloração vermelho escura, perfil profundo, boa drenagem e ocorrência em relevo ondulado. A textura do solo é

argilosa, apresentando valores médios de argila na profundidade de 0,0-0,25 m de 0,55 para o LV e 0,61 kg kg⁻¹ para o LVd, com predominância de argilas 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio.

A região do Rio Grande do Sul que compreende os municípios de Cruz Alta e Coronel Barros apresenta clima classificado como Cfa^{g2}, segundo o sistema Köppen, isto é, subtropical úmido, sem estiagem típica. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e do mês mais frio é superior a 3 °C e inferior a 18 °C. A precipitação média anual é maior do que 1600 mm, com tendência de maiores precipitações na primavera e verão.

3.3 Tratamentos

Nas duas áreas detectou-se estados de compactação diferenciado entre a área de “cabeceira” (estado de compactação mais intenso) e a área mais central da lavoura (estado de compactação menos intenso). Baseado nessa observação em uma área de 50x30 m, para cada solo, foram mapeados e separados três estados de compactação, em função da resistência do solo à penetração e densidade do solo. A resistência do solo à penetração foi determinada até a profundidade de 0,40 m, com o uso do penetrógrafo SOILCONTROL^R - PENETROGRAPHER^{PAT.} SC-60, onde o índice de cone foi obtido conforme norma ASAE R313, e a força por unidade de área é obtida a uma velocidade uniforme de penetração de 1829 mm por minuto, utilizando-se um cone de diâmetro na base de 12,83 mm. As leituras nas fichas foram obtidas através da interpolação de profundidades. Para mapear os diferentes estados de compactação, foram determinadas isolinhas de resistência do solo, onde para isso realizaram-se avaliações a cada 4 metros no sentido horizontal e avanços a cada 2 metros no sentido do comprimento ao longo das parcelas (30 m=15 avanços).

Confeccionou-se um mapa de isolinhas de resistência do solo à penetração da profundidade de 0,07 a 0,12 m, devido ser a camada com maior estado de compactação, e juntamente com a densidade do solo caracterizou-se três estados de compactação que foram usados como tratamentos (Tabela 1). Juntamente com a resistência do solo, determinou-se a umidade gravimétrica para as mesmas profundidades.

A densidade do solo, na caracterização inicial das áreas experimentais, foi determinada com cilindros de 3,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, nas profundidades de: 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,15, 0,15-0,20, 0,20-0,30 e de 0,30-0,50 m, para estabelecer até que profundidade ocorreu influencia do tráfego de máquinas. Em cada profundidade e estado de compactação, foram feitas duas repetições, num total de 12 pontos aleatórios por tratamento. Ao longo do experimento se monitorou a densidade através dos dados obtidos nos ensaios de compressibilidade.

Tabela 1. Caracterização dos estados de compactação no Latossolo Vermelho e no Latossolo Vermelho distroférico, em função da resistência do solo à penetração (Rs)¹ e densidade do solo (Ds)².

Estados de compactação	Rs (MPa)	Ds (Mg m ⁻³)
Latossolo Vermelho		
EC1	> 2,7	1,58
EC2	2,1 – 2,7	1,52
EC3	< 2,1	1,45
Latossolo Vermelho distroférico		
EC1	> 2,1	1,55
EC2	2,1 – 2,6	1,51
EC3	< 1,6	1,38

^{1,2} Valores médios da profundidade de 0,07-0,12 m.

Nas Figuras 2 e 3 encontram-se os mapas de distribuição da resistência do solo à penetração, para as áreas de Cruz Alta e Coronel Barros, respectivamente.

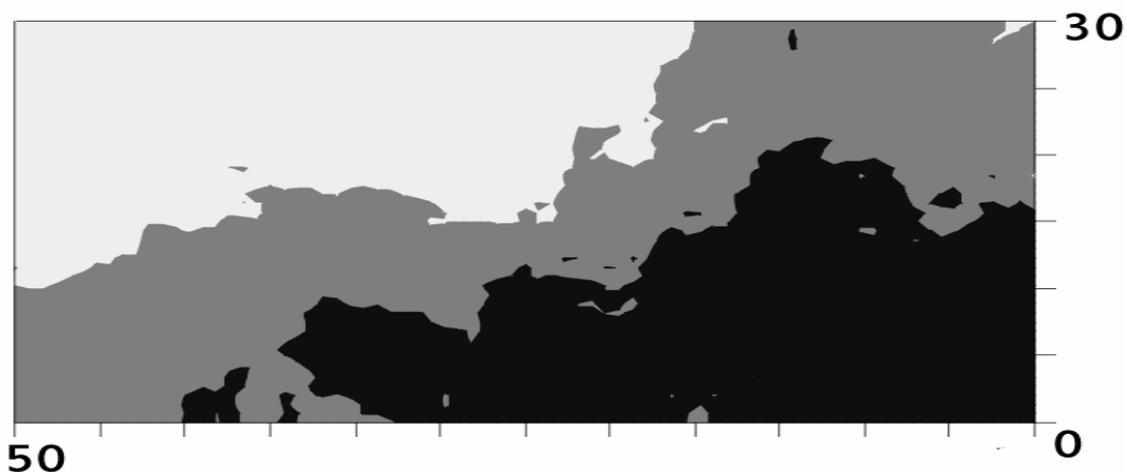


Figura 2. Distribuição da resistência do solo à penetração, na profundidade de 0,075 m, na área experimental do município de Cruz Alta, RS. (EC1=cor escura do mapa; EC2=cor cinza do mapa e, EC3= cor branca no mapa).

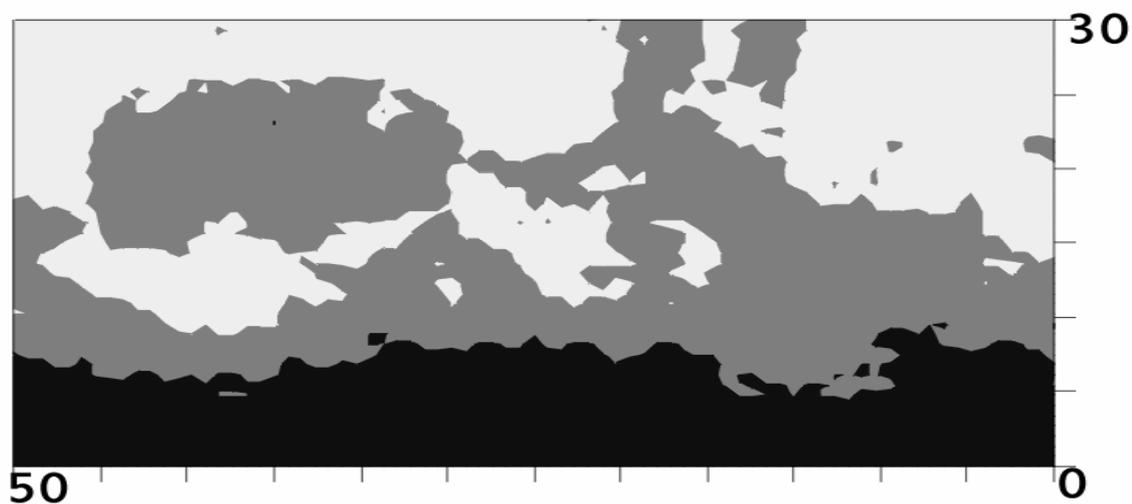


Figura 3. Distribuição da resistência do solo à penetração, na profundidade de 0,075 m, na área experimental do município de Coronel Barros, RS. (EC1=cor escura do mapa; EC2=cor cinza do mapa e, EC3= cor branca no mapa).

3.4 Determinações

3.4.1 Atributos físicos e químicos avaliados

As amostras parcialmente deformadas foram coletadas no início do estudo, secadas ao ar e submetidas às seguintes análises físicas: densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA-SNLC, 1979); limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade pelo método de Casagrande (Cauduro & Dorfman, 1986) e análise granulométrica pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). As amostras também foram submetidas à análise de rotina para caracterização química das mesmas.

Os resultados das análises físicas estão apresentados na Tabela 2 e os resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Atributos físicos dos solos utilizados no experimento (média de três repetições).

Solo	Profundidade (m)	Dp (Mg m ⁻³)	Granulometria				Limites de Consistência		
			AG	AF	Silte	Argila	LL	LP	IP
			————— g kg ⁻¹ —————						
LV	0,00-0,05	2,71	9,64	14,27	27,41	48,68	40,3	30,3	10,0
	0,07-0,12	2,76	9,24	13,08	21,06	56,62	37,6	27,0	10,6
	0,20-0,25	2,77	8,30	11,82	18,69	61,19	39,3	28,0	11,3
LVd	0,00-0,05	2,82	4,11	7,17	35,25	53,47	43,0	30,0	13,0
	0,07-0,12	2,85	3,49	6,36	27,43	62,72	43,5	29,0	14,5
	0,20-0,25	2,84	3,38	5,54	24,35	66,73	42,6	30,6	12,0

Dp = densidade de partículas; AG = areia grossa; AF = areia fina; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade.

Tabela 3. Atributos químicos dos solos utilizados no experimento (valores médios dos três estados de compactação do solo).

Determinações	Latossolo Vermelho		Latossolo Vermelho distroférico	
	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m
M. Orgânica (g kg ⁻¹)	3,0	2,7	2,6	1,7
pH (H ₂ O)	6,7	6,5	6,5	6,5
P (mg L ⁻¹)	10,3	4,6	17,3	8,6
K (mg L ⁻¹)	98,0	96,5	123,0	48,0
Al (cmol _c L ⁻¹)	0,0	0,2	0,0	0,0
Ca (cmol _c L ⁻¹)	9,0	6,9	9,2	7,4
Mg (cmol _c L ⁻¹)	3,8	3,0	3,0	2,1
CTC efetiva (cmol _c L ⁻¹)	13,1	10,4	12,5	9,6
CTC pH 7,0 (cmol _c L ⁻¹)	15,2	12,7	14,9	11,9
H+Al (cmol _c L ⁻¹)	2,1	2,5	2,4	2,3

3.4.2 Ensaio de compressão uniaxial.

As amostras de solo foram coletadas em cilindros de 5,35 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura (relação diâmetro-altura de 2,67). Em cada solo estudado, nas épocas 1 e 2, foram coletados 3 grupos de 9 cilindros por profundidade (0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m) para cada estado de compactação. Destes, cada conjunto de 3 cilindros foi saturado e submetido à tensão de 1 kPa na mesa de tensão e 33 e 300 kPa na câmara de Richard. As tensões de 1; 33 e 300 kPa, proporcionaram às amostras os graus de saturação inicial de umidade médios de 91, 63 e 58 % para o LV e de 93, 68 e 65 %, para o LVd, respectivamente. O total de cilindros para cada época foi de 243. Na época 3, foram coletados 9 cilindros

por profundidade para cada estado de compactação. As amostras foram colocadas em caixas de papelão com pequenos orifícios, permitindo a perda de umidade de maneira lenta e de forma homogênea para possibilitar obtenção de potenciais matriciais das amostras inferiores a -300 kPa. Todo o estudo de compressão usou 1134 cilindros de solo com o objetivo de se obter amplos variação das condições estruturais e de umidade do solo.

Na área de Cruz Alta, as datas de coleta das amostras de solo para a 1^a, 2^a e 3^a épocas foram, respectivamente, março/2000, março/2001 e novembro/2001. Na área do município de Coronel Barros foram, respectivamente, fevereiro/2000, fevereiro/2001 e outubro/2001.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo a norma brasileira de adensamento-NBR 12007/90 (ABNT, 1990) para condições de solo não saturado. Para realização dos ensaios de compressão foi utilizada uma prensa de adensamento uniaxial modelo S 450 Terraload. O tempo final de carregamento foi determinado em pré-testes, verificando-se que nos dois Latossolos, mais de 99 % da deformação máxima foi alcançada até cinco minutos após aplicação de cada pressão. Assim, em cada carregamento teve um intervalo de tempo de 5 minutos para realizar a leitura no defletômetro. O dispositivo de modificação de altura da amostra possui exatidão de 0,0025mm/divisão. As pressões estáticas e sucessivas foram aplicadas na seguinte seqüência: 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa. Com as leituras foi calculada a densidade do solo, o índice de vazios e o grau de saturação de cada amostra antes do teste, após aplicação de cada carga e após cada ensaio de compressão uniaxial, usando-se programa de computador especialmente escrito para esse fim.

Programa desenvolvido por Reinert (1990) e adaptado para as condições locais, foi usado para plotar às curvas de consolidação e para calcular a pressão de preconsolidação e o índice de compressão para todos os testes realizados. A pressão de preconsolidação determinada pelo programa segue a estratégia de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981).

O índice de vazios (e) foi calculado pela equação:

$$e = \text{volume de vazios/volume de sólidos do anel} \quad (5)$$

O índice de compressão (C_c) que é a inclinação da reta de compressão virgem foi calculada pela equação:

$$C_c = (2 - e_1) / (\log P_2 - \log P_1) \quad (6)$$

Onde:

P = representa a pressão aplicada.

3.4.3 Resistência do solo à penetração

As determinações da resistência do solo à penetração foram realizadas periodicamente, através de um penetrômetro com armazenamento eletrônico dos dados, com ponta cônica de 30° , marca RIMIK modelo CP 20, inserido manualmente no solo, segundo metodologia descrita por Bradford (1986). As leituras foram registradas verticalmente a cada 1,5 cm até a profundidade de 40 cm. Foram feitas 6 repetições por tratamentos, em cada época/condição de umidade. Juntamente com a resistência do solo à penetração, foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica. Procurou-se caracterizar a resistência do solo em várias condições de umidade do solo, desde o solo mais úmido (logo após uma chuva) até o solo mais seco, para verificar o comportamento da resistência do solo com a variação da umidade do solo. Para isso demarcou-se uma área de aproximadamente um metro quadrado em cada estado de compactação e determinou-se o perfil de densidade do solo e a resistência do solo em várias condições de umidade, sempre no mesmo local, tomando-se o cuidado de medir a resistência em solo intacto.

3.4.4 Resistência ao cisalhamento direto.

As amostras de solo foram coletadas em caixas metálicas vazadas de 2,0 x 5,0 x 5,0 cm. Em cada solo estudado, foram coletados em duas épocas 3 grupos de 8 caixas por profundidade (0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m) para cada estado de compactação. Destes, cada conjunto de 4 caixas foi saturado e submetido à tensão de 33 e 300 kPa na câmara de Richard. As tensões de 33 e 300 kPa proporcionaram os graus de saturação inicial de umidade de 63 e 58 % para o LV e de 68 e 65 % para o LVd, respectivamente. O total de caixas para cada época foi de 216. Todo o estudo de cisalhamento usou 864 caixas de cisalhamento direto do solo com o objetivo de se obter ampla variação das condições estruturais e de umidade do solo.

Na área de Cruz Alta, as datas de coleta das amostras de solo para a 1ª e 2ª épocas foram, respectivamente, maio a julho de 2000 e de maio a agosto de 2001. Na área do município de Coronel Barros foram, respectivamente, fevereiro a março de 2000 e de setembro a outubro de 2001.

As amostras após estarem equilibradas nas tensões, foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. Para estes ensaios, se fez uso da prensa de cisalhamento direto, modelo Solotest, onde foram utilizadas pressões normais de 34,68; 104,04; 208,08 e 416,16 kPa com um deslocamento horizontal de 8 mm e velocidade de deslocamento de 0,25 mm/minuto. Dentro de cada carregamento teve um tempo de assentamento de 5 minutos, para após iniciar as leituras no defletômetro horizontal. As leituras na célula de carga foram realizadas após cada deslocamento horizontal de 0,20 mm, até que a amostra se rompia, o que era evidenciado pela diminuição dos valores lidos no defletômetro horizontal. O máximo valor obtido em cada ensaio corresponde à tensão de cisalhamento, para aquela amostra e tensão normal. Assim, para cada condição de solo e umidade

foram obtidos quatro valores de tensão de cisalhamento (τ), um para cada valor de tensão normal aplicada (34,68, 104,04, 208,08 ou 416,16 kPa), com os quais foi possível ajustar uma equação, semelhante à equação (3), cujo intercepto corresponde à coesão (C) e o coeficiente angular que corresponde ao coeficiente de atrito. O ângulo cuja tangente corresponde ao coeficiente angular da equação, é o ângulo de atrito interno (ϕ) (Figura 4). O tempo médio de duração do ensaio de cada amostra foi de 45 minutos. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito interno foram determinados conforme metodologia proposta por Lambe & Witman (1979).

