

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**COMPACTAÇÃO DE DOIS ARGISSOLOS NA
COLHEITA FLORESTAL DE *Pinus taeda* L.**

TESE DE DOUTORADO

Nirlene Fernandes Cechin

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**COMPACTAÇÃO DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA
FLORESTAL DE *Pinus taeda* L.**

por

Nirlene Fernandes Cechin

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração
em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2007

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

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

**COMPACTAÇÃO DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA
FLORESTAL DE *Pinus taeda* L.**

elaborada por
Nirlene Fernandes Cechin

**Como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal**

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Dalvan José Reinert, Dr.
(Presidente/Orientador)**

Cláudia L. R. de Lima, Dr^a. (UFPel)

José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)

Frederico Dimas Fleig, Dr. (UFSM)

Clóvis Roberto Haselein, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 31 de Julho de 2007.

Dedico

Aos meus pais Abílio (*in memorian*) e Idalina (*in memorian*) pelo amor e incentivo em todos os momentos da minha vida e pela minha formação pessoal e profissional.

Ofereço

Ao meu esposo Fábio Luiz, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, me apoiando, incentivando, transmitindo amor, carinho e amizade. A minha amada filha Letícia, por todo o carinho e amor transmitidos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela companhia constante e por ter colocado em meu caminho pessoas tão especiais.

Ao professor Dalvan José Reinert, pela transmissão de conhecimentos, pela orientação e compreensão durante a realização deste trabalho.

A Rigesa - Soluções em Embalagens Mead Westvaco, pelo incentivo à pesquisa. Em especial ao Diretor Geral da Unidade Florestal Etsuro Murakami, pela oportunidade e disponibilidade da estrutura e dos recursos técnicos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Ao Gerente de Silvicultura Gerson Bridi, ao Encarregado de Preparo de Solos Vanderlei Missel, ao Gerente Geral de Pesquisa e Tecnologia Ricardo Gonçalves, ao Gerente de Manutenção Mecânica Ronaldo Murakami e aos funcionários da colheita florestal da empresa, por toda a colaboração e informações prestadas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, por todo o conhecimento transmitido durante a realização do curso. Em especial aos professores César Augusto Guimarães Finger e Paulo Renato Schneider pela disponibilidade de informações.

Aos professores José Miguel Reichert, Frederico Dimas Fleig, Clóvis Roberto Haselein e a Engenheira Agrícola Cláudia Liane Rodrigues de Lima pela colaboração e informações recebidas.

Aos amigos Cibele Gracioli, Magda Zanon e Lorenzo da Silva, pelo apoio, amizade e momentos de descontração.

Aos colegas Luís Eduardo Suzuki e Maurício Kunz, pela amizade, colaboração na coleta de dados e informações recebidas.

Aos colegas do Laboratório de Física dos Solos, especialmente à David da Rosa, Paulo Gubiani, Fabiano Braga e Marcelo Mentges pela amizade, colaboração e troca de informações.

A secretária do PPGEF Tita pela amizade, apoio e colaboração prestada durante a realização do curso.

Ao funcionário da Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais, da UFSM, Luiz Marchiotti Fernandes.

Aos meus irmãos e minhas irmãs, pelo apoio e pelo carinho recebido em um momento tão difícil de nossas vidas.

A minha irmã Eliane e a minha cunhada Jane, por todo o carinho e cooperação recebidos.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e à Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade da qualificação.

Aos velhos e novos amigos que reencontrei e encontrei nesta caminhada.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram par a realização deste trabalho.

Muito obrigada.

“Morrer ignorante, sabendo que poderia ter sido
sábio, isso sim é a verdadeira tragédia humana.”

(Shakespeare)

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

COMPACTAÇÃO DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA FLORESTAL DE *Pinus taeda* L.