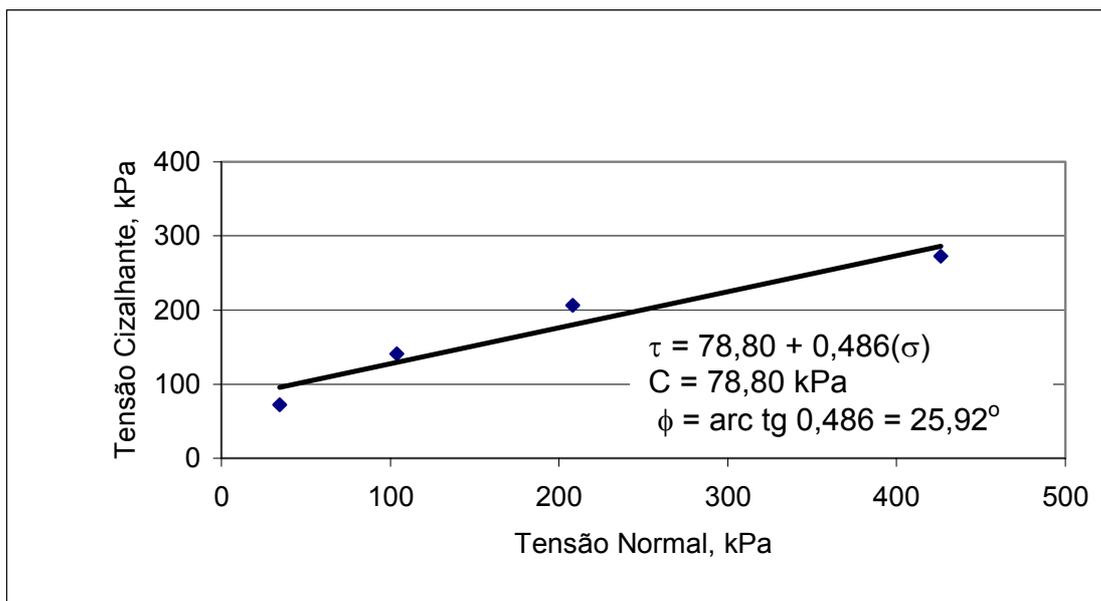


Figura 4. Determinação dos parâmetros de cisalhamento: coesão (C) e ângulo de atrito interno (ϕ).

3.4.5 Produtividade das culturas.

O cultivo das culturas foi em faixas transversais aos estados de compactação, procurando evitar que ocorresse tráfego excessivo dos pneumáticos dentro da área útil de avaliação. No inverno cultivou-se trigo ou aveia, de acordo com o esquema de rotação de culturas adotado pelo produtor. A adubação das culturas foram semelhantes nos tratamentos de acordo com a necessidade das mesmas, para isolar o fator compactação. A produtividade das culturas foi determinada através da coletas de espigas (no caso do milho) ou de plantas (no caso da soja e trigo) em 4 a 5 sub-amostras, em cada estado de compactação do solo, orientada pelos mapas de resistência (Figuras 2 e 3). Na safra agrícola 2000/2001, escarificou-se uma área paralela à área experimental, assumindo-se como livre de compactação, para comparar aos resultados obtidos com as culturas nos diferentes estados de compactação do solo. Nas duas áreas experimentais, cultivou-se milho e soja na área escarificada e nos três estados de compactação do solo. Os resultados obtidos foram expressos em $Mg\ ha^{-1}$, com umidade corrigida para 13 % quando necessário. A seqüência de cultivos em cada área experimental e em cada safra agrícola de inverno ou verão durante os dois anos de pesquisa, encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4. Seqüência de cultivos nas safras agrícolas 1999/2000 e 2000/2001 de inverno e verão, nas áreas experimentais de Cruz Alta e de Coronel Barros.

Safr	Cruz Alta – LV		Coronel Barros – LVd	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão
1999/2000	Trigo	Soja	Trigo	Soja
2000/2001	Aveia preta	Soja e Milho	Trigo	Soja e Milho

3.5 Análise estatística.

Devido a esse experimento não se caracterizar como um delineamento experimental, devido à falta de casualização, a análise estatística constou de comparações entre médias de variáveis de solo e de planta nos três estados de compactação, através do teste t de student ao nível de 5 % de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo

4.1.1 Densidade do solo no Latossolo Vermelho (LV)

Os valores médios de densidade do solo nas profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente de 1,11, 1,51 e 1,40 Mg m⁻³, (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios de densidade (Mg m⁻³) de duas épocas do Latossolo Vermelho, sob três tensões de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Tensões de água (kPa)*			Média
	1	33	300	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	1,09 a	1,09 a	1,14 a	1,11 a
EC2	1,12 a	1,18 a	1,11 a	1,14 a
EC3	1,10 a	1,09 a	1,08 a	1,09 a
Média	1,10 A	1,12 A	1,11 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	1,65 a	1,62 a	1,58 a	1,62 a
EC2	1,50 b	1,51 b	1,51 b	1,51 b
EC3	1,42 b	1,42 b	1,38 c	1,41 c
Média	1,52 A	1,52 A	1,49 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	1,33 b	1,47 a	1,45 a	1,42 a
EC2	1,50 a	1,37 b	1,36 b	1,41 a
EC3	1,35 b	1,34 b	1,38 b	1,36 a
Média	1,39 A	1,39 A	1,40 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada tensão de água, não diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05). * As tensões 1, 33 e 300 kPa, correspondem, respectivamente, aos graus de saturação inicial de água de 91, 63 e 58 %.

Os maiores valores ocorreram na camada de 0,07-0,12 m de profundidade. Apenas nesta camada ocorreu diferença significativa nos valores de densidade do solo entre os três estados de compactação (EC), onde o estado de compactação um, EC1, apresentou valor superior aos demais, EC2 e EC3. Isto pode ser

explicado pelo acúmulo das tensões impostas pelos pneumáticos de máquinas agrícolas na superfície do solo a cada safra agrícola. Na camada de 0-0,05 m de profundidade, a mobilização sistemática pelos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras impedem que ocorra compactação cumulativa a cada safra.

4.1.2 Densidade do solo no Latossolo Vermelho distroférico (LVd)

Os valores médios de densidade do solo variaram entre os estados de compactação nas três profundidades, embora os maiores valores foram encontrados na profundidade de 0,07-0,12 m, (Tabela 6).

Tabela 6. Valores médios de densidade (Mg m^{-3}) de duas épocas do Latossolo Vermelho distroférico, sob três tensões de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Tensões de água (kPa)*			Média
	1	33	300	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	1,15 c	1,22 a	1,25 a	1,21 b
EC2	1,27 b	1,27 a	1,29 a	1,28 ab
EC3	1,43 a	1,30 a	1,32 a	1,35 a
Média	1,28 A	1,26 A	1,29 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	1,53 a	1,55 a	1,53 a	1,54 a
EC2	1,44 b	1,51 ab	1,50 ab	1,48 ab
EC3	1,48 ab	1,45 b	1,49 b	1,47 b
Média	1,48 A	1,50 A	1,51 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	1,39 a	1,38 a	1,37 a	1,38 a
EC2	1,32 a	1,34 b	1,34 a	1,33 b
EC3	1,34 a	1,38 a	1,36 a	1,36 ab
Média	1,35 A	1,37 A	1,36 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada tensão de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$). * As tensões 1, 33 e 300 kPa, correspondem, respectivamente, aos graus de saturação inicial de água de 93, 68 e 65 %.

O EC1 apresentou valor semelhante ao EC2 e superior ao EC3. Na profundidade de 0,0-0,05 m o EC3 apresentou valor superior ao EC1 e na profundidade 0,20-0,25 m o EC1 apresentou valor superior ao EC2 e semelhante ao EC3. Os valores médios de densidade do solo dos estados de compactação para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram respectivamente de 1,28, 1,50 e 1,36 Mg m⁻³.

Isso demonstra que, a exemplo do LV, ocorreu incremento da densidade do solo na profundidade de 0,07-0,12 m, em virtude das tensões impostas pelos pneumáticos agrícolas. Estes maiores valores de densidade encontrados, nos dois Latossolos, na profundidade de 0,07-0,12 m concordam com os resultados encontrados por Vieira (1981), indicando que no sistema plantio direto há tendência à compactação na camada subsuperficial, porém, a profundidade menor do que em sistemas que utilizam mobilização. Nesta camada, os valores encontrados de densidade para estes solos ultrapassam ao valor limite, de 1,45 Mg m⁻³, para considerar-se solo compactado, Reinert et al. (2001).

4.2 Resistência do solo à penetração

4.2.1 Resistência do solo à penetração no LV

A resistência do solo à penetração (Rs) diferiu entre os estados de compactação e em relação à área que havia sido escarificada. Verifica-se que a maior Rs foi encontrada na profundidade de 0,07-0,12 m, nos três estados de compactação e na área escarificada. O estado de compactação um, EC1, apresentou valores de Rs superiores, na profundidade de 0,07-0,12 m, em relação aos EC2, EC3 e área escarificada, nas condições de água do solo média de 0,22, 0,23, 0,27 e 29 kg kg⁻¹ (Figura 5).

O EC1 apresentou maior valor de Rs com o menor conteúdo de água no solo (Ug=0,23 kg kg⁻¹), com valor de aproximadamente 3,4 MPa (Figura 6).

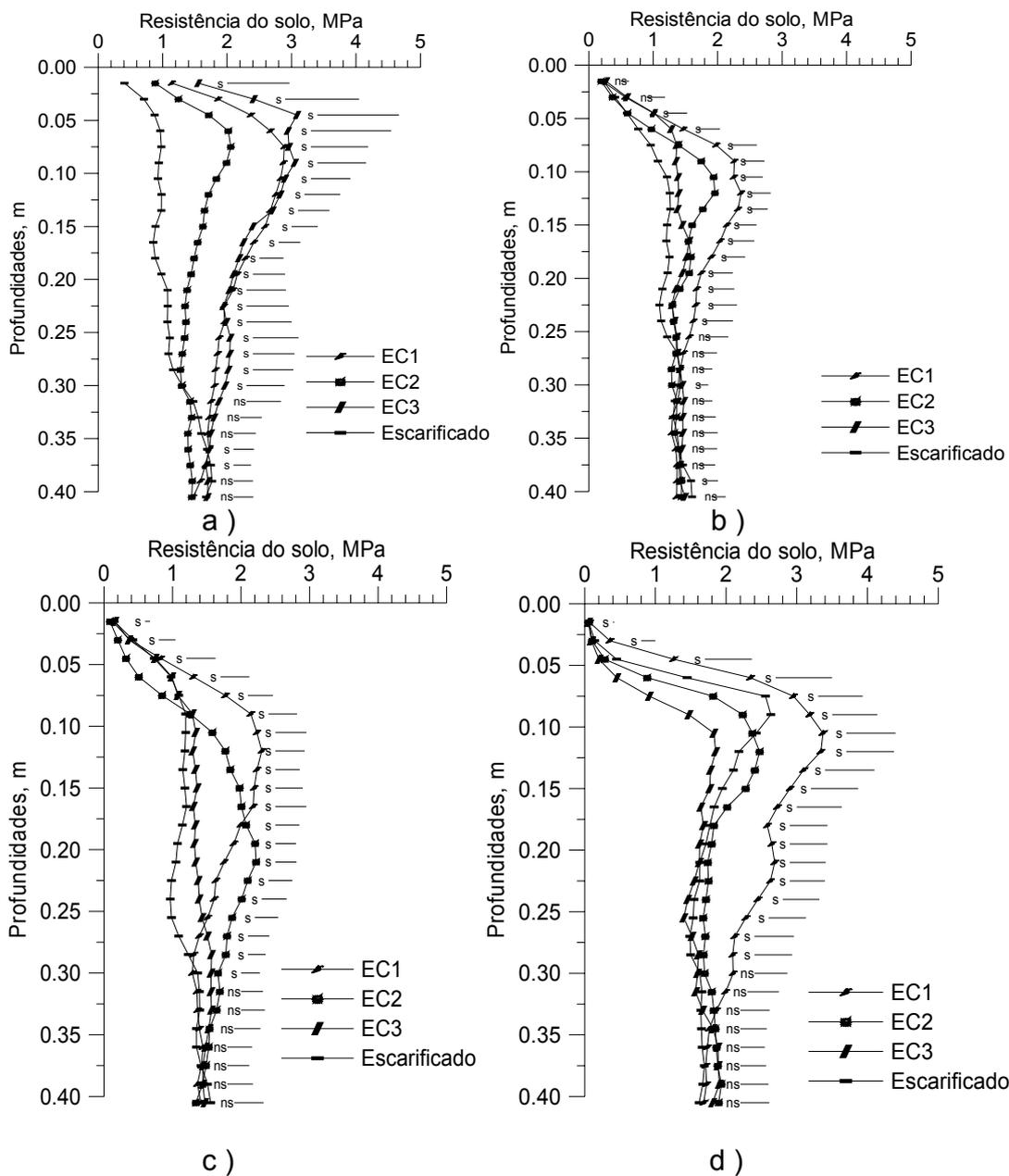


Figura 5. Resistência do Latossolo Vermelho sob quatro condições de água média de 0 a 0,3 m, três estados de compactação e em área escarificada. a) $U_g=0,22 \text{ kg kg}^{-1}$, b) $U_g=0,23 \text{ kg kg}^{-1}$, c) $U_g=0,27 \text{ kg kg}^{-1}$, d) $U_g=0,29 \text{ kg kg}^{-1}$. Cruz Alta, RS, 2001.

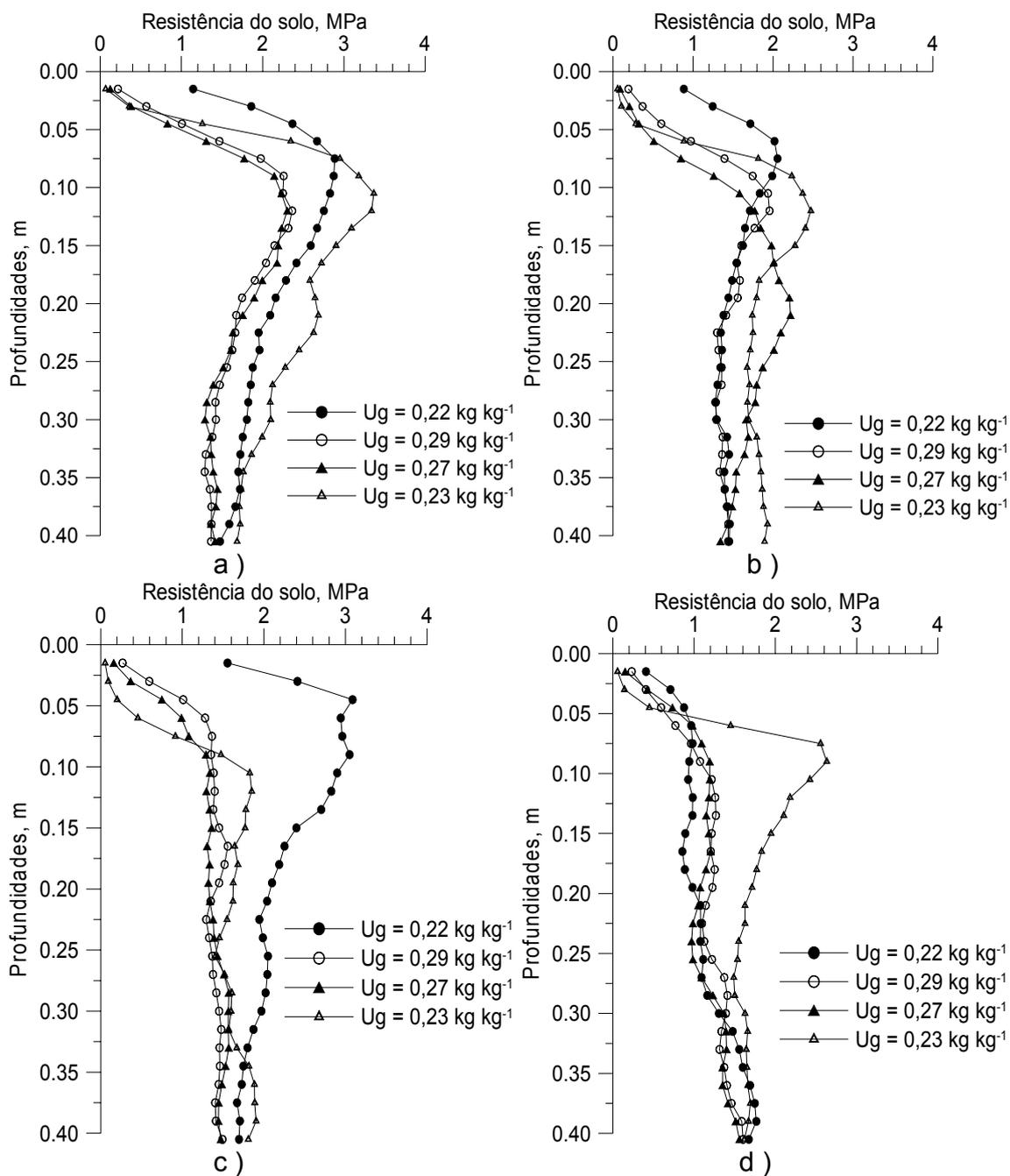


Figura 6. Variação da resistência do solo no Latossolo Vermelho, nos três estados de compactação e na área escarificada, sob quatro conteúdos de água. a) EC1, b) EC2, c) EC3, d) Área escarificada. Cruz Alta, RS, 2001.

Nas condições estudadas de água do solo o EC1 apresentou maiores valores de R_s e a área escarificada os menores valores, principalmente na profundidade de 0,07-0,12 m. Assim, devido a estes baixos valores de resistência do solo na área escarificada, pode-se assumir como uma área livre de compactação do solo que possa restringir o crescimento radicular. Esta parcela escarificada foi estabelecida para comparar os dados de produtividades obtidos nos diferentes tratamentos, reduzindo o efeito da compactação, tendo em vista que as demais práticas de manejo foram semelhantes nos diferentes tratamentos utilizados (adubação do solo, etc.).

De maneira geral, no LV, a partir de 0,30 m de profundidade, não observa-se diferença significativa nos valores de R_s entre os tratamentos e em todas as condições de água do solo. Isto demonstra que para esse solo os efeitos dos sistemas de manejo empregado sobre a resistência do solo ocorre até esta profundidade.

4.2.2 Resistência do solo à penetração no LVd

A resistência do solo no LVd, diferiu entre os estados de compactação e em relação à área que havia sido escarificada, onde o EC1, em linhas gerais, apresentou valores superiores de R_s em relação aos demais tratamentos. A maior resistência do solo ocorreu na profundidade de 0,07-0,12 m, nos três estados de compactação e na área escarificada (Figura 7).

Verifica-se que o EC1 e o EC2 apresentaram valores de resistência semelhantes com o menor conteúdo de água no solo ($U_g = 0,24-0,26 \text{ kg kg}^{-1}$), com valor de aproximadamente 3,8 MPa (Figura 8).

No LVd, a exemplo do LV, a área escarificada apresentou os menores valores de resistência do solo, em todas as condições de água do solo (Figuras 7 e 8-d). Neste solo evidencia-se novamente que o efeito mais intenso dos sistemas de manejo de solo empregados, sobre os valores de R_s , ocorreram até 0,30 m de profundidade.

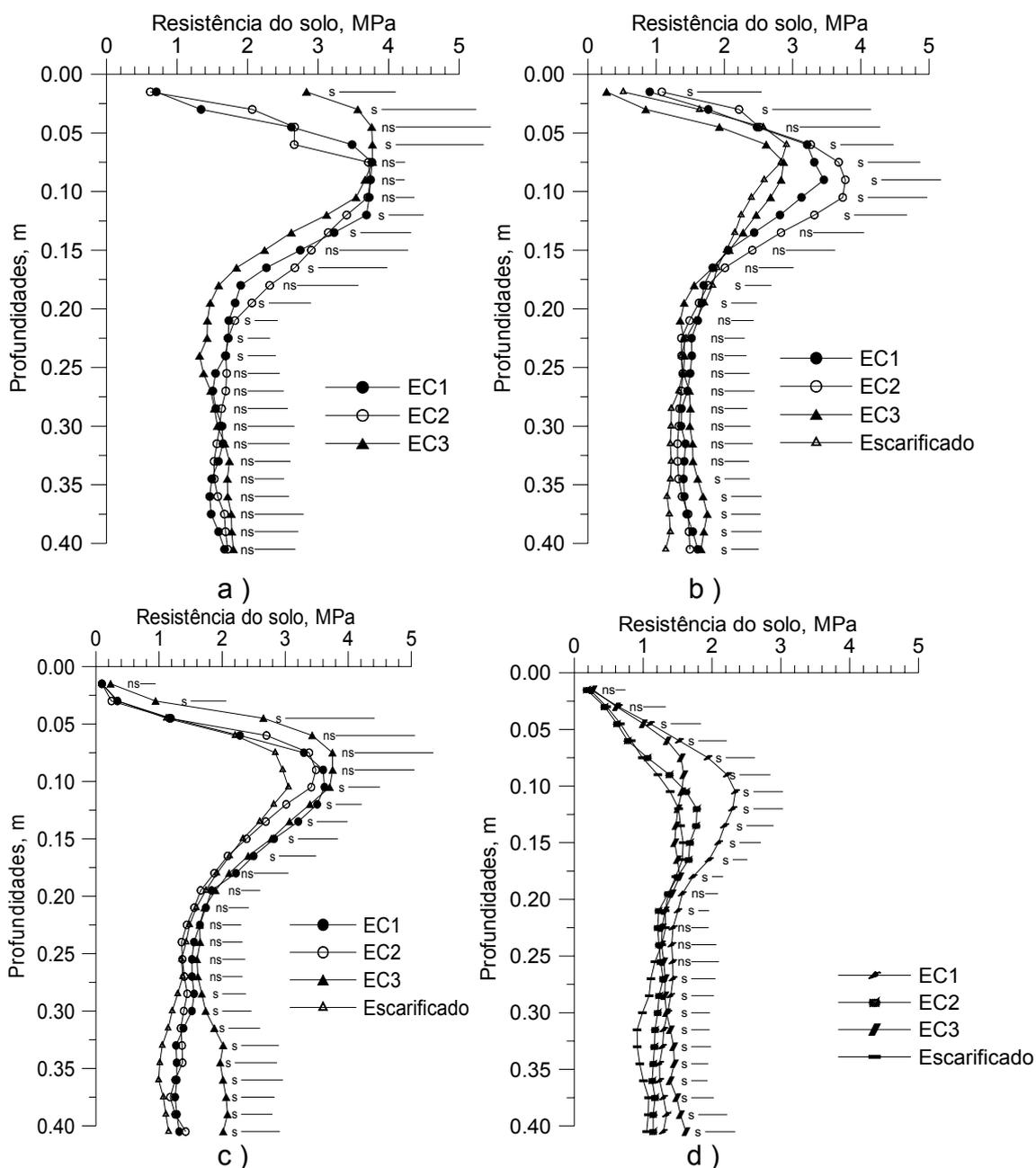


Figura 7. Resistência do Latossolo Vermelho distroférrico sob quatro condições de água média de 0 a 0,3m, três estados de compactação e em área escarificada. a) $U_g=0,24 \text{ kg kg}^{-1}$, b) $U_g=0,26 \text{ kg kg}^{-1}$, c) $U_g=0,29 \text{ kg kg}^{-1}$, d) $U_g=0,31 \text{ kg kg}^{-1}$. Coronel Barros, RS, 2001.

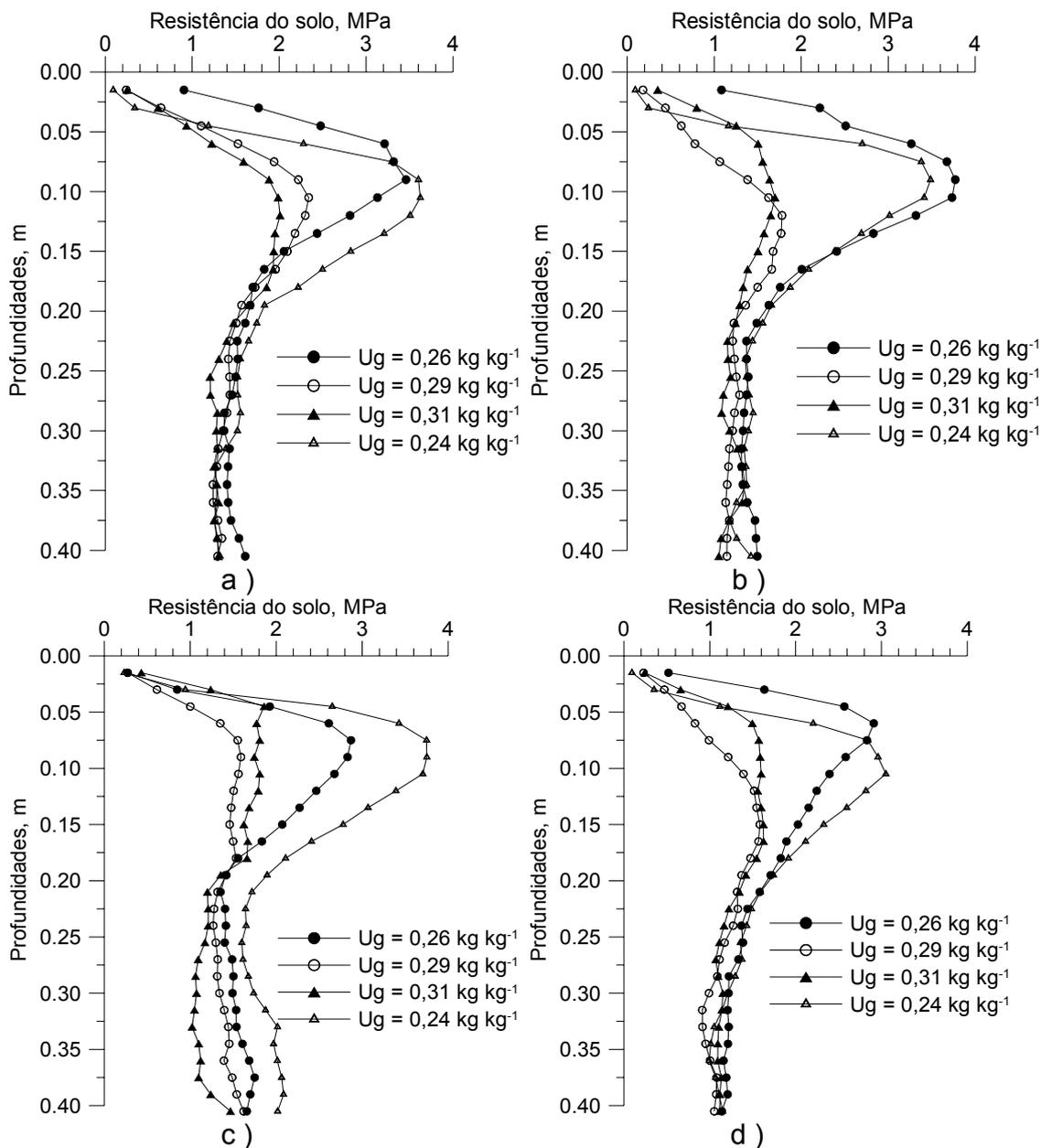


Figura 8. Variação da resistência do solo no Latossolo Vermelho distroférico, nos três estados de compactação e na área escarificada, sob quatro conteúdos de água. a) EC1, b) EC2, c) EC3, d) Área escarificada. Coronel Barros, RS, 2001.

Tanto no LV como no LVd, houve uma relação direta entre a R_s e a densidade do solo, onde na profundidade que ocorreu os maiores valores de densidade (0,07-0,12 m), em função do acúmulo de tensões impostas, maiores foram os valores de resistência do solo. Outra observação é a relação inversa entre a resistência do solo e a água do solo, onde à medida que o solo apresentou menor conteúdo de água, maior foram os valores de resistência dos mesmos. Estas relações com a densidade e com o conteúdo de água no solo estão de acordo com Cassel & Lal (1992). Outro aspecto é que nos dois Latossolos, na profundidade intermediária, o valor encontrado de resistência foi superior ao valor considerado crítico de 2,0 MPa, porém o LVd apresentou maiores valores de R_s .

Em relação à variação da resistência do solo com o conteúdo de água, vemos que os estados de compactação 1, 2 e 3, apresentaram valores de resistência semelhantes entre si com a menor água do solo ($U_g = 0,24-0,26 \text{ kg kg}^{-1}$), com valor de aproximadamente igual a 3,8 MPa (Figura 8).

4.3 Parâmetros de compressibilidade do solo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação em água

A discussão dos resultados se dará inicialmente de forma individual no LV e no LVd e posteriormente de forma conjunta. Os índices pressão de preconsolidação e índice de compressão serão denominados doravante de σ_p e C_c , respectivamente.

4.3.1 Pressão de preconsolidação no LV (σ_p)

Nas três profundidades avaliadas, os valores médios de σ_p , também denominada capacidade suporte do solo, não apresentaram diferença estatística significativa entre os estados de compactação do solo. O valor médio geral da σ_p ,

na faixa de grau de saturação inicial de água (Gsi) de 58 - 91%, foi de 228 kPa e os valores médios para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 95, 320 e 268 kPa. Somente o valor médio encontrado para a profundidade de 0,0-0,05 m, diferiu significativamente das demais profundidades (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) de duas épocas em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)*			Média
	91	63	58	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	20 b	49 b	180 b	83 a
EC2	32 a	65 a	141 b	79 a
EC3	36 a	123 a	214 a	124 a
Média	29 C	79 B	178 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	290 a	360 a	426 ab	359 a
EC2	178 b	305 a	328 b	270 a
EC3	143 b	352 a	501 a	332 a
Média	204 B	339 AB	418 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	149 a	248 b	339 a	245 a
EC2	167 a	383 a	368 a	306 a
EC3	126 a	271 b	359 a	252 a
Média	147 B	301 A	355 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$). * As tensões de 1, 33 e 300 kPa, correspondem aos graus de saturação inicial de água de 91, 63 e 58 %, respectivamente.

Estes resultados demonstram que o acúmulo das tensões compactantes impostas pelas máquinas agrícolas se concentraram na profundidade de 0,07-0,12 m, aumentando a capacidade suporte do solo, em função das maiores deformações ocorridas na história das tensões aplicadas a esta camada. Isso pode ser confirmado pelos maiores valores de densidade do solo, os quais foram superiores em relação a profundidade de 0,0-0,05 m (Tabela 5). Demonstra

também que, na profundidade de 0-0,05 m, em virtude da mobilização imposta a cada safra, pelos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras, os valores de σ_p são menores, reduzindo a capacidade suporte do solo nesta camada. Outro aspecto é que o sistema plantio direto, em relação ao sistema convencional, o que possivelmente proporciona melhor estrutura com menor resistência à deformação.

Houve um incremento médio da σ_p à medida que o solo sofreu redução no G_{si} e ocorreu aumento nos valores de densidade do solo, onde a σ_p aumentou nas três camadas analisadas quando o G_{si} do solo passou de 91 para 58 %. Isto sugere que, quanto mais seco e compactado estiver o solo, maior será a capacidade suporte do mesmo em função das partículas e/ou agregados estarem mais coesos. A amplitude das variações foram de 29-178 kPa, 204-418 kPa e 147-355 kPa, respectivamente, para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m. Nas três profundidades avaliadas essas variações foram significativas. A redução na capacidade suporte dos solos quando mais úmidos era esperada, em virtude da água atuar como lubrificante entre as partículas, deixando o solo mais macio, alterando o estado de consistência do mesmo.

Quando as amostras de solo sofreram perda de água naturalmente dentro de caixas de papelão perfuradas e atingiram graus de saturação inicial mais baixos que as amostras com água controlada, os valores de σ_p apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo (Tabela 8). Na profundidade de 0,0 - 0,05 m, o EC1 apresentou valor superior aos demais estados de compactação do solo, e na profundidade de 0,07-0,12 m, o EC2 apresentou valor de σ_p inferior ao EC3 e semelhante ao EC1. Na profundidade 0,20-0,25 m, não houve diferença significativa entre os valores médios para os estados de compactação do solo.