AUTORA: Nirlene Fernandes Cechin

ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

Data e Local de Defesa: Santa Maria, 31 de julho de 2007

O conhecimento dos procedimentos envolvidos na colheita florestal, bem como os danos provocados pelo sistema de colheita é importante para se realizar um manejo adequado no solo, melhorar a produção de madeira e reduzir a degradação do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência das diferentes operações da colheita florestal nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho Distrófico típico e um Argissolo Vermelho Distrófico abráptico, considerando que o tráfego das máquinas, geralmente, resulta em impactos no ecossistema, de forma a influenciar a compactação do solo e a produtividade da floresta. A pesquisa foi realizada em áreas sob floresta comercial de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade. Os tratamentos, constituídos pelas diferentes etapas da colheita florestal foram: antes da colheita florestal; após o corte das árvores; após o arraste com uma passada do *skidder*; após o arraste com três passadas do *skidder* e após a retirada da madeira do estaleiro. Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40m para determinação da densidade, da microporosidade, da macroporosidade, da porosidade total, da umidade gravimétrica e da condutividade hidráulica do solo saturado. A resistência do solo à penetração foi avaliada até 0,50m de profundidade. No estudo do comportamento compressivo do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada nas camadas de 0,025-0,05m e de 0,10-0,125m,

determinando-se a densidade do solo antes e ao final do teste de compressão uniaxial, a deformação ao final do teste, a umidade gravimétrica e grau de saturação antes do teste de compressão e a pressão de preconsolidação e índice de compressão. Os resultados obtidos indicam que no PVd típico, a densidade do solo apresentou maior redução após três passadas do *skidder*, fato relacionado à sobreposição das passadas e a pressão exercida pela máquina sobre o solo na atividade de arraste da madeira. O solo apresentou os maiores valores de resistência à penetração mecânica, indicando a maior degradação devido à colheita florestal. Após três passadas do *skidder* a compactação ocorreu com maior intensidade na superfície do solo e essa apresentou uma distribuição uniforme nas camadas do perfil. Antes da colheita, após o corte florestal, após uma passada do *skidder* e após a retirada da madeira do estaleiro a compactação ocorreu mais no sentido vertical. Considerando a deformação do solo e o índice de compressão, o solo deve ser trafegado com grau de saturação de 65 a 69%, para evitar maiores deformações e reduzir a suscetibilidade à compactação. No Argissolo Vermelho Distrófico abrupto a compactação do solo ocorreu em menor intensidade. Tal fato foi comprovado pela menor resistência do solo à penetração mecânica, relacionada a uma menor compactação do solo. A condutividade hidráulica do solo foi o parâmetro que melhor expressou a compactação dos Argissolos.

Palavra-chave: Compactação, Grau de saturação, Compressibilidade, Resistência à penetração.

ABSTRACT

Doctor's Thesis
Post-Graduate Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

COMPACTION OF TWO ALFISOLS IN THE FOREST HARVEST OF *Pinus taeda* L.

AUTHOR: Nirlene Fernandes Cechin

ADVISER: Dalvan José Reinert

Date and Place of the Defense: Santa Maria, 31th July, 2007

The knowledge of soil damage due forest harvest is important for adequate management of soil physical conditions, to increase wood yield and decrease soil degradation. This study evaluates the influence of different operations of forest harvest on the soil physical properties of a typical Hapludalf and an abrupt Hapludalf. The research was realized in areas under 17 years old commercial forest of *Pinus taeda*. The soil physical properties were evaluated before and after the forest harvest. The treatments, constituted by the different operations of Pinus harvest were as following: before the harvest; after trees cut; after wood dragging with one pass of the skidder; after wood dragging with three passes of the skidder and after removing the wood from storing place (piles). Undisturbed soil samples were taken from layers of 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.40m to determine bulk density, microporosity, macroporosity, total porosity, gravimetric soil moisture and saturated hydraulic conductivity. Soil resistance to penetration was evaluated either. To evaluate compressive behavior of soil, undisturbed soil samples were taken from layers of 0.025-0.05m and 0.10-0.125m to determine the bulk density before and after the uniaxial compression test; soil deformation after the test; gravimetric moisture and degree of saturation of soil before the test. The precompression stress and compression index were obtained from compression curves. The soil bulk density of the typic Hapludalf presented biggest reduction after three passes of the skidder, due the superposition of the tractor passes and its pressure during wood dragging. The soil resistance to penetration had the biggest values, indicating the

biggest degradation due to the forest harvest. After three steps of the skidder the compaction took place with bigger intensity in the soil surface and that had a uniform distribution in the layers of the soil profile. Before the harvest, after the forest cut, after one step of the skidder and after the wood retreat from shipyard the compaction took place more in the vertical direction. Considering the larger deformations and compression index, the soil should be trafficked with degree of saturation of 65 to 69% to avoid larger deformations and reduce susceptibility of soil to compaction. In the abrupt Hapludalf the soil compaction was smaller. Such a fact was indicated by smaller soil resistance to the mechanical penetration, which indicates a less degree of compaction. The soil saturated hydraulic conductivity was the parameter that better expressed the compaction of the Alfisols.

Key-words: compaction; degree of saturation; compressibility; soil penetration resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escavadeira Caterpillar 320 com cabeçote de <i>Feller</i> de Disco direcional.....	32
Figura 2 - <i>Grapple Skidder</i> Caterpillar 525 com garra.....	32
Figura 3 - Escavadeira de esteiras Caterpillar 320 com cabeçote processador Valmet 380.....	33
Figura 4 - Escavadeira de esteiras Caterpillar 312 com grua J. de Souza.....	33
Figura 5 – Relações entre a densidade do solo e a porosidade total (a) ; densidade do solo e a macroporosidade (b) ; densidade do solo e a condutividade hidráulica (c) ; macroporosidade e a condutividade hidráulica (d) do PVd típico.....	55
Figura 6 – Relações entre a densidade do solo e a porosidade total (a) ; densidade do solo e a macroporosidade (b) ; densidade do solo e a condutividade hidráulica (c) ; macroporosidade e a condutividade hidráulica (d) do PVd abrupto.....	57
Figura 7 - Valores de resistência à penetração do PVd típico (a) antes da colheita; (b) após o corte florestal; (c) após uma passada do <i>skidder</i> ; (d) após três passadas do <i>skidder</i> ; (e) após a retirada da madeira do estaleiro.....	70
Figura 8 - Valores de resistência à penetração do PVd abrupto (a) antes da colheita; (b) após o corte florestal; (c) após uma passada do <i>skidder</i> ; (d) após três passadas do <i>skidder</i> ; (e) após a retirada da madeira do estaleiro.....	74
Figura 9 – Distribuição das tensões sob uma roda e uma esteira.....	80
Figura 10 – Prensa uniaxial - consolidômetro modelo S-450 <i>Terraload</i>	88
Figura 11 - Valores médios da densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (D_{sf}) (a) ; deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) (b) ; pressão de pré-consolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (C_c) (d) em função das classes de grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial do PVd típico (Classes de G_{si} : 1 = < 34%; 2 = 35-39%; 3 = 40-44%; 4 = 45-49%; 5 = 50-54%; 6 = 55-59%; 7 = 60-64%; 8 = 65-69%; 9 = >70%).....	101
Figura 12 - Valores médios da densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (D_{sf}) (a) ; deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) (b) ; pressão de preconsolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (C_c) (d) em função das classes de grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial do PVd abrupto (Classes de G_{si} : 1 = < 34%; 2 = 35-39%; 3 = 40-44%; 4 = 45-49%; 5 = 50-54%; 6 = 55-59%; 7 = 60-64%; 8 = 65-69%; 9 = >70%).....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações dos solos e características dendrométricas do <i>Pinus taeda</i>	30
Tabela 2 - Características das máquinas e dos equipamentos florestais.....	31
Tabela 3 - Análise granulométrica das camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m dos Argissolos.	36
Tabela 4 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade, da condutividade hidráulica e da umidade gravimétrica do PVd típico.....	37
Tabela 5 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade do PVd típico.....	38
Tabela 6 - Diferença percentual da densidade (Mg m^{-3}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.....	38
Tabela 7 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.	41
Tabela 8 - Diferença percentual da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.....	44
Tabela 9 - Condutividade hidráulica (mm h^{-1}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.....	45
Tabela 10 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade, da condutividade hidráulica e da umidade gravimétrica do PVd abruptico.....	46
Tabela 11 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade do PVd abruptico.....	46
Tabela 12 - Diferença percentual da densidade (Mg m^{-3}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.....	48
Tabela 13 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.....	49
Tabela 14 - Diferença percentual da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.....	51
Tabela 15 - Condutividade hidráulica (mm h^{-1}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.....	52
Tabela 16- Percentual dos componentes da manta de serapilheira sobre o PVd típico e sobre o PVd abruptico.....	85
Tabela 17 - Pressões que as máquinas da colheita florestal exercem sobre os Argissolos.....	86
Tabela 18 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade inicial, da densidade final e da deformação do PVd típico.....	89