Tabela 8. Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	42	37	36	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	554 a	637 a	599 a	597 a
EC2	416 ab	497 b	540 a	484 b
EC3	314 b	513 b	604 a	477 b
Média	428 A	549 A	581 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	603 a	557 b	438 b	533 ab
EC2	516 a	530 b	534 ab	527 b
EC3	664 a	609 a	608 a	627 a
Média	594 A	565 A	527 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	396 ab	562 a	354 b	437 a
EC2	315 b	462 b	615 a	464 a
EC3	560 a	603 a	573 a	579 a
Média	424 A	542 A	514 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

Nesta condição de Gsi das amostras (36-42 %), o valor médio geral da σ_p foi de 525 kPa e os valores médios para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 519, 562 e 493 kPa, os quais não diferiram significativamente entre si. Isso confirma que o acúmulo das tensões impostas pelas máquinas agrícolas se concentraram na profundidade de 0,07-0,12 m, embora com estes Gsi mais baixo, a variação entre os valores médios tenham sido menores. Ocorreu incremento da σ_p à medida que o solo sofreu redução no Gsi (camadas de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,25 m), quando o Gsi passou de 42 para 36 %, porém a amplitude das variações foram, respectivamente, de 428-581, 594-527 e 424-514 kPa, para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m. Nas três camadas analisadas, essa variação não foi estatisticamente significativa.

A análise dos valores de σ_p médio em todos os Gsi estudados, indicou que, nas três profundidades, quando o Gsi for inferior a 42 %, o solo suportaria as tensões impostas pelos pneus da maioria dos tratores agrícolas, que são entre 100 e 200 kPa (Carpenedo, 1994). Assim, pode-se afirmar que quando o Gsi for inferior a 42% haverá pequena deformação pelo tráfego de máquinas, preservando a estrutura dos solos.

4.3.2 Índice de Compressão no LV (Cc)

Somente na profundidade de 0,07-0,12 m os valores apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo, onde o EC1 e EC2 apresentaram valores inferiores ao EC3 (Tabela 9).

Tabela 9. Valores médios do índice de compressão de duas épocas em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	91	63	58	
Profundidade 0,0- 0,05 m				
EC1	0,48 a	0,62 a	0,59 a	0,56 a
EC2	0,39 b	0,44 b	0,59 a	0,47 a
EC3	0,46 a	0,65 a	0,66 a	0,59 a
Média	0,44 B	0,57 AB	0,61 A	
Profundidade 0,07- 0,12 m				
EC1	0,18 b	0,21 b	0,22 c	0,20 b
EC2	0,22 a	0,27 a	0,28 b	0,26 b
EC3	0,29 a	0,30 a	0,45 a	0,35 a
Média	0,23 A	0,26 A	0,32 A	
Profundidade 0,20- 0,25 m				
EC1	0,26 b	0,30 b	0,33 b	0,30 a
EC2	0,30 a	0,45 a	0,41 a	0,39 a
EC3	0,32 a	0,44 a	0,42 a	0,39 a
Média	0,29 B	0,40 A	0,39 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

O valor médio geral do índice Cc nesta condição foi de 0,39 e os valores médios das camadas de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m foram, respectivamente, de 0,54, 0,27 e 0,36, onde a profundidade 0,0-0,05 apresentou valor superior e significativo em relação às demais. O menor valor na camada de 0,07-0,12 em relação às demais camadas está associado ao acúmulo de tensões compactantes imposta pelas máquinas agrícolas e das deformações já ocorridas no solo, o que resultou em incremento nos valores da σ_p e redução nos valores do índice de Cc.

Nas amostras de solo que sofreram perda de água naturalmente dentro das caixas de papelão perfuradas atingiram baixo estado de saturação inicial (faixa de Gsi de 36-42 %), os valores do índice Cc apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo, onde nas profundidades de 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m, o EC1 e EC2 apresentaram valores inferiores do índice Cc em relação ao EC3, indicando menor susceptibilidade à compactação (Tabela 10).

Nesta faixa de Gsi, o valor médio geral do índice Cc foi de 0,28 e os valores médios para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 0,48, 0,16 e 0,20, onde a profundidade 0,0-0,05 apresentou valor superior e significativo em relação às demais profundidades. Isso confirma novamente que o acúmulo das tensões compactantes se concentraram na profundidade de 0,07-0,12 m, embora com estes Gsi mais baixos, a variação entre os valores médios tenham sido menores.

Quando o Gsi do solo passou de 42 para 36 % houve decréscimo nos valores de índice Cc, porém nas três profundidades, essa variação não foi significativa. A amplitude das variações foram, respectivamente, de 0,52-0,38, 0,17-0,15 e 0,22-0,19, para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m.

Tabela 10. Valores médios do índice de compressão em um Latossolo Vermelho, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	42	37	36	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	0,52 ab	0,34 b	0,31 a	0,39 a
EC2	0,58 a	0,70 a	0,35 a	0,54 a
EC3	0,46 b	0,58 ab	0,48 a	0,51 a
Média	0,52 A	0,54 A	0,38 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	0,10 b	0,09 b	0,08 b	0,09 b
EC2	0,12 b	0,14 b	0,11 b	0,12 b
EC3	0,28 a	0,26 a	0,26 a	0,27 a
Média	0,17 A	0,16 A	0,15 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	0,10 c	0,20 b	0,11 b	0,14 b
EC2	0,18 b	0,15 b	0,17 b	0,17 b
EC3	0,29 a	0,31 a	0,28 a	0,29 a
Média	0,19 A	0,22 A	0,19 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

O incremento no índice Cc do solo quando mais úmido devido ao fato de que a água atua como lubrificante entre as partículas, reduzindo o atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo, deixando o solo mais macio, alterando o estado de consistência do mesmo e tornando o mesmo mais suscetível à compactação.

Os valores médios de índice Cc médio, em todos os Gsi estudados, nas três profundidades, indicam que a maior susceptibilidade a compactação deste solo ocorreu quando o Gsi foi entre 58 e 63% (Tabelas 9 e 10). Portanto, para valores de Gsi maiores ou iguais aos da faixa anteriormente citada, deve-se evitar tráfego com máquinas e implementos agrícolas pois o solo estará mais suscetível à compactação.

4.3.3 Distribuição da σ_p e do índice Cc por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o LV

Quando o grau de saturação inicial de água do solo (Gsi) foi inferior a 45 %, a σ_p parece ser pouco influenciada pela água do solo e pela densidade inicial do solo (Dsi) (Tabela 11).

Tabela 11. Pressão de preconsolidação e índice de compressão por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o Latossolo Vermelho.Cruz Alta, RS, 2001.

Classes de densidade	Classes de graus de saturação inicial (%)					
	< 15	15 – 30	30 – 45	45 – 60	60 - 75	> 75
Pressão de Preconsolidação						
< 1,15	---	448 (10)	205 (23)	70 (3)	25 (12)	60 (7)
1,15 – 1,30	---	451 (2)	537 (21)	311 (19)	120 (3)	146 (19)
1,30 – 1,45	621 (2)	535 (1)	509 (17)	378 (17)	339 (28)	269 (23)
1,45 – 1,60	---	---	520 (7)	479 (8)	374 (9)	345 (9)
> 1,60	---	---	---	389 (1)	---	98 (1)
Índice de Compressão						
< 1,15	---	- 0,58	- 0,66	- 0,50	- 0,49	- 0,35
1,15 – 1,30	---	- 0,45	- 0,34	- 0,26	- 0,35	- 0,29
1,30 – 1,45	- 0,23	- 0,24	- 0,16	- 0,14	- 0,37	- 0,23
1,45 – 1,60	---	---	- 0,11	- 0,06	- 0,29	- 0,19
> 1,60	---	---	---	---	---	- 0,17

Dados obtidos a partir de amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa, totalizando 242 ensaios de compressibilidade. Os valores entre parênteses representam o número de amostras que se enquadraram nas diferentes classes de Dsi ou Gsi.

Quando o solo apresentou Gsi > 45 %, a Dsi passou a ter maior associação com a σ_p do que a própria condição inicial de água do solo. Para o índice Cc, de maneira geral houve redução dos valores de Cc a medida que o solo se tornou mais denso. Isto ocorre em função de que o solo após ter sofrido deformação, torna-se mais resistente a novas deformações, ou, para que ocorra novas deformações, maior deverá ser a pressão ou carga aplicada sobre o solo.

4.3.4 Pressão de preconsolidação no LVd

Nas três profundidades avaliadas, os valores médios de σ_p , a exemplo do LV, também não apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo (Tabela 12).

Tabela 12. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) de duas épocas em um Latossolo Vermelho Distroférrico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)*			Média
	93	68	65	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	44 b	110 c	204 b	119 a
EC2	52 b	270 a	315 a	212 a
EC3	157 a	219 b	275 ab	217 a
Média	84 B	200 AB	265 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	244 a	500 a	523 a	422 a
EC2	152 a	308 b	528 a	329 a
EC3	184 a	395 b	490 a	356 a
Média	193 B	401 A	514 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	182 a	255 a	354 a	264 a
EC2	92 b	150 b	265 b	169 a
EC3	94 b	275 a	309 ab	226 a
Média	123 B	227 AB	309 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$). * As tensões de 1, 33 e 300 kPa, correspondem aos graus de saturação inicial de água de 93, 68 e 65 %, respectivamente.

O valor médio geral da σ_p , na faixa de Gsi de 65-93 %, foi de 257 kPa e os valores médios para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 183, 369 e 220 kPa, onde a profundidade 0,07-0,12 m apresentou valor superior em relação às demais profundidades. Verifica-se

também neste solo o efeito do acúmulo de tensões compactantes na camada de 0,07-0,12 m.

Houve incremento da σ_p à medida que o Gsi diminuiu e ocorreu aumento nos valores de densidade do solo. A σ_p aumentou nas três camadas analisadas quando o Gsi do solo passou de 93 para 68 %. A amplitude das variações foram de 84-265 kPa, 193-514 kPa e 123-309 kPa, respectivamente, para as profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m. Nas três profundidades avaliadas essa variação foi significativa. Esse mesmo efeito ocorreu no LV, em virtude de que o solo mais úmido (até certo limite) torna-se mais “macio” e sofre maior deformação.

Nas amostras de solo que sofreram perda de água naturalmente dentro de caixas de papelão perfuradas, os valores de σ_p não apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo (Tabela 13).

Nesta condição de Gsi das amostras (27-41 %), o valor médio geral da σ_p foi de 485 kPa e os valores médios para as profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 430, 580 e 445 kPa, onde a profundidade 0,07-0,12 m apresentou valor superior e significativo em relação às demais profundidades. Isso confirma novamente que o acúmulo das tensões compactantes se concentraram na profundidade de 0,07-0,12 m, embora com estes Gsi mais baixos, a variação entre os valores médios tenham sido menores. Ocorreu incremento da σ_p à medida que o solo sofreu redução no Gsi nas três profundidades avaliadas, quando o Gsi passou de 40 para 27 %, com variação significativa nas três camadas analisadas. As amplitudes das variações foram de 373-533, 449-644 e 372-600 kPa, respectivamente, para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m.

Tabela 13. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	40	41	27	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	312 a	320 a	546 a	393 a
EC2	470 a	429 a	481 a	460 a
EC3	337 a	399 a	573 a	436 a
Média	373 B	383 B	533 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	564 a	660 a	632 a	619 a
EC2	419 a	632 a	652 a	568 a
EC3	363 a	652 a	649 a	555 a
Média	449 B	648 A	644 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	469 a	319 a	618 a	469 a
EC2	277 a	397 a	571 a	415 a
EC3	370 a	371 a	611 a	451 a
Média	372 B	362 B	600 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

Os maiores valores de σ_p em todos os Gsi deste solo, nas três profundidades, ocorreu quando o Gsi foi de 27 % (Tabelas 12 e 13).

Neste solo a análise dos valores médios de σ_p em todos os Gsi estudados, nas três profundidades, indicou que quando o Gsi for inferior a 41 %, o solo suportará as tensões impostas pelo tráfego de máquinas.

4.3.5 Índice de Compressão no LVd

Nas amostras equilibradas na câmara de Richards (faixa de Gsi de 65-93 %), das três profundidades avaliadas, os valores de C_c não apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo (Tabela 14).

Tabela 14. Valores médios do índice de compressão de duas épocas em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	93	68	65	
	Profundidade 0,0- 0,05 m			
EC1	0,42 a	0,34 b	0,44 a	0,40 a
EC2	0,34 b	0,49 a	0,47 a	0,43 a
EC3	0,23 c	0,40 ab	0,41 a	0,35 a
Média	0,33 A	0,41 A	0,44 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m			
EC1	0,22 a	0,28 a	0,29 b	0,26 a
EC2	0,24 a	0,29 a	0,36 a	0,30 a
EC3	0,25 a	0,34 a	0,33 ab	0,31 a
Média	0,24 B	0,30 A	0,33 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m			
EC1	0,28 a	0,36 a	0,43 a	0,36 a
EC2	0,30 a	0,35 a	0,47 a	0,37 a
EC3	0,29 a	0,27 b	0,45 a	0,34 a
Média	0,29 B	0,33 B	0,45 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

O valor médio geral do índice Cc nesta condição foi de 0,34 e os valores médios das camadas de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram, respectivamente, de 0,39, 0,29 e 0,35, onde a profundidade de 0,07-0,12 m apresentou valor inferior e significativo em relação às demais profundidades. Este menor valor na camada de 0,07-0,12 em relação às demais camadas está associado às deformações já ocorridas, o que torna essa camada mais resistente à novas deformações.

Houve um incremento do índice Cc à medida que o solo sofreu redução no Gsi, onde o índice Cc aumentou nas três camadas analisadas quando o Gsi do

solo passou de 93 para 65 %. Na profundidade de 0,0-0,05 essa variação não foi significativa.

Nas amostras de solo que sofreram perda de água naturalmente dentro de caixas de papelão (faixa de Gsi de 27-41%), os valores do índice Cc não apresentaram diferença significativa entre os estados de compactação do solo, à exceção da profundidade de 0,0-0,05 m, onde o EC1 apresentou valor superior em relação aos demais estados de compactação do solo (Tabela 15).

Tabela 15. Valores médios do índice de compressão em um Latossolo Vermelho distroférico, sob três graus de saturação inicial de água, estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)			Média
	40	41	27	
Profundidade 0,0- 0,05 m				
EC1	0,44 a	0,54 a	0,50 a	0,49 a
EC2	0,31 a	0,26 a	0,32 a	0,30 b
EC3	0,27 a	0,22 b	0,37 a	0,29 b
Média	0,34 A	0,34 A	0,40 A	
Profundidade 0,07- 0,12 m				
EC1	0,13 a	0,09 a	0,08 a	0,10 a
EC2	0,07 a	0,08 a	0,10 a	0,08 a
EC3	0,08 a	0,10 a	0,15 a	0,11 a
Média	0,09 A	0,09 A	0,11 A	
Profundidade 0,20- 0,25 m				
EC1	0,19 a	0,12 a	0,20 a	0,17 a
EC2	0,12 a	0,14 a	0,20 a	0,15 a
EC3	0,21 a	0,18 a	0,16 a	0,18 a
Média	0,17 A	0,15 A	0,19 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

Nesta faixa de Gsi, o valor médio geral do índice Cc foi de 0,21 e os valores médios para as profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m foram,

respectivamente, de 0,36, 0,10 e 0,17, onde a profundidade de 0,07-0,12 m apresentou valor inferior e significativo em relação às demais profundidades. Esse efeito de acúmulo das tensões compactantes na profundidade de 0,07-0,12 m também foi verificado no LV.

Embora não se tenha verificado diferença significativa, nesta condição de Gsi, houve um pequeno incremento do índice Cc à medida que o solo sofreu redução no mesmo. Nas três profundidades essa variação não foi significativa.

Neste solo, a análise dos valores médios de índice Cc, em todos os Gsi estudados, possibilita afirmar que a maior susceptibilidade a compactação deste solo ocorreu quando o Gsi foi entre 65 e 68% (Tabelas 14 e 15).

4.3.6 Distribuição da σ_p e do índice Cc por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o LVd

Quando o grau de saturação inicial de água do solo (Gsi) foi inferior a 60 %, a σ_p foi pouco influenciada pelo conteúdo de água e pela densidade inicial do solo (Dsi). Quando o solo apresentou Gsi > 60 %, a Dsi passou a ter maior influência que a própria condição de água do solo na determinação do valor da σ_p (Tabela 16).

Para o índice Cc, de maneira geral ocorreu redução em seus valores a medida que o solo se tornou mais denso e aumentou seus valores com incremento de Gsi. Isto ocorre em função de que o solo após ter sofrido deformação, torna-se mais resistente a novas deformações, ou, para que ocorra nova deformação, maior deverá ser a pressão ou carga aplicada sobre o solo.

Tabela 16. Pressão de preconsolidação e índice de compressão por classes de densidade e graus de saturação inicial de água para o Latossolo Vermelho Distroférrico, Coronel Barros, Rs, 2001.