Tabela 19 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão para o PVd típico.....	90
Tabela 20 - Valores da densidade inicial, da densidade final, da deformação do solo, da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão do PVd típico.....	91
Tabela 21 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade inicial, da densidade final e da deformação do PVd abrupto.....	94
Tabela 22 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão do PVd abrupto.....	95
Tabela 23 - Valores da densidade inicial, da densidade final, da deformação do solo, da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão do PVd abrupto.....	96
Tabela 24 - Valores de F, significância, coeficiente de variação e diferença mínima significativa da densidade final, da deformação do solo, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão para as classes de grau de saturação do PVd típico.....	99
Tabela 25 - Valores de F, significância, coeficiente de variação e diferença mínima significativa da densidade final, da deformação do solo, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão para as classes de grau de saturação do PVd abrupto.....	102
TABELA 26 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	113
TABELA 27 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	114
TABELA 28 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	115
TABELA 29 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	116
TABELA 30 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	117
TABELA 31 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	118
TABELA 32 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	119
TABELA 33 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	120
TABELA 34 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	121

TABELA 35 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	122
TABELA 36 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal	123
TABELA 37 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal	124
TABELA 38 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	125
TABELA 39 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal	126
TABELA 40 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	127
TABELA 41 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal	128
TABELA 42 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	129
TABELA 43 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto	130
TABELA 44 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	131
TABELA 45 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal	132
TABELA 46 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	133
TABELA 47 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal	134
TABELA 48 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal	135
TABELA 49 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m - Metro

mm - Milímetro

°C – Graus Celsius

ha - Hectare

m²/ha – Metro quadrado por hectare

cm - Centímetro

m³ - Metro cúbico

m³/ha - Metro cúbico por hectare

ton/ha - Tonelada por hectare

kW - Kilowatts

” - Polegada(s)

L - Libra

rpm - Rotação por minuto

ml - mililitros

NaOH – Hidróxido de sódio

g - Grama(s)

% - Percentual

MPa – Mega Pascal

> - Maior

Kgf – Kilograma força

PVd típico - Argissolo Vermelho Distrófico típico

PVd abruptico - Argissolo Vermelho Distrófico abruptico

SAS - Sistema de análise estatística (*Statistical Analysis System*)

DMS - Diferença mínima significativa

F - Valor de F calculado

CV - Causa de variação (%)

CP - Cone Penetrometer

Ds - Densidade do solo (Mg m⁻³)

K_{0s} - Condutividade hidráulica do solo (mm h⁻¹)

Ug - Umidade gravimétrica do solo (kg kg⁻¹)

Pt - Porosidade total do solo (m³ m⁻³)

Mac - Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Mic - Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

RP - Resistência do solo à penetração mecânica (kPa)

Dsi - Densidade inicial do solo antes do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3})

Dsf - Densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3})

Def - Deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (cm)

Ugi - Umidade gravimétrica do solo antes do teste de compressão uniaxial (kg kg^{-1})

Gsi - Grau de saturação do solo antes do teste de compressão uniaxial (%)

σ_p - Pressão de preconsolidação do solo (kPa)

Cc - Índice de compressão do solo

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRAC

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	21
2 HIPÓTESES.....	23
3 OBJETIVO GERAL.....	24
4 CAPÍTULO I CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA FLORESTAL	25
4.1 Introdução	25
4.2 Objetivos	28
4.3 Material e Métodos	29
4.3.1 Localização e características climáticas do local.....	29
4.3.2 Solos, relevo e variáveis dendrométricas.....	29
4.3.3 Máquinas e equipamentos da colheita florestal	30
4.3.4 Coleta das amostras de solo.....	34
4.3.5 Características físicas do solo.....	35
4.3.6 Análise estatística.....	36
4.4 Resultados e Discussão	38
4.4.1 Argissolo Vermelho Distrófico típico.....	38
4.4.1.1 Densidade do solo.....	38
4.4.1.2 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade	40
4.4.1.3 Umidade gravimétrica.....	43
4.4.1.4 Condutividade hidráulica.....	44
4.4.2 Argissolo Vermelho Distrófico abruptico.....	45
4.4.2.1 Densidade do solo.....	47
4.4.2.2 Porosidade Total, macroporosidade e microporosidade.....	48
4.4.2.3 Umidade gravimétrica.....	50
4.4.2.4 Condutividade hidráulica.....	51