Classes de densidade	Classes de graus de saturação inicial (%)					
	< 15	15 – 30	30 – 45	45 – 60	60 – 75	> 75
Pressão de Preconsolidação						
< 1,15	372 (3)	362 (10)	440 (1)	303 (2)	---	85 (7)
1,15 – 1,30	---	452 (7)	405 (18)	259 (17)	186 (12)	83 (13)
1,30 – 1,45	---	580 (5)	471 (13)	431 (7)	325 (34)	153 (33)
1,45 – 1,60	---	632 (1)	642 (6)	615 (7)	528 (8)	362 (29)
> 1,60	---	---	---	---	---	581 (2)
Índice de Compressão						
< 1,15	- 0,44	- 0,47	- 0,48	- 0,61	---	- 0,29
1,15 – 1,30	---	- 0,22	- 0,25	- 0,38	- 0,44	- 0,31
1,30 – 1,45	---	- 0,19	- 0,13	- 0,13	- 0,39	- 0,28
1,45 – 1,60	---	- 0,08	- 0,08	- 0,10	- 0,31	- 0,27
> 1,60	---	---	---	---	---	- 0,21

Dados obtidos a partir de amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa, totalizando 234 ensaios de compressão. Os valores entre parênteses representam o número de amostras que se enquadraram nas diferentes classes de Dsi ou Gsi.

4.3.7 Estudo comparativo dos parâmetros de compressibilidade entre o LV e o LVd

4.3.7.1 Pressão de preconsolidação do solo

Nas profundidades de 0,0-0,05 e 0,07-0,12 m, o LVd apresenta maior valor médio de σ_p que o LV e na profundidade de 0,20-0,25 m, apresentou menor valor de σ_p , embora nas três profundidades não tenha ocorrido diferença significativa entre o LV e LVd. As médias nas diferentes tensões de água, nos dois solos, mostram que a medida que o solo vai secando, vai aumentando o valor da σ_p , nas três camadas estudadas (Tabela 17).

Tabela 17. Valores médios de pressão de pré-consolidação (kPa) de duas épocas entre os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em tensões de água para os solos LV e LVd.

Solo	Tensões de água (kPa)									Média
	1			33			300			
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	
Profundidade 0,0– 0,05 m										
LV	20	32	36	49	65	123	180	141	214	96 a
Média		29 C			79 B			178 A		
LVd	44	52	157	77	270	219	204	315	275	179 a
Média		84 B			189 AB			265 A		
Profundidade 0,07– 0,12 m										
LV	290	178	143	360	305	352	426	328	501	320 a
Média		204 B			339 AB			418 A		
LVd	244	152	184	500	308	395	523	528	490	369 a
Média		193 B			401 A			514 A		
Profundidade 0,20 – 0,25 m										
LV	149	167	126	248	383	271	339	368	359	268 a
Média		147 B			301 A			355 A		
LVd	182	92	94	255	150	275	354	265	309	220 a
Média		123 B			227 AB			309 A		

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha para cada tensão de água e profundidade, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$). Não incluiu-se os dados da época três pois nesta época as amostras não foram submetidas às mesmas tensões de água.

Os valores médios de σ_p no LV nas profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m, foram, respectivamente de 96, 320 e 268 kPa. Para o LVd estes valores foram, respectivamente, de 179, 369 e 220 kPa, o que demonstra que os maiores valores encontrados na camada intermediária do solo, se devem ao acúmulo de tensões impostas pelas máquinas agrícolas. Este comportamento também foi observado por Carpenedo (1994), que encontrou maior resistência do solo às pressões externas no maior estado de compactação. Segundo o Hartge & Horn (1984), esse fenômeno pode ser atribuído a maior resistência nos pontos de contato entre partículas unitárias, geralmente de mineral quartzo, e ao alto grau de empacotamento entre das partículas devido sua alta densidade inicial.

A amplitude de variação média do σ_p no LV para as camadas de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m, entre as tensões de água, foram de 29-178, 204-418 e 147-355 kPa, respectivamente, Para o LVd a amplitude de variação foram de 84-265, 193-514 e 123-309 kPa, respectivamente. Estes resultados concordam com os resultados encontrados por Kondo & Dias Junior (1999).

4.3.7.2 Índice de Compressão do solo

Na profundidade de 0,0-0,05 m, o LV apresenta maior valor de índice C_c que o LVd e nas demais profundidades apresentou valores semelhantes estatisticamente. As médias nas diferentes tensões de água, nos dois solos, mostram que à medida que o solo vai secando, vai aumentando o valor do índice C_c , nas três camadas estudadas. Estes resultados indicam que as forças coesivas que se originam nestes solos, no sistema plantio direto (sem revolvimento) e em baixos conteúdos de água, elevam sua resistência à deformação, reduzindo o índice C_c . Com as partículas mais próximas entre si, aumenta o número de pontos de contato com aumento do atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo, tornando o solo mais resistente à deformação.

Os valores médios de índice C_c no LV nas profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m, foram, respectivamente, de 0,54, 0,27 e 0,36. Para o LVd estes valores foram, respectivamente, de 0,39, 0,29 e 0,36, o que demonstra que os menores valores encontrados na camada intermediária do solo (0,07-0,12 m), se devem às deformações já sofridas por estes solos. A amplitude de variação média do índice C_c do LV para as camadas de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m, entre as tensões de água, foram, respectivamente, de 0,44-0,61, 0,23-0,31 e 0,29-0,39, Para o LVd a amplitude de variação foram, respectivamente, de 0,33-0,44, 0,23-0,33 e 0,29-0,45 (Tabela 18).

Tabela 18. Valores médios de índice de compressão de duas épocas entre os estados de compactação EC1, EC2 e EC3, tensões de água do solo e solos LV e LVd.

Solo	Tensões de água (kPa)*									Média
	1			33			300			
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	
Profundidade 0,0 – 0,05 m										
LV	0,48	0,39	0,46	0,62	0,44	0,65	0,59	0,59	0,66	0,54 a
Média	0,44 B			0,57 AB			0,61 A			
LVd	0,42	0,34	0,23	0,34	0,49	0,40	0,44	0,48	0,41	0,39 b
Média	0,33 A			0,41 A			0,44 A			
Profundidade 0,07– 0,12 m										
LV	0,18	0,22	0,29	0,21	0,27	0,30	0,22	0,28	0,45	0,27 a
Média	0,23 A			0,26 A			0,31 A			
LVd	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,34	0,29	0,36	0,33	0,29 a
Média	0,23 B			0,30 A			0,33 A			
Profundidade 0,20 – 0,25 m										
LV	0,26	0,30	0,32	0,30	0,45	0,44	0,33	0,41	0,42	0,36 a
Média	0,29 B			0,40 A			0,39 A			
LVd	0,28	0,30	0,29	0,36	0,35	0,27	0,43	0,47	0,45	0,36 a
Média	0,29 B			0,33 B			0,45 A			

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha para cada tensão de água e profundidade, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$). Não incluiu-se os dados da época três pois nesta época as amostras não foram submetidas às mesmas tensões de água. * As tensões de 1, 33 e 300 kPa, correspondem aos graus de saturação inicial de água de 91, 63 e 58 % para o LV e respectivamente de 93, 68 e 65 % para o LVd.

Estes resultados concordam com os resultados encontrados por Silva et al. (2000) e Imhoff (2002), onde o índice de compressão foi relacionado negativamente com a densidade do solo.

Verifica-se também que os maiores valores do índice Cc em todos os Gsi estudados, nas três profundidades, ocorreu quando o Gsi foi de 58% para o LV e 65 % para o LVd. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Silva et al. (2000), que em um Latossolo Vermelho-Escuro, encontraram maior suscetibilidade à compactação quando o grau de saturação ficou próximo de 70%, para densidade inicial maior que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ e, quando os níveis de densidade

inicial foi menor que $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, a maior suscetibilidade à compactação ocorreu quando o grau de saturação ficou próximo de 50%.

4.3.8 Parâmetros de cisalhamento do solo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação de água

Serão discutidos a coesão e o ângulo de atrito interno, que serão denominados doravante de C e Φ , respectivamente.

4.3.8.1 Coesão no LV (C)

Ocorreu diferença significativa nos valores médios de C entre os estados de compactação nas profundidades de 0,07-0,12 m, onde o EC1 apresentou valor superior aos demais estados de compactação, e na profundidade 0,2-0,25 m, o EC1 apresentou valor superior ao EC2 e semelhante ao EC3, (Tabela 19).

Na profundidade 0,0-0,05 m não ocorreu diferença entre os estados de compactação nos valores de C, possivelmente pela mobilização freqüente que esta camada sofre pela ação dos mecanismos sulcadores das semeadoras a cada safra.

Apenas na profundidade 0,07-0,12 m, a diferença entre os valores de C foi significativa, quando o Gsi do solo reduziu de 63 para 58 %. A medida que o solo vai secando, vai aumentando a C entre as partículas por ficarem mais próximas uma da outra e os filmes de água entre partículas com maior tensão.

Ocorreu relação direta entre a densidade do solo e a C, onde os valores médios de densidade nas profundidades de 0,0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m foram respectivamente de 1,11, 1,51 e $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, e os valores médios de coesão para as mesmas profundidades foram respectivamente de 27, 61 e 49 kPa, evidenciando que a medida que o solo ficou mais denso, maiores foram os valores de C entre as partículas do solo.

Tabela 19. Valores médios de coesão (kPa), em um Latossolo Vermelho, sob dois graus de saturação inicial de água, três estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)		
	63	58	Média
	Profundidade 0,0- 0,05 m		
EC1	19 b	27 a	23 a
EC2	29 a	30 a	29 a
EC3	24 ab	36 a	30 a
Média	24 A	31 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m		
EC1	65 a	78 a	71 a
EC2	49 a	69 ab	59 b
EC3	42 a	66 b	54 b
Média	52 B	71 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m		
EC1	50 a	57 b	53 a
EC2	43 a	45 c	44 b
EC3	37 a	63 a	50 ab
Média	43 A	55 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

O valor geral médio da C deste solo foi de 46 kPa. Os valores médios de densidade e C da profundidade 0,0-0,05 m foram significativamente inferiores às demais profundidades. Não houve diferença significativa entre os valores médios de densidade do solo, quando o Gsi do solo reduziu de 63 para 58 % (Tabela 5), indicando que a diferença de C com a redução do grau de saturação está principalmente associada à água do solo. O incremento de C com a redução do Gsi foi tanto maior quanto maior o valor da Dsi, com maior variação na profundidade de 0,07-0,12 m.

4.3.8.2 Ângulo de atrito interno no LV (Φ)

Não ocorreu diferença estatística significativa entre os valores de Φ entre os estados de compactação do solo e entre os graus de saturação inicial de água do solo, nas três profundidades avaliadas, à exceção da profundidade de 0,07-0,12 m, no Gsi de 58 %, onde EC2 apresentou valor significativamente inferior ao EC1. Essa diferença pode ter ocorrido em virtude de se tratar de dados médios de Φ . Também não ocorreu diferença significativa entre as profundidades avaliadas (Tabela 20).

Tabela 20. Valores médios de ângulo de atrito, em um Latossolo Vermelho, sob dois graus de saturação inicial de água, três estados de compactação e profundidades. Cruz Alta, RS, 2001.

Estados de Compactação	Graus de saturação inicial (%)		
	63	58	Média
	Profundidade 0,0- 0,05 m		
EC1	28 a	28 a	28 a
EC2	23 a	29 a	26 a
EC3	25 a	25 a	25 a
Média	25 A	27 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m		
EC1	29 a	32 a	30 a
EC2	29 a	27 b	28 a
EC3	27 a	28 ab	27 a
Média	28 A	29 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m		
EC1	25 a	30 a	27 a
EC2	28 a	32 a	30 a
EC3	30 a	29 a	29 a
Média	28 A	30 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

Os valores médios de Φ para as profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25m foram respectivamente de 26, 28 e 29, sendo a média geral de 28⁰. Verifica-se também que o Φ não variou com a densidade ou com a água do solo,

sendo uma característica mais permanente do solo (Tabela 20). Os valores encontrados na literatura (Soane & Ouwerkerk, 1994) mostram que esse parâmetro é de baixa variabilidade e mudam mais com grandes modificações de água e/ou textura do solo.

4.3.8.3 Coesão no LVd

Não ocorreu diferença significativa entre os valores médios de C entre os estados de compactação nas três profundidades avaliadas (Tabela 21).

Tabela 21. Valores médios de coesão (kPa) de um Latossolo Vermelho distroférico, sob dois graus de saturação, três estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Grau de saturação inicial (%)		
	68	65	Média
	Profundidade 0,0- 0,05 m		
EC1	35 a	32 a	33 a
EC2	26 a	42 a	34 a
EC3	37 a	41 a	39 a
Média	33 A	38 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m		
EC1	54 a	62 a	58 a
EC2	37 a	65 a	51 a
EC3	57 a	60 a	58 a
Média	49 A	62 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m		
EC1	35 a	39 a	37 a
EC2	35 a	50 a	42 a
EC3	38 a	47 a	42 a
Média	36 B	45 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

Entre as profundidades ocorreu diferença significativa, onde a profundidade de 0,07-0,12 m apresentou valor médio superior às demais profundidades. Isso

evidencia que essa camada do solo sofreu maior deformação em função do acúmulo de tensão compactante imposta pelas máquinas e implementos agrícolas. Essa maior deformação pode ser constatada pelo valor médio superior de densidade nesta camada em relação às demais profundidades (Tabela 5).

Não houve diferença significativa entre os valores médios de C quando o grau de saturação inicial de água do solo variou de 68 para 65 %, exceto na profundidade de 0,2-0,25m.

Ocorreu relação direta entre a densidade do solo e a C, onde os valores médios de densidade nas profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m foram respectivamente de 1,28, 1,50 e 1,36 Mg m⁻³ e os valores médios de C para as mesmas profundidade foram respectivamente de 35, 56 e 40 kPa, evidenciando que a medida que o solo ficou mais denso, maiores foram os valores de C entre as partículas do solo. O valor médio geral da C deste solo foi de 44 kPa (Tabela 21).

4.3.8.4 Ângulo de atrito interno no LVd

Não ocorreu diferença estatística significativa do Φ entre os estados de compactação do solo e entre os graus de saturação inicial de água do solo, nas três profundidades avaliadas (Tabela 22).

Também não ocorreu diferença significativa entre as profundidades avaliadas. Os valores médios para as profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25m foram respectivamente de 26, 27 e 25, sendo a média geral de 26. Verifica-se também que o Φ não variou com a densidade ou com a água do solo, sendo uma característica mais permanente do solo.

Tabela 22. Valores médios de ângulo de atrito, de em um Latossolo Vermelho distroférico, sob dois graus de saturação inicial de água, três estados de compactação e profundidades. Coronel Barros, RS, 2001.

Estados de Compactação	Grau de saturação inicial (%)		
	68	65	Média
	Profundidade 0,0- 0,05 m		
EC1	25 ab	28 a	26 a
EC2	28 a	26 a	27 a
EC3	23 b	28 a	25 a
Média	25 A	27 A	
	Profundidade 0,07- 0,12 m		
EC1	23 a	29 a	26 a
EC2	28 a	28 a	28 a
EC3	24 a	29 a	26 a
Média	25 A	29 A	
	Profundidade 0,20- 0,25 m		
EC1	23 a	28 a	25 a
EC2	22 a	25 a	23 a
EC3	26 a	27 a	26 a
Média	24 A	27 A	

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada grau de saturação inicial de água, não diferem significativamente pelo teste t de student ($P < 0,05$).

4.4.6 Estudo comparativo dos parâmetros de cisalhamento entre o LV e o LVd

4.4.6.1 Coesão do solo

Nas profundidades de 0,07-0,12 e 0,20-0,25 m o LV apresentou maior valor de C que o LVd e na profundidade de 0,0-0,05 m apresentou menor valor (Tabela 23).

Tabela 23. Valores médios de coesão (kPa) para os estados de compactação EC1, EC2 e EC3 em duas tensões de água para os solos Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho distroférico.

Solo	Tensões de água (kPa)						Média
	33			300			
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	
Profundidade 0,0 - 0,05 m							
LV	19	29	25	27	30	36	28
Média		24			31		
LVd	35	26	37	29	42	41	35
Média		33			37		
Profundidade 0,07- 0,12 m							
LV	65	49	42	79	69	66	62
Média		52			71		
LVd	54	37	57	62	65	60	56
Média		49			62		
Profundidade 0,20 – 0,25 m							
LV	50	43	37	57	42	63	49
Média		43			54		
LVd	35	35	38	39	50	47	40
Média		36			45		

Os valores médios de C nas duas tensões e nos dois solos, mostram que a medida que o solo foi secando, foi aumentado o valor da C, nas três camadas estudadas.

Os valores médios de C no LV nas profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m foram, respectivamente, de 28, 62 e 49 kPa. Para o LVd estes valores foram, respectivamente, de 35, 56 e 40 kPa. Os maiores valores foram encontrados na camada intermediário do solo, devido ao maior estado de compactação causado pelo acúmulo de tensões impostas pelos pneumáticos de máquinas agrícolas. A amplitude de variação média da C entre as tensões de água no LV e LVd para as camadas de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m, foram, respectivamente, de 24-31, 52-71, 43-54 e de 33-37, 49-62 e 36-45 kPa.

Estes resultados concordam com Voorhees et al.,(1978) e Azevedo (1999), que afirmam haver maior resistência ao cisalhamento com maior intensidade de compactação. Como a resistência ao cisalhamento é função direta da coesão do solo, maiores valores de coesão em solos com maior estado de compactação, fará com que a resistência do solo seja maior.

4.4.6.2 Ângulo de atrito interno do solo

Nas três profundidades avaliadas, os valores de Φ foram semelhantes para ambos os solos, LV e LVd (Tabela 24).

Tabela 24. Valores médios de ângulo de atrito interno para os estados de compactação EC1, EC2 e EC3, em duas tensões para os solos Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho distroférico.

Solo	Tensões de água (kPa)						Média
	33			300			
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	
Profundidade 0,0 – 0,05 m							
LV	28	23	25	28	29	25	26
Média		25			27		
LVd	25	28	23	28	26	28	26
Média		25			27		
Profundidade 0,07- 0,12 m							
LV	29	29	27	32	27	28	29
Média		28			29		
LVd	23	28	24	29	28	29	27
Média		25			29		
Profundidade 0,20 - 0,25 m							
LV	23	23	29	30	32	29	28
Média		25			30		
LVd	23	22	26	28	26	27	25
Média		24			27		

Os valores médios do Φ nas duas tensões, nos dois solos, mostram que a medida que o solo foi secando, foi aumentado o valor do Φ do solo, nas três camadas estudadas, embora não seja estatisticamente significativo.

Os valores médios do Φ no LV nas profundidades de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m foram, respectivamente, de 26, 29 e 28. Para o LVd estes valores foram, respectivamente, de 26, 27 e 25. Nos dois solos, os maiores valores encontrados ocorreram na camada intermediária, possivelmente em função do acúmulo das tensões impostas pelos pneumáticos.

A amplitude de variação média do Φ no LV e no LVd para as camadas de 0-0,05, 0,07-0,12 e 0,2-0,25 m e tensões, foram, respectivamente, de 25-27, 28-29, 25-30 e 25-27, 25-29, 24-27.

Este resultados concordam com Soane & Ouwerkerk (1994), onde citam que o Φ não é alterado pelo sistema de manejo que um solo é submetido ou pela variação da densidade do solo.

4.4.7 Correlações

Inicialmente realizou-se correlações gerais envolvendo os dados observados nas seis tensões de água para os parâmetros de compressibilidade e duas tensões para os parâmetros de cisalhamento (anexos 1, 2 e 3). Optou-se em realizar as correções por classes de G_{si} (< 30 %, 30-60% e > 60%), para se estudar a importância individual dos atributos densidade inicial do solo (D_{si}), grau de saturação inicial de água (G_{si}), coesão do solo (C) e conteúdo de argila (Arg), visando definir qual(ais) atributo(s) que mais influenciou(ram) na definição do(s) valor(es) da pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão(C_c), Coesão (C) e ângulo de atrito interno (Φ), em cada classe de G_{si} .

4.4.7.1 Parâmetros de compressibilidade e cisalhamento do LV e LVd

Nas três classes de grau de saturação inicial (Gsi) de água do LV, a Dsi foi o atributo que apresentou maior correlação com os parâmetros de compressibilidade do solo (σ_p e Cc) (Tabela 25).

Tabela 25. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e Cc) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi). Cruz Alta, RS, 2001.

Parâmetro	σ_p	Cc	C	Φ
Gsi < 30 %				
Dsi	0.4703 ^{ns}	0.8824 ^{**}	0.9182 ^{ns}	0.4599 ^{ns}
Gsi	-0.0625 ^{ns}	-0.5780 ^{ns}	-0.8801 ^{ns}	-0.5357 ^{ns}
Coe	0.1385 ^{ns}	-0.4958 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.9712 ^{ns}	0.6229 ^{ns}	0.3705 ^{ns}	0.9527 ^{ns}
Gsi 30 – 60 %				
Dsi	0.5409 ^{**}	0.8614 ^{**}	0.7020 ^{**}	0.3727 ^{**}
Gsi	-0.2137 ^{ns}	0.0959 ^{ns}	-0.6021 ^{**}	-0.3224 ^{ns}
Coe	0.5074 ^{**}	0.4694 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.7309 ^{**}	0.4583 ^{**}	0.4983 ^{**}	0.2599 ^{ns}
Gsi > 60 %				
Dsi	0.5388 ^{**}	0.8311 ^{**}	0.4764 ^{**}	0.3868 ^{**}
Gsi	-0.3414 ^{**}	0.4702 ^{**}	-0.2852 ^{ns}	-0.3031 ^{ns}
Coe	-0.1403 ^{ns}	0.2488 ^{ns}	1	Nd
Arg	-0.2267 ^{ns}	-0.3698 ^{**}	-0.1087 ^{ns}	-0.0326 ^{ns}

**Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade. Nd Não determinado. As correlações para os parâmetros de compressibilidade foram realizadas em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios. Para os parâmetros de cisalhamento, foram realizadas em amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Para os parâmetros de cisalhamento, C e Φ , a Dsi apresentou maior correlação que o Gsi, à exceção da classe de Gsi < 30%, onde para o Φ , o Gsi apresentou maior correlação que a Dsi, embora essa maior correlação não tenha sido significativa. Isso demonstra que o estado inicial de compactação, de maneira

geral, influenciou mais que o conteúdo de água do solo no comportamento compressivo desse solo.

Nas classes de Gsi < 30 % e 30-60 % do LVd, a Dsi apresentou maior correlação com os parâmetros de compressibilidade que o Gsi (Tabela 26). Na classe de Gsi > 60 % o atributo Gsi apresentou maior correlação com os parâmetros de compressibilidade e cisalhamento do solo.

Tabela 26. Valores de “r” de correlações para parâmetros de compressibilidade(σ_p e Cc) e cisalhamento(C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água(Gsi).Coronel Barros, RS, 2001.

Parâmetro	σ_p	Cc	C	Φ
Gsi < 30 %				
Dsi	0.4771 ^{ns}	0.9036 ^{**}	0.4010 ^{ns}	-0.0463 ^{ns}
Gsi	0.1990 ^{ns}	0.3847 ^{ns}	-0.3902 ^{ns}	0.0847 ^{ns}
Coe	-0.1717 ^{ns}	0.8884 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.9906 ^{**}	-0.0862 ^{ns}	-0.0995 ^{ns}	-0.7010 ^{ns}
Gsi 30 - 60 %				
Dsi	0.6328 ^{**}	0.7808 ^{**}	0.2782 ^{ns}	-0.3325 ^{ns}
Gsi	-0.3741 ^{**}	-0.3149 ^{**}	-0.2943 ^{ns}	0.3876 ^{ns}
Coe	-0.0326 ^{ns}	-0.1480 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.3751 ^{ns}	0.8489 ^{**}	-0.1186 ^{ns}	-0.0070 ^{ns}
Gsi > 60 %				
Dsi	0.2547 ^{**}	-0.3991 ^{**}	0.5389 ^{**}	0.0030 ^{ns}
Gsi	-0.3632 ^{**}	0.5597 ^{**}	-0.4842 ^{**}	0.0386 ^{ns}
Coe	0.3071 ^{**}	0.1652 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.0345 ^{ns}	-0.2967 ^{**}	0.1318 ^{ns}	-0.1375 ^{ns}

^{**} Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade. Nd Não determinado. As correlações para os parâmetros de compressibilidade(σ_p e Cc) foram realizadas em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios. Para os parâmetros de cisalhamento(C e Φ), foram realizadas em amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

A correlação com os dados dos dois Latossolos, indicou que nas classes de Gsi < 30 % e 30-60 %, a Dsi apresentou maior correlação com os parâmetros de

compressibilidade que o Gsi. Na classe de Gsi > 60 % o atributo Gsi apresentou maior correlação com estes parâmetros.

Com relação aos parâmetros de cisalhamento, na classe de Gsi < 30 %, o Gsi apresentou maior correção que a Dsi, e nas demais classes ocorreu uma inversão, onde a Dsi teve maior correlação que o Gsi. Assim, podemos afirmar que de maneira geral que, para estes Latossolos, o estado inicial de compactação, influi mais no comportamento compressivo que a água do solo, principalmente quando o solo está com Gsi < 60 % (Tabela 27).

Tabela 27 Correlações (r) para parâmetros de compressibilidade(σ_p e Cc) e cisalhamento(C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi).

Parâmetro	σ_p	Cc	C	Φ
Gsi < 30 %				
Dsi	0.4526 ^{**}	0.8622 ^{**}	0.7403 ^{ns}	0.2843 ^{ns}
Gsi	0.0906 ^{ns}	-0.0739 ^{ns}	-0.6189 ^{ns}	-0.4500 ^{ns}
Coe	-0.1818 ^{ns}	0.0930 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.5452 ^{ns}	0.4579 ^{ns}	0.2314 ^{ns}	0.3573 ^{ns}
Gsi 30 - 60 %				
Dsi	0.5666 ^{**}	0.8391 ^{**}	0.5892 ^{**}	0.2663 ^{ns}
Gsi	-0.2688 ^{**}	-0.0486 ^{ns}	-0.4965 ^{**}	-0.2394 ^{ns}
Coe	0.4287 ^{**}	0.3589 ^{**}	1	Nd
Arg	0.6793 ^{**}	0.5636 ^{**}	0.3907 [*]	0.1389 ^{ns}
Gsi > 60 %				
Dsi	0.3473 ^{**}	0.0209 ^{ns}	0.5595 ^{**}	0.1879 ^{ns}
Gsi	-0.3554 ^{**}	0.5194 ^{**}	-0.4567 ^{**}	-0.1635 ^{ns}
Coe	0.1214 ^{ns}	0.0029 ^{ns}	1	Nd
Arg	0.0792 ^{ns}	-0.3334 ^{**}	-0.0753 ^{ns}	-0.1685 ^{ns}

^{**} Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade. Nd Não determinado. As correlações para os parâmetros de compressibilidade(σ_p e Cc) foram realizadas em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios. Para os parâmetros de cisalhamento(C e Φ), foram realizadas em amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Esse comportamento pode se explicado pela maior coesão entre as partículas do solo, quando este se encontra com menor Gsi, que resulta em maior

resistência. Estes resultados concordam com Azevedo(1999), que afirma que solos que sofreram compactação inicial, apresentam maior resistência ao cisalhamento.

4.4.8 Regressões - Compressibilidade

Para se estabelecer o coeficiente de determinação, bem como as equações de predição dos parâmetros de compressibilidade, se realizou regressões envolvendo os atributos densidade inicial do solo (D_{si}) e o grau de saturação de água inicial (G_{si}) dos Latossolos.

Não incluiu-se o parâmetro coesão nessas regressões, pois este atributo apresentou pequena contribuição na definição da σ_p e do C_c , possivelmente em função de que para os ensaios de cisalhamento as amostras foram equilibradas em duas tensões de água somente, 33 e 300 kPa (anexos 4, 5 e 6).

A D_{si} do solo LV foi responsável por 22, 29 e 29 % e o G_{si} por 7, 19 e 13 %, da variação da σ_p , respectivamente, nas classes de G_{si} <30 %, 30-60% e >60% (Tabela 28).

Nestas três classes, a D_{si} apresentou maior contribuição ao percentual de determinação da σ_p que o G_{si} . Esse mesmo efeito ocorreu para o índice C_c do solo, onde a D_{si} foi responsável por 78, 74 e 69 % e o G_{si} por 0, 5 e 8 %, da variação da σ_p , respectivamente, nas classes de G_{si} <30 %, 30-60% e >60%.

Tabela 28. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e Cc) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi). Cruz Alta, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,22
Dsi + Gsi	0,29
$\sigma_p = - 547,96 + 744,67(Dsi) + 7,58 (Gsi)$	
Dsi	0,78
$Cc = - 1,72 + 1,08(Dsi)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,29
Dsi + Gsi	0,48
$\sigma_p = - 164,62 + 852,53(Dsi) - 11,83(Gsi)$	
Dsi	0,74
Dsi + Gsi	0,79
$Cc = - 1,63 + 1,23(Dsi) - 0,007(Gsi)$	
Gsi > 60 %	
Dsi	0,29
Dsi + Gsi	0,52
$\sigma_p = - 56,22 + 561,3(Dsi) - 6,0(Gsi)$	
Dsi	0,69
Dsi + Gsi	0,77
$Cc = - 1,08 + 0,42(Dsi) + 0,002(Gsi)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios.

A Dsi do solo LVd foi responsável por 23, 40 e 13 % e o Gsi por 0, 14 e 6 %, da variação da σ_p , respectivamente, nas classes de Gsi <30 %, 30-60% e >60% (Tabela 29).

Nestas três classes, a Dsi apresentou maior contribuição percentual de determinação da σ_p que o Gsi. Esse mesmo efeito ocorreu para o índice Cc do solo nas classes de Gsi <30 %, 30-60%, onde a Dsi foi responsável por 82 e 61 % e o Gsi por 0 e 10 % da variação da σ_p . Na classe de Gsi >60%, o Gsi foi responsável por 31 % da variação do índice Cc e a Dsi foi responsável por 14 %.

Tabela 29. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e Cc) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi). Coronel Barros, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,23
$\sigma_p = - 351,19 + 670,76(Dsi)$	
Dsi	0,82
$Cc = - 1,60 + 1,08(Dsi)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,40
Dsi + Gsi	0,54
$\sigma_p = - 454,53 + 916,15(Dsi) - 7,49(Gsi)$	
Dsi	0,61
Dsi + Gsi	0,71
$Cc = - 1,44 + 1,13(Dsi) - 0,006(Gsi)$	
Gsi > 60 %	
Gsi	0,13
Gsi + Dsi	0,19
$\sigma_p = 419,36 + 177,29(Dsi) - 4,96(Gsi)$	
Gsi	0,31
Gsi + Dsi	0,45
$Cc = - 0,49 - 0,20(Dsi) + 0,005(Gsi)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios.

Quando os dados dos dois Latossolos foram analisados conjuntamente, novamente verificou-se que a Dsi do solo foi responsável pela maior contribuição na definição do coeficiente de determinação com a σ_p , nas classes de Gsi <30 % e 30-60% (Tabela 30).

Nestas classe de Gsi, a Dsi foi responsável por 20 e 32 % da variação da σ_p , e de 74 e 70 % da variação do índice Cc, respectivamente. Na classe de Gsi >60%, o Gsi foi responsável por 13 % da variação da σ_p e 27 % da variação do índice Cc .

Tabela 30. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade(Cc e σ_p) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água(Gsi).

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,20
$\sigma_p = - 231,97 + 588,90(Dsi)$	
Dsi	0,743
Dsi + Gsi	0,748
$Cc = - 1,66 + 1,13(Dsi) - 0,002(Gsi)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,32
Dsi + Gsi	0,49
$\sigma_p = - 228,11 + 833,85(Dsi) - 9,997(Gsi)$	
Dsi	0,704
Dsi + Gsi	0,769
$Cc = - 1,61 + 1,24(Dsi) - 0,007(Gsi)$	
Gsi > 60 %	
Gsi	0,126
Gsi + Dsi	0,266
$\sigma_p = 257,55 + 291,9(Dsi) - 5,05(Gsi)$	
Gsi	0,27
$Cc = - 0,697 + 0,005(Dsi)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas em 6 tensões, totalizando 477 ensaios.