4.4.3 Relação entre os atributos físicos do Argissolo Vermelho Distrófico típico.....	53
4.4.4 Relação entre os atributos físicos do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.....	56
4.5 Conclusões	58
4.6 Bibliografia Citada	58
5 CAPÍTULO II - A INFLUÊNCIA DA COLHEITA FLORESTAL NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO MECÂNICA DE DOIS ARGISSOLOS	65
5.1 Introdução	65
5.2 Ojetivos	68
5.3 Material e Métodos	68
5.3.1 Solos estudados.....	68
5.3.2 Resistência do solo à penetração.....	68
5.4 Resultados e Discussão	69
5.4.1 Resistência à penetração do Argissolo Vermelho Distrófico típico....	69
5.4.2 Resistência à penetração do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.....	73
5.5 Conclusões	75
5.6 Bibliografia Citada	75
6 CAPÍTULO III - COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA FLORESTAL.....	79
6.1 Introdução	80
6.2 Objetivos	83
6.3 Material e Métodos	83
6.3.1 Localização e características climáticas das áreas.....	83
6.3.2 Coleta das amostras de solo.....	84
6.3.3 Composição da serapilheira sobre os Argissolos.....	85
6.3.4 Cálculo da pressão das máquinas sobre o solo.....	86
6.3.5 Teste de compressão uniaxial.....	86
6.3.6 Análise estatística.....	88
6.4 Resultados e Discussão	89
6.4.1 Comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico típico.....	89

6.4.2 Comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.....	94
6.4.3 Grau de saturação do Argissolo Vermelho Distrófico típico.....	98
6.4.4 Grau de saturação do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.....	102
6.5 Conclusões	105
6.6 Bibliografia Citada	105
7 CONCLUSÃO GERAL.....	110
8 SUGESTÕES.....	111
APÊNDICES.....	112

1 INTRODUÇÃO GERAL

O *Pinus taeda*, introduzido no Brasil em 1948, através do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, se destaca por apresentar facilidade nos tratos culturais e rápido crescimento, abrangendo um milhão de hectares no planalto da Região Sul do Brasil (SHIMIZU, 2005),

O *Pinus taeda* se desenvolve adequadamente nas regiões com clima ameno e inverno frio, em solo bem drenado, sem déficit hídrico, incluindo localidades como as partes serranas do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e do Paraná, e áreas mais chuvosas do sul dos estados de São Paulo e de Minas Gerais (EMBRAPA, 2005).

Segundo Barrichelo *et al.* (1977), a madeira do *Pinus* é considerada uma importante fonte de matéria-prima para fabricação de produtos manufaturados. É utilizado na produção de celulose, de papel, de madeira serrada, de chapas e de madeira reconstituída.

O desenvolvimento industrial gerou uma crescente busca por produtos florestais, uma vez que a madeira é considerada a principal fonte de matéria-prima para atender os vários processos produtivos. De acordo com Seixas (1998), a mecanização das atividades de colheita e de transporte florestal é importante no fornecimento da matéria-prima para as indústrias do setor. Um dos obstáculos, para que o desenvolvimento florestal sustentável seja alcançado, está relacionado ao trânsito de máquinas durante a realização das atividades de colheita e de transporte florestal.

Os solos florestais vêm sofrendo alterações originadas pela compactação, devido ao tráfego das máquinas utilizadas na colheita de madeira. De acordo com Imhoff (2002), a intensidade do solo em resistir à deformação, sua capacidade para fornecer adequada aeração e água necessária para o crescimento das plantas, bem como a expansão do sistema radicular são indicadores da qualidade física do solo e que têm influência direta na produção das culturas.

As propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural, utilizadas para quantificar os impactos causados pelo uso e pelo manejo do solo são: a compactação do solo (HAKANSSON; VOORHEES; RILEY, 1988), a

resistência do solo à penetração (TORMENA; ROLOFF, 1996; BEUTLER *et al*, 2001), a densidade (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999), a porosidade total e o tamanho e a continuidade dos poros do solo (BEUTLER *et al*, 2001; OLIVEIRA *et al*, 2001).

Para Silva *et al*. 2002, a compactação do solo ocorre devido à ação das forças externas e pela redução do seu espaço poroso. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo de manejo (CAMARGO E ALLEONI, 1997), pela intensidade e frequência da carga aplicada (DIAS JUNIOR *et al*, 1999). Os fatores internos estão relacionados com o histórico da tensão (HORN e LEBERT, 1994), com a umidade (DIAS JUNIOR *et al*, 1994), com a textura (HORN e LEBERT, 1994), com a estrutura (HORN e LEBERT, 1994) e com a densidade inicial do solo (ASSOULINE, TAVARES FILHO e TESSIER, 1997).

A compactação é um processo onde ocorre um aumento na densidade, com conseqüente incremento da resistência do solo à penetração, havendo uma redução na porosidade, na continuidade de poros, na permeabilidade e na disponibilidade de nutrientes e de água. Esse processo reduz o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas e diminui a macroporosidade do solo (SOANE E OUWERKERK, 1994).

Os princípios de preservação dos recursos naturais induzem as empresas do setor florestal a demonstrarem interesse na identificação, na quantificação e na minimização das conseqüências de suas atividades sobre o meio ambiente. A realização de estudos que objetivem quantificar os efeitos das operações envolvidas na colheita florestal, em diferentes classes de solos, tem a finalidade de orientar o planejamento das atividades mecanizadas nas empresas, com o intuito de evitar a ocorrência da compactação.

2 HIPÓTESES

As atividades mecanizadas originadas pelo corte florestal, pelo arraste das árvores após uma e após três passadas da máquina e o estaleiramento da madeira, compactam o solo.

Estas atividades afetam a densidade do solo, a umidade gravimétrica, a condutividade hidráulica, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a resistência do solo à penetração e o comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico típico e do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.

3 OBJETIVO GERAL

Determinar a compactação de um Argissolo Vermelho Distrófico típico e de um Argissolo Vermelho Distrófico abrupto, a partir da avaliação das propriedades físicas do solo antes e após a colheita florestal mecanizada em um povoamento de *Pinus taeda* L.

4 CAPÍTULO I

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA FLORESTAL

4.1 Introdução

O solo, em condições inadequadas de umidade sofre compactação devido ao tráfego intenso, ao peso das máquinas, dos equipamentos e da carga transportada. A compressão do solo ocasiona alterações na estrutura física, como o aumento na densidade e a diminuição no número de poros, de tal forma a comprometer a produção de madeira nas áreas de reflorestamento.

A mecanização das atividades da colheita florestal é necessária para prover as necessidades das indústrias do setor, estando presente nos processos de produção, na colheita de madeira e no transporte florestal (DIAS JUNIOR *et al.*, 1999).

Lira Filho (1992) menciona que a compactação é uma das mais conseqüências da colheita florestal. De acordo com OLIVEIRA JÚNIOR E SOUZA, (1998), a intensificação da mecanização nas atividades de colheita florestal ocasiona a compactação do solo, reduzindo a produtividade da floresta e aumentando os níveis de erosão. Um decréscimo na produtividade dos solos compactados é, em parte, o resultado do aumento da densidade aparente do solo, do decréscimo da aeração, da alteração das características de retenção de umidade e do aumento da resistência à penetração.

O solo serve como um meio natural para o crescimento e para o desenvolvimento das plantas. A disponibilidade de água, a difusividade do oxigênio, a temperatura e a resistência mecânica são consideradas fatores que afetam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, enquanto que a densidade, a granulometria, a agregação e a estabilidade dos agregados, o tamanho e a distribuição de poros têm um efeito indireto no crescimento delas. O crescimento e o desenvolvimento das plantas dependem da água e dos nutrientes presentes no

solo, bem como da disponibilidade de oxigênio para a respiração das raízes (LETEY, 1985).

A utilização sustentável do solo, em povoamentos florestais, está relacionada ao tráfego de veículos durante as atividades, principalmente de colheita e extração da madeira (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005), que têm por finalidade abastecer fábricas de produção de celulose durante o ano.

O aumento da densidade nas trilhas de tráfego das máquinas florestais está relacionado com o número de passadas, onde o efeito do tráfego dos tratores sobre o solo é maior nas primeiras passadas. Para Seixas (2000), os tipos de máquinas e dos rodados utilizadas nos sistemas de colheita, o teor de matéria orgânica, a carga dinâmica e as pressões internas dos pneus também afetam a densidade, dependendo do tipo de solo.

Kondo e Dias Júnior (1999) consideram que o sistema de manejo altera as propriedades físicas e mecânicas do solo em diferentes níveis de compactação, em função da umidade, dos diferentes tipos de solos e da época de realização das operações mecanizadas.

Um dos problemas no manejo das máquinas florestais consiste em decidir quando as operações mecanizadas de colheita e o preparo devem ser realizados, levando em consideração a umidade do solo. Dias Júnior (2000), enfatiza que a umidade é um fator que determina a capacidade de suporte de carga do solo.

Seixas, Oliveira e Souza (1998) verificaram a compactação do solo devido ao tráfego de colheita de madeira nos módulos *harvester* e *forwarder*, *feller buncher* e *skidder*. Os testes realizados, durante a época chuvosa, apresentaram resultados com maior compactação do solo, em termos de incremento em relação à condição inicial, refletindo a influência da umidade do solo em termos de rearranjo das partículas. O *feller buncher* e o *skidder* não apresentaram níveis críticos de compactação ao trafegarem em solo de textura arenosa.

Segundo Azevedo e Dalmolin (2003), a taxa de infiltração da água no solo é a propriedade que melhor caracteriza suas condições físicas, suas qualidades e sua estabilidade estrutural.

De acordo com Mantovani (1987), quanto maior o teor de água, maior será a compactação do solo, sendo que a umidade mais crítica a favorecer a compactação corresponde à faixa próxima da capacidade de campo.

De acordo com Seixas (1996), os solos arenosos são aqueles de alta permeabilidade ou infiltração. São, portanto, os que não possuem boa capacidade de armazenamento de água. Os solos argilosos são caracterizados como de baixa permeabilidade e alta capacidade de armazenamento de água. Esses solos apresentam propriedades de expansão, quando úmidos, e contração, quando secos. Os solos siltosos, por sua vez, apresentam características intermediárias, aproximando-se muito dos argilosos em termos de retenção de água.

A porosidade depende do teor de matéria orgânica. Como o teor de matéria orgânica decresce em profundidade, associado ao maior grau de empacotamento das partículas, a tendência é uma diminuição na porosidade total do solo com o aumento em profundidade (AZEVEDO e DALMOLIN, 2003).

Das propriedades físicas do solo que estão sujeitas às alterações pelo cultivo, a porosidade total, por estar relacionada ao volume e à distribuição dos espaços porosos, merece especial atenção, visto que, nesses espaços, processam-se os principais fenômenos que regulam o crescimento e a produção vegetal (GROHMAN, 1972).

Mantovani (1987) enfatiza que o melhor método, para determinar a compactação do solo, é a determinação de sua densidade. Porém, é a porosidade que representa o parâmetro mais significativo para ser utilizado na discussão da compactação, em função da descrição direta da proporção de volume do solo disponível para as raízes das plantas, da água e do ar que elas requerem.

Em um determinado solo, a distribuição do tamanho de poros será função tanto da textura quanto da estrutura. Diferentes tipos de solos apresentam comportamentos distintos quando submetidos à compactação, por possuírem características diferentes, como a granulometria, o teor de matéria orgânica e a umidade. De maneira geral, ao aumentar o nível de compactação, há um aumento no volume dos microporos e uma conseqüente diminuição nos macroporos (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2000).

Por diminuir a macroporosidade, devido à compactação do solo, a água fica retida nos microporos sob maiores tensões, podendo estar indisponível para as plantas (KERTZMANN, 1996).

A compactação restringe a quantidade de macroporos (espaço poroso responsável pela aeração do solo) e aumenta a proporção de microporos,

diminuindo a taxa de difusão de oxigênio através do solo e aumenta o armazenamento de água (MUROSKI e HASSAN, 1991).

A compactação depende da resistência mecânica do solo, que é influenciada pelas propriedades inerentes ao solo como a textura e o conteúdo de matéria orgânica (LARSON, GUPTA e USECE, 1980), a estrutura (HORN E LEBERT, 1994) e o conteúdo de água (GUÉRIF, 1984). Depende do carregamento do veículo, que está relacionado à grandeza da carga axial, às dimensões e as pressões dos pneus, à velocidade e à interação solo-pneu (LEBERT, BURGER, e HORN, 1989).

Reinert (1990) enfatiza a importância de conhecer o histórico de tensão do solo no processo de compactação.

O comportamento da compactação devido o tráfego das máquinas no solo está sendo estudado com frequência no setor agrícola. Porém, no setor florestal são poucas as pesquisas que abordam o assunto. Para Greacen e Sands (1980), os danos ocasionados pela compactação em solos florestais diferem dos ocorridos nas áreas agrícolas, devido à espécie, ao ciclo das culturas e as máquinas utilizadas. Segundo os autores, tanto o peso das máquinas de colheita como o peso das árvores, são fatores que contribuem para o aumento da compactação.

Avaliar a intensidade e a ocorrência da compactação e os limites críticos da porosidade, da densidade e da resistência do solo à penetração, que possam vir a afetar o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento das culturas possibilitam uma ação mais consciente em relação ao manejo do solo (SUZUKI, 2005).

4.2 Objetivos

Determinar o impacto provocado pela colheita florestal mecanizada na compactação de dois Argissolos, a partir da avaliação da densidade, da porosidade total, da umidade gravimétrica e da condutividade hidráulica do solo.

4.3 Material e Métodos

4.3.1 Localização e características climáticas do local

A pesquisa foi realizada em áreas de floresta comercial de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade, pertencentes à Empresa Rigesa Celulose, Papel e Embalagens Ltda., localizada no Município de Três Barras, Santa Catarina, entre os paralelos 26°07' S de latitude e 50°19' W de longitude e a 770 m de altitude. O clima característico da região é o Cfb (Köppen), com precipitação média anual de aproximadamente 1429,29 mm, e temperatura média anual em torno de 19,3°C.

4.3.2 Solos, relevo e variáveis dendrométricas

Os solos das áreas de estudo são classificados como um Argissolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa, A proeminente, álico e um Argissolo Vermelho Distrófico abrupício de textura areno/argilosa, A moderado, álico, caulínítico, hipoférrico.

As coletas das amostras de solos foram realizadas em povoamentos florestais de terreno plano e sem a presença de sub-bosque no local.

Os dados das áreas de estudo e das características dendrométricas dos povoamentos de *Pinus taeda* estão apresentados na Tabela 1. O talhão 111, que está localizado na região 13 da Fazenda Canivete, possui um solo caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico abrupício. O talhão 13, localizado na região 50 da fazenda Terra Vermelha possui um solo que é caracterizado como um Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Tabela 1 – Informações dos solos e características dendrométricas do *Pinus taeda*.

Referência	PVd abruptico	PVd típico
Região	13	50
Talhão	11	13
Área do talhão (ha)	34,5	48,4
Atributos	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i>
Idade de corte (anos)	17	17
Área Basal (m ² /ha)	67,72	71,30
Árvores/ha	1401	1255
Diâmetro médio (cm)	24,8	26,9
Altura média (m)	24,37	26,66
Volume médio por árvore (m ³)	0,5129	0,6536
Volume médio total (m ³ /ha)	718,55	820,33
Peso total (ton/ha)	688,98	793,83

PVd abruptico= Argissolo Vermelho Distrófico abruptico; PVd típico= Argissolo Vermelho Distrófico típico.

4.3.3 Máquinas e equipamentos da colheita florestal

A empresa utiliza o sistema de colheita florestal de "Árvores Inteiras" ou *Full Tree System*. Nesse sistema, as árvores são removidas para fora do talhão com a parte aérea completa e são depositadas nas margens das estradas florestais, onde posteriormente, serão realizados o processamento e o carregamento da madeira nos caminhões.

A Tabela 2 apresenta as características das máquinas e dos equipamentos que compõem o módulo de colheita florestal da empresa.

Tabela 2 – Características das máquinas e dos equipamentos florestais.

Máquinas e Equipamentos Florestais
- Corte das árvores Máquina: Escavadeira Caterpillar 320 - motor ATAAC Caterpillar (Diesel), potência nominal de 95,5 kW, esteiras vedadas, lubrificadas com graxa e sapatas com 43 seções. Equipamento: cabeçote de Feller de Disco direcional – cabeçote de 33", realiza o corte e o empilhamento das árvores.
- Arraste das árvores Máquina: Skidder Caterpillar 525 - trator florestal articulado, potência nominal de 168 Kw, tração e bloqueio nas quatro rodas, pneu florestal Firestone 28 L e correntes Rud-sul nos pneus traseiros. Equipamento: garra (<i>Grapple</i>) - realiza o arraste dos feixes de árvores inteiras do interior do talhão até a beira da estrada, por uma distância média de 200 metros. Posteriormente, faz o empilhamento das árvores, formando o estaleiro.
- Processamento das árvores Máquina: Escavadeira Caterpillar 320 - esteiras vedadas, lubrificadas com graxa e sapatas com 43 seções. Equipamento: cabeçote Valmet 380 - no estaleiro realiza o processamento, que consiste no desganhamento e no traçamento das árvores.
- Carregamento das toras Máquina base - Escavadeira Caterpillar 312 - motor ATAAC Caterpillar (Diesel), potência nominal de 106 Kw, esteiras vedadas, lubrificadas com graxa e sapatas com 49 seções. Equipamento: grua hidráulica configuração