Isso confirma a afirmação realizada quando da análise dos dados de correlação, que o estado inicial de compactação é mais importante no comportamento compressivo que o grau de saturação em água do solo, quando o Gsi se encontra abaixo de 60 %. Quando o Gsi é maior que 60% o conteúdo de água explica melhor o comportamento compressivo destes Latossolos. Estes resultados concordam parcialmente com os encontrados por Reinert(1990), que encontrou maior relação entre a Dsi e a σ_p quando o Gsi foi menor que 45% e quando o Gsi foi maior que 45 % o Gsi apresentou maior relação com a σ_p .

4.4.9 Regressões - Cisalhamento

Para averiguar que atributo(s) físico(s) do solo apresentam maior coeficiente de determinação pelas variações ocorridas nos parâmetros de cisalhamento direto do solo (C e Φ), realizou-se regressões envolvendo a densidade inicial (Dsi), conteúdo de argila(Arg) e grau de saturação inicial de água(Gsi) dos solos.

A Dsi do solo LV, foi responsável pelo maior coeficiente de determinação das variações ocorridas, tanto na coesão (C), como no ângulo de atrito interno do solo (Φ), nas três condições de Gsi, à exceção da classe de Gsi < 30 %, onde o conteúdo de argila foi responsável pelo maior coeficiente de determinação das variações ocorridas no Φ , (Tabela 31).

Tabela 31. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água. Cruz Alta, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,84
C = - 64.58 + 76.05(Dsi)	
Arg	0,91
Φ = - 36.72 + 1.22 (Arg)	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,493
Dsi + Gsi	0,524
Dsi + Gsi + Arg	0,543
C = - 159,00 + 159,04(Dsi) + 161.97(Gsi) + 0.68(Arg)	
Dsi	0,14
Φ = 11.87 + 12.58(Dsi)	
Gsi > 60 %	
Dsi	0,227
Dsi + Gsi	0,296
Dsi + Gsi + Arg	0,325
C = - 142.40 + 235.28(Dsi) + 173.30(Gsi) - 1.29(Arg)	
Dsi	0,15
Φ = 3.83+16.49(Dsi)	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Verifica-se também que o coeficiente de determinação da Dsi foi reduzindo a medida que o solo foi ficando mais úmido, onde, na classe de Gsi<30 %, a Dsi foi responsável por 84 % das variações ocorridas na C e, na classe de Gsi>60 %, a Dsi foi responsável por apenas 22 % das variações ocorridas na C.

A coesão do solo LVd na classe de saturação de Gsi<30%, não apresentou relação com a Dsi, Gsi ou Arg com nível de significância maior que 0,50. Nesta classe de Gsi, o conteúdo de argila do LVd, foi responsável por 49% das variações ocorridas no Φ , e, quando o modelo incluiu a Dsi, este atributo foi responsável por 78 % das variações ocorridas no Φ (Tabela 32).

Tabela 32. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, em três classes de graus de saturação inicial de água. Coronel Barros, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
C = nenhuma variável entrou no modelo com nível de significância > 0,50	
Arg	0,49
Arg + Dsi	0,78
$\Phi = 24.96 + 13.62(Dsi) - 0.30 (Arg)$	
Gsi 30 – 60 %	
Gsi	0,087
Gsi + Arg	0,140
$C = 59,21 - 121,96(Gsi) - 0.85(Arg)$	
Gsi	0,15
Gsi + Dsi	0,21
$\Phi = -17.99 + 67.84(Gsi) + 177.03(Dsi)$	
Gsi > 60 %	
Dsi	0,290
Dsi + Gsi	0,304
Dsi + Gsi + Arg	0,312
$C = - 130.27 + 182.18(Dsi) + 144.29(Gsi) - 0.41(Arg)$	
Arg	0,019
$\Phi = 34.12 - 0.13(Arg)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Na classe de Gsi de 30-60%, os atributos Gsi e Arg, foram responsáveis por 14% das variações ocorridas na C do solo. Os atributos Gsi e Dsi, foram responsáveis por 21% das variações ocorridas no Φ do solo.

Na classe de Gsi>60%, o atributo Dsi foi responsável por 29% das variações ocorridas na C do solo. A Arg foi responsável por 1,9% das variações ocorridas no Φ do solo.

A regressão com os dados conjuntos dos dois Latossolos, indicou que na classe de saturação de Gsi<30% para a coesão do solo, a Dsi foi responsável pelo maior percentual das variações ocorridas (55%),(Tabela 33). Nesta classe de Gsi, O Gsi foi responsável por 20% das variações ocorridas no Φ , e quando o modelo incluiu a Dsi, estes atributos foram responsáveis por 34 % das variações ocorridas no Φ .

Na classe de Gsi de 30-60%, a Dsi foi responsável por 35% das variações ocorridas na C e por 7% das variações ocorridas no Φ do solo.

Na classe de Gsi>60%, a Dsi foi responsável por 31% das variações ocorridas na C e por 3,5% das variações ocorridas no Φ do solo.

Assim, vemos que o parâmetro de cisalhamento do solo que tem maior influência no comportamento compressivo do solo, a coesão, nos três graus de saturação de água foi mais influenciada pela Dsi do que pelo Gsi, para os dois Latossolos estudados. Evidenciando que o estado de compactação influenciou mais fortemente na resistência ao cisalhamento do que o grau de saturação em água e por conseqüência no comportamento compressivo destes solos.

Estes resultados confirmam as afirmações de Caputo (1967), de que os fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento em solos coesivos são: estado de adensamento do solo, fragilidade ou estabilidade da estrutura do solo, condições de drenagem e velocidade de aplicação de cargas.

Tabela 33. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de cisalhamento(C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,55
Dsi + Arg	0,68
Dsi + Arg + Gsi	0,74
C = - 78.94 + 139.72(Dsi) + 108.28(Gsi) - 0,65 (Arg)	
Gsi	0,20
Gsi + Dsi	0,34
$\Phi = 60.07 - 57.67(Dsi) - 154.44(Gsi)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,35
Dsi + Gsi	0,38
Dsi + Gsi + Arg	0,40
C = - 141,89 + 150,23(Dsi) + 159.88(Gsi) + 0.57(Arg)	
Dsi	0,07
$\Phi = 14.97 + 9.77(Dsi)$	
Gsi > 60 %	
Dsi	0,313
Dsi + Gsi	0,341
Dsi + Gsi + Arg	0,359
C = - 132.45 + 194.80(Dsi) + 144.85(Gsi) - 0,64(Arg)	
Dsi	0.035
Dsi + Arg	0.064
Dsi + Arg + Gsi	0.071
$\Phi = 21.08+15.12(Dsi)+ 12.60(Gsi) - 0.18(Arg)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

4.5 Efeitos dos estados de compactação do solo sobre o rendimento das culturas do trigo, soja e milho

4.5.1 Cultura do trigo

Com relação à produtividade da cultura do trigo para o LV, safra 1999, verificou-se que o maior estado de compactação, EC1, proporcionou produtividade que diferiu significativamente dos demais estados de compactação. Essa

diferença representou 18,35 % a menos de produção em relação ao menor estado de compactação, EC3. No LVd, safra 2000, o maior estado de compactação também proporcionou menor produtividade que diferiu dos demais estados de compactação, onde essa diferença representou 34,05 % a menos de produção em relação ao menor estado de compactação (Tabelas 34 e 35).

Estes resultados concordam com os resultados encontrados por McAfee et al.(1989), que em solo de textura argilosa com resistência do solo variando entre 3,5 a 4,5 MPa, encontraram redução do rendimento de 30 % na cultura da aveia.

Tabela 34. Produtividade e produção relativa da cultura do trigo em Latossolo Vermelho, safra 1999, em três estados de compactação no município de Cruz Alta, RS.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Produção relativa (%)
EC 1	1,87 b	81,65
EC 2	2,15 a	93,88
EC 3	2,29 a	100,00

Médias de tratamentos não seguidas pela mesma letra na coluna, diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05).

Tabela 35. Produtividade e produção relativa da cultura do trigo em Latossolo Vermelho Distroférrico, safra 2000, em três estados de compactação no município de Coronel Barros, RS.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Produção relativa (%)
EC 1	1,24 b	65,95
EC 2	1,65 a	87,76
EC 3	1,88 a	100,00

Médias de tratamentos não seguidas pela mesma letra na coluna, diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05).

Isso demonstra que a cultura do trigo foi susceptível aos níveis de compactação existentes nos dois locais, mostrando também uma tendência de

que quanto mais compactado estiver o solo, menores produtividades poderão ser obtidas com essa cultura.

4.5.2 Cultura da soja

Os estados de compactação do solo não foram suficientemente elevados para promoverem decréscimos de produção da soja nos dois locais (Tabelas 36 e 37).

Tabela 36. Produtividade da cultura da soja no Latossolo Vermelho, safras 1999/2000 e 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Cruz Alta, RS.

Tratamentos	Produtividade Mg há ⁻¹	
	1999/2000	2000/2001
EC 1	1,77 a	3,80 a
EC 2	1,72 a	3,53 a
EC 3	1,82 a	3,23 a
Escarificado	nd ²	3,54 a

Médias de tratamentos seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05). ² Não determinado.

Tabela 37. Produtividade (Mg ha⁻¹) e produção relativa (%) da cultura da soja no Latossolo Vermelho distroférico, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Coronel Barros, RS.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Produção relativa (%)
EC 1	2,69 a	85,13
EC 2	2,70 a	85,44
EC 3	3,16 a	100,00
Escarificado	3,15 a	99,68

Médias de tratamentos seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05).

Isso evidencia que essa cultura é mais resistente aos diferentes estados de compactação do solo, quando comparada à cultura do trigo. Possivelmente, a cultura da soja compense essas limitações impostas pelo solo através de uma maior ramificação da planta ou de um maior número de sementes por vagens. Isso pode ser evidenciado quando observamos a produtividade obtida nos dois locais, na safra agrícola 2000/2001, comparando os valores obtidos na área escarificada e os valores obtidos no estado de compactação mais intenso, EC1.

4.5.3 Cultura do milho

Os estados de compactação no LV, safra 2000/2001, não proporcionaram produtividades que diferissem significativamente entre si. Ocorreu diferença significativa apenas entre a área escarificada e o EC2, onde esse estado proporcionou produção menor em 16,71 % em relação a área escarificada (Tabela 38).

Tabela 38. Produtividade e produção relativa da cultura do milho no Latossolo Vermelho, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Cruz Alta, RS.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Produção relativa (%)
EC1	8,11 ab	90,92
EC2	7,43 bc	83,29
EC3	8,11 ab	90,92
Escarificado	8,92 a	100,00

Médias de tratamentos não seguidas pela mesma letra na coluna, diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05).

No LVd, safra 2000/2001, a parcela escarificada apresentou maior produtividade de milho, cuja diferença foi significativa em relação aos estados de compactação do solo. A produção de milho da área escarificada em relação aos

estados de compactação 1, 2 e 3, foi superior, respectivamente, em 38,4, 14,9 e 14,1 %, (Tabela 39).

Entre os estados de compactação também houve diferença significativa entre os valores de produtividades obtidos, onde o estado de compactação menos intenso, EC3, proporcionou produção relativa superior em 24,31 % em relação ao estado de compactação mais intenso, EC1.

Estes resultados encontrados nos dois Latossolos concordam parcialmente com os resultados encontrados por Adams & Wulfsohn (1997), que ao trabalhar com solo franco siltoso e franco argiloso encontraram reduções nos rendimentos de 13 % no trigo e 7,5 % no milho, quando a densidade do solo passou de 1,07 para 1,19 Mg m⁻³.

Tabela 39. Produtividade e produção relativa da cultura do milho em Latossolo Vermelho distroférico, safra 2000/2001, em três estados de compactação e em área escarificada no município de Coronel Barros, RS.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Produção relativa (%)
EC1	4,46 c	61,60
EC2	6,16 b	85,08
EC3	6,22 b	85,91
Escarificado	7,24 a	100,00

Médias de tratamentos não seguidas pela mesma letra na coluna, diferem significativamente pelo teste t de student (P<0,05).

Isso demonstra que a cultura do milho também foi susceptível aos estados de compactação existentes nos dois locais, com mais intensidade no LVd, a exemplo da cultura do trigo. Isso de certa forma comprova que as gramíneas, em relação às leguminosas, foram mais suscetíveis aos problemas impostos ao solo pelos estados de compactação existentes nos locais estudados.

5. CONCLUSÕES

1. Os maiores valores de densidade (D_s) e resistência do solo (R_s), em ambos os Latossolos, ocorreram na profundidade de 0,07-0,12 m;
2. Os níveis de compactação proporcionaram aumentos de D_s , de R_s e de C , que conferiram aos dois Latossolos incrementos da σ_p e redução do índice C_c ;
3. O Φ não variou com a D_s ou com a umidade do solo e mostrou ser mais afetado pelo conteúdo de argila do solo;
4. Quando o grau de saturação inicial (G_{si}) foi inferior a 60% a D_s apresentou maior relação com a compressibilidade e, quando o G_{si} foi superior a 60 %, o grau de saturação em água explicou melhor o comportamento compressivo nos dois Latossolos;
5. A maior susceptibilidade à compactação ocorreu quando o grau de saturação em água foi de 58% para o LV e 65 % para o LVd;
6. A maior capacidade suporte ocorreu quando o grau de saturação em água no início dos testes foi semelhante ou inferior a 40%, nos dois Latossolos;
7. A cultura do trigo foi suscetível aos níveis de compactação existentes onde o maior estado de compactação proporcionou produtividade 18,35 % e 34,05 % menor em relação ao menor estado de compactação, respectivamente, no LV e LVd;

8. Os níveis de compactação do solo existentes nos dois Latossolos não promoveram decréscimos de produção na cultura da soja;
9. Na cultura do milho, somente no LVd os níveis de compactação existentes promoveram decréscimo de produção, onde o maior estado de compactação proporcionou produtividade 24,3 % menor em relação ao menor estado de compactação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, B. A., WULFSOHN, D. Variation of the critical-state boundaries of an agricultural soil. *European Journal of Soil Science*, v.48, p.739-748, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaio de adensamento unidimensional*: NBR 12007. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

AZEVEDO, M.A.A. *Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa, MG*. Viçosa, MG. 1999. 169f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

BALASTREIRE, L.A. *Máquinas Agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990. 307 p.

BARBER, S.A., MACKAY, A. D., KUCHENBUCH, R.O., BARRACLOUGH, S. effect of soil temperature and water on maize root growth. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 111, p. 267-9, 1988.

BAUDER, J.W., RANDALL, G.W., SCHULER, R.T. Effects of tillage with controlled wheel traffic on soil and root growth of corn. *Journal Soil Water Conservation*, Ankeny, v. 40, p. 382-5, 1985.

BECHER, H.H. Aggregate density and its possible effects on the transport of the soil solution. *Z. Pflanzenern. Bodenkd*, v. 154, p. 3-8, 1991.

BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle sizes distribution in soil compaction. *Hilgardia*, Berkley, v.36, p.567-91, 1965.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd Ed. Madison, Wisconsin USA. 1986. p. 463-78.

BENGHOUGH, A.G., MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal Soil Science*, London, v.41, p.341-58, 1990.

BLACKWELL, P.S.; SOANE, B.D. A method of predicting bulk density changes in fields soils resulting from compaction by agricultural traffic. *J. Soil Sci.*, Oxford, v. 32, n. 1, p.51-65, 1981.

BUZATTI, W.J.S. *Efeito da descompactação e umidade do solo sobre o crescimento e rendimento do girassol*. Porto Alegre, 1991. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Fitotecnia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto alegre, 1991.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CASSEL, D.K.; LAL, R. In: Lal, R.; Sanches, P.A Myths and science of soil of the tropics. Madison. ASA-SSSA. 1992. p.61-90.

CAPUTO, H.P. *Mecânica de solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1967. 187 p.

CARPENEDO, V. *Compressibilidade de solos em sistemas de manejo*. Porto Alegre, 1994. 106 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo)– Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loam. *Can. J. Soil Sci.*, v. 70, p. 425-33, 1988.

CAUDURO, F.A; DORFMAN, R. *Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem*. Porto Alegre, RS. Pallotti, 1986. 216p.

CHANCELLOR, W.J. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. Davis, Univ. California. 53p. (Bull. 1881)

DANIEL, L.A. & MARETTI, H.J. Avaliação de camada de solo compactada e análise de crescimento de plantas. In: SILVEIRA, G.M. da, coord. Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola, 4., Jundiaí, 1990. Anais. Campinas, Fundação Cargill, 1990. p. 22-33.

DIAS JUNIOR, M. de S. *Compression of three under long-term tillage and wheel traffic*. Michigan, East Lansing: Michigan State University, 1994. 114 f. Tese (Doutorado). Department of Crop and Soil Scienses, 1994.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, RJ. 1979.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: EMBRAPA, 1999.

FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.C.C.; THIMOTEO, C.M.S. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. *Científica*, São Paulo, v.23, n.1 p.117-32, 1995.

FORSYTHE, W.M. *Física de suelos: manual de laboratório*. San José: IICA, 1975. 212 p.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. particle-size Analysis. In: Klute, A. *Methods of soil Analysis*. Part 1.2. ed. Madison, Wisconsin: (s.n.), 1986. p.343-411.

GROENEVELT, P.H., KAY, B.D., GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, Amsterdam, v. 34, p. 101-14, 1984.

GUDEHUS, G. Soil Mechanics. Enke, Stuttgart, Germany, 1981, 281p.

GUNZELMANN, M. The quantification of the water regime of single aggregates and structured bulk soils with special regard to the relationship between water tension and water conductivity. Bayer. Bodenkd. Ber., v.15, 1990. 130p.

HAKANSSON, I. The degree of compactness as a link between technical, physical and biological aspects of soil compaction. In: *Proceedings of international Conference on Soil Compaction and Soil Management*, 8-12 June, 1992, Tallinn, Estonia, p.75-8.

HAKANSSON, I & DANFORS, B. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ISTVS, 7, Calgary, 1981. Proceedings, v. 1, p. 239-53, 1981.

HAKANSSON, I & VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. *Methods for assesment of soil degradation*. Boca Raton, Lewis Publishers, 1996. p.167-79.

HARTGE, K.H.& HORN, R. Investigations on the validity of Hooke's Law with regard to the compaction of soil under repeated loading. *Z. Acker-Pflanzenbau*, v. 153, p.200-07, 1984.

_____. Introduction to Soil physics. Enke, Stuttgart, Germany, 1991, 303 p.

HEMPFLING, A., SCHULTEN, H., HORN, R. Relevance of humus composition for the physical/mechanical stability of agricultural soils: A study by direct pyrolysis mass spectrometry. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, v. 17, p. 275-81, 1990.

HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. *An introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey. Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. The effect of different types of soil tillage on the mechanical loading of agricultural soils. *Z. Pflanzenern. Bodenkd.*, v. 149, p. 9-18, 1986.

_____. Compressibility of arable land. *Catena Sup.*, v. 11, p.53-71, 1988.

_____. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil Tillage Res.*, v. 17, p. 265-89, 1990.

HORN, R. & DEXTER, A.R. Dynamics of soil aggregation in a homogenized desert loess. *Soil Tillage Res.*, v. 13, p. 254-66, 1989.

HORN, R., DOMIZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWIEZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. *Soil Till. Res.*, v. 35, p. 23-36, 1988.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van. (Ed.). *Soil compaction in crop production*. Netherlands: Elsevier, 1994. p.45-69.

HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M. et al. Soil physical properties related to soil structure. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.30, n. 2-4, p.187-216, 1994.

IMHOFF, C.S. *Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos*. Piracicaba, 2002. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 2002.

KLEIN, V.A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Piracicaba, 1998. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 1998.

KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M. de S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho Amarelo sob diferentes usos. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. *Anais...* CD ROM. Resumo expandido. Rio de Janeiro, RJ. Brasil. 1997. 4p.

KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M. de S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.23, p.211-18, 1999.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics, SI Version*. New York, J. Wiley & Sons. 553p. 1979. (Series in soil engineering).

LARSON, W.E.; GILL, W.R., 1973. Soil physical parameters for designing new tillage systems. 1. Management Principles. In: CONSERVATION Tillage, the proceedings of a national conference. Ankeny: SCSA, 1973. P. 13-22.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strenght of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p.275-86, 1991.

MACKAY, A. D., BARBER, S. A. Effect of soil moisture and phosphate level on root hair growth of corn roots. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 86, p. 321-31, 1985.

MANTOVANI, E. C. *Compactação do Solo*. Informação Agropecuária, Belo horizonte, v. 13, 1987. 147 p.

MARTINS, J.S.M. *Fundamentos de um modelo de comportamento de solos argilosos saturados*. Rio de Janeiro, 1992. 257 f. Tese(doutorado em Engenharia)-Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

MARIA, I.C. de; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. bras.Ci.Solo*, Campinas, v.23, n.3, p.703-09, 1999.

McAFFEE, M.; LINDSTROM, J.; JOHANSSON, W. Effects of pre-sowing compaction on soil physical properties, soil atmosphere and growth of oats on a clay soil. *J.Soil Sci.*, Ottawa, v.40, n.4, p.707-17, 1989.

McCORMACK, D.E.; WILDING, L.P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 43, n. 1, p. 167-73, 1979.

MICKLETHWAITE, E.W.E. *Soil mechanics in relation to fighting vehicles*. Chertsey: Military college of Science, 1944. 20 p.

MORAES, M. H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. *Influência de camadas compactadas de subsuperfície no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja(Glycine Max(L.) Merrill)*. Científica, São Paulo, v.19, n.1, p.195-206, 1991.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped weath and soybean on Ultissol. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.51, p.183-6, 1987.

PEDÓ, F. *Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo*. Porto Alegre, 1986. 92 f. Dissertação(Mestrado em Agronomia-Solos)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

PEDROTTI, A. & DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. *Agrup. Catarinense*, v. 9, p.50-2, 1996.

PLA, I. Methodological problems to evaluate soil physical degradation. *Trans. 14 Th. International Congress of Soil Science. Kyoto (Japón)*. 1990. p.96-100.

REAVES, C.A. & COOPER, A.W. 1960. Stress distribution in soils under tractor loads. *Agric. Eng., dt Joseph*, v. 41, p.20-1, 31.

REINERT, D.J. Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf. Michigan State University. 129p. 1990(Ph.D. in Agronomy).

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V.R. *Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado*. Organizado por: Reimar Carlesso; Mirta T Petry; Genésio M Rosa; Carlos A Ceretta. *Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul:ed. 1 ed.*, Santa Maria:, Palloti, v. 1, p. 114-133, 2001.

RUSANOV, V.A. Effects of wheel and track traffic on the soil on crop growth and yield. *Soil & Till. Res.*, Amsterdam, v.19 p. 121-31, 1991.

ROSALEM, C.A, FERNADEZ, E.M., ANDREOTTI, M. , CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 5, p. 821-8, 1999.

SALIRE, E.V., HAMMEL, J.E., HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil & Till. Res.*, Amsterdam, v.31 p. 235-48, 1994.

SCHAFER, R. L.; JOHNSON, C.E. Changing soil condition-the soil dynamics of tillage. In: PREDICTING tillage effects on soil physical properties and processes. Madison: ASA, SSSA, 1982. p.13-28. (ASA special Publication, 44).

SHIERLAW, W.J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Pl. Soil*, v.77, n.1, p.15-28, 1984.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, V.10, p. 91-5, 1986.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, V.24, p. 239-49, 2000.

SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE B.D. & OUWERKERK, C. van, ed. *Soil compaction in crop production*. Netherlands, Elsevier, 1994, p. 01-21.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. 1981. Compaction by agricultural vehicles a review: II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.1, p.375-400.

STAFFORD, J.V.; TANNER, D.W. Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction. I. Shear strength. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.3, n. 3, p. 245-60, 1983.

STONE, R.J. & EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. *J. Agric. Eng. Res.*, v. 60, p.15-24, 1995.

TARDIEU, F. Analysis of the special variability in maize root density. I. Effect of wheel compaction on the special arrangement of roots. *Plant and Soil*, London. v.107, p.259-66, 1988.

TAYLOR, H.M., ARKIN, G.F. Root zone modification fundamentals and alternatives. In: TAYLOR, H.M. & ARKIN, G.F. *Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress*. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1981. p. 3-16.

TAYLOR, H.; BRAR, G. Effect of soil compaction on root development. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p.111-9, 1991.

TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relation for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

TAYLOR, N.W. Root behavior as affected by soil structure and strenght. In: CARSON, E.W.(Ed.) *The plant root and its enviroment*. Charlotesville, University, Press of Virginia.p.271-91, 1974.

VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. *Plantio direto no estado do Paraná*. Londrina, IAPAR, 1981. p.19-30. (IAPAR. Circular, 23).

VOORHEESS, W.B., JOHNSON, J.F., RANDAL, G.W., NELSON, W.W. Corn growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, p. 294-303, 1989.

VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.42, n. 2, p. 344-9, 1978.

Anexo 1. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho, nas tensões de 33 e 300 kPa. Cruz Alta, RS, 2001.

Parâmetro	C_c	σ_p	C	Φ
Dsi	0,7958 **	0,2610 **	0,7033 **	0,2839 **
Gsi	0,2675 **	-0,4801 **	-0,5897 **	-0,2505 **
Coe	0,5556 **	0,3505 **	1	---
Arg	0,5466 **	0,6117 **	0,4525 **	0,1617 ^{ns}

**Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade. A correlação entre os atributos de compressibilidade (C_c e σ_p) foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas em 6 tensões de água, totalizando 477 ensaios, já para os atributos de cisalhamento (C e Φ), foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas nas tensões de água de 33 e 300 kPa, totalizando 432 ensaios.

Anexo 2. Valores de “r” de correlações entre parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento (C e Φ) no Latossolo Vermelho distroférico, nas tensões de 33 e 300 kPa. Coronel Barros, RS, 2001.

Parâmetro	C_c	σ_p	C	Φ
Dsi	0,0136 ^{ns}	0,1936 ^{**}	0,5352 ^{**}	0,0064 ^{ns}
Gsi	-0,0405 ^{ns}	-0,5086 ^{**}	-0,2010 ^{**}	-0,1774 ^{ns}
Coesão	-0,1184 ^{ns}	0,3394 ^{**}	1	---
Argila	0,0499 ^{ns}	0,1849 ^{ns}	0,2054 ^{ns}	-0,0735 ^{ns}

**Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade. A correlação entre os atributos de compressibilidade (C_c e σ_p) foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas em 6 tensões de água, totalizando 477 ensaios, já para os atributos de cisalhamento (C e Φ), foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas nas tensões de água de 33 e 300 kPa, totalizando 432 ensaios.

Anexo3. Valores de “r” de correlações para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) e cisalhamento(C e Φ) para os dados conjuntos do LV e LVd, nas tensões de 33 e 300 kPa.

	C_c	σ_p	C	Φ
Dsi	0,4364**	0,2280**	0,6364**	0,1821**
Gsi	0,1345**	-0,4917**	-0,5519**	-0,1703 ^{ns}
Coesão	0,2801**	0,3319**	1	---
Argila	0,3649**	0,4294**	0,2681**	-0,0429 ^{ns}

**Correlação significativa a 1 % de probabilidade. ^{ns} Correlação não significativa a 1 % de probabilidade A correlação entre os atributos de compressibilidade(C_c e σ_p) foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas em 6 tensões de água, totalizando 477 ensaios, já para os atributos de cisalhamento(C e Φ), foi realizada com dados obtidos de amostras equilibradas nas tensões de água de 33 e 300 kPa , totalizando 432 ensaios.

Anexo 4. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa. Cruz Alta, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Φ	0,69
$C_c = - 1,24 + 0,02(\Phi)$	
Gsi	0,99
$\sigma_p = 399,11 - 8,39(Gsi)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,63
Dsi + Arg	0,67
Dsi + Arg + Gsi	0,71
Dsi + Arg + Gsi + Coe	0,74
$C_c = - 1,24 + 0,82(Dsi) + 0,006(Gsi) + 0,001(Coe) - 0,011 (Arg)$	
Dsi	0,586
Dsi + Arg	0,645
Dsi + Arg + Gsi	0,702
Dsi + Arg + Gsi + Φ	0,712
Dsi + Arg + Gsi + Φ + Coe	0,716
$\sigma_p = -1058,72 + 702,57(Dsi) - 5,99(Gsi) + 0,68(Coe) + 3,56(\Phi) + 11,50(Arg)$	
Gsi > 60 %	
Gsi	0,607
Gsi + Arg	0,716
Gsi + Arg + Dsi	0,759
Gsi + Arg + Dsi + Coe	0,764
$C_c = - 0,68 + 0,29(Dsi) + 0,006(Gsi) + 0,0003 (Coe) - 0,008(Arg)$	
Φ	0,046
$\Phi + Dsi$	0,071
$\Phi + Dsi + Gsi$	0,113
$\Phi + Dsi + Gsi + Coe$	0,161
$\Phi + Dsi + Gsi + Coe + Arg$	0,185
$\sigma_p = - 726,16 + 766,89(Dsi) - 5,97(Gsi) - 1,16(Coe) + 2,93(\Phi) + 5,93(Arg)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões matriciais de água de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Anexo 5. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c) no Latossolo Vermelho, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa. Coronel Barros, RS, 2001.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Coe	0,79
Coe + Φ	0,89
$C_c = - 0,83 + 0,01(Coe) + 0,01(\Phi)$	
Arg	0,981
Arg + Dsi	0,996
$\sigma_p = - 75,11 - 148,72(Dsi) + 18,16 (Arg)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,801
Dsi + Arg	0,878
Dsi + Arg + Gsi	0,927
Dsi + Arg + Gsi + Φ	0,932
$C_c = - 3,41 + 0,48(Dsi) + 0,01(Gsi) - 0,002(\Phi) + 0,03 (Arg)$	
Gsi	0,211
Gsi + Dsi	0,247
Gsi + Dsi + Arg	0,309
$\sigma_p = 931,74 + 696,5(Dsi) - 11,38(Gsi) - 17,43(Arg)$	
Gsi > 60 %	
Gsi	0,431
Gsi + Arg	0,621
Gsi + Arg + Dsi	0,652
Gsi + Arg + Dsi + Coe	0,661
$C_c = - 0,33 - 0,24(Dsi) + 0,01(Gsi) - 0,0007 (Coe) - 0,012(Arg)$	
Dsi	0,506
Dsi + Φ	0,546
Dsi + Φ + Gsi	0,570
Dsi + Φ + Gsi + Coe	0,575
$\sigma_p = - 1459,23 + 1304,88(Dsi) - 3,51(Gsi) + 0,53(Coe) + 6,88(\Phi)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões matriciais de água de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.

Anexo 6. Valores de “R²” de regressões e equações de predições para parâmetros de compressibilidade (σ_p e C_c), para os dados conjuntos do LV e LVd, em três classes de graus de saturação inicial de água (Gsi), obtidas com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 300 kPa.

Atributos	R ²
Gsi < 30 %	
Dsi	0,36
Dsi + Gsi	0,54
Dsi + Gsi + Φ	0,65
Dsi + Gsi + Φ + Coe	0,90
$C_c = - 0,87 + 2,16(Dsi) - 0,03(Gsi) - 0,02 (Coe) - 0,03(\Phi)$	
Gsi	0,34
Gsi + Φ	0,58
Gsi + Φ + Arg	0,68
Gsi + Φ + Arg + Dsi	0,76
$\sigma_p = - 448,19 - 418,56(Dsi) + 9,03(Gsi) + 8,05(\Phi) + 12,25(Arg)$	
Gsi 30 – 60 %	
Dsi	0,656
Dsi + Arg	0,660
$C_c = - 1,60 + 1,01(Dsi) - 0,003(Arg)$	
Dsi	0,52
Dsi + Arg	0,56
Dsi + Arg + Gsi	0,58
Dsi + Arg + Gsi + Coe	0,59
Dsi + Arg + Gsi + Coe + Φ	0,60
$\sigma_p = - 861,02 + 594,15(Dsi) - 3,02(Gsi) + 1,27(Coe) + 2,83(\Phi) + 7,5(Arg)$	
Gsi > 60 %	
Gsi	0,441
Gsi + Arg	0,617
Gsi + Arg + Dsi	0,629
Gsi + Arg + Dsi + Coe	0,631
$C_c = - 0,33 - 0,15(Dsi) + 0,01(Gsi) - 0,0003 (Coe) - 0,011(Arg)$	
Dsi	0,266
Dsi + Gsi	0,298
Dsi + Gsi + Arg	0,327
Dsi + Gsi + Arg + Φ	0,346
Dsi + Gsi + Arg + Φ + Coe	0,354
$\sigma_p = - 1293,82 + 1119,22(Dsi) - 5,4(Gsi) - 0,63(Coe) + 3,9(\Phi) + 5,58(Arg)$	

As regressões foram realizadas com dados obtidos em amostras equilibradas nas tensões matriciais de água de 33 e 300 kPa, totalizando 207 ensaios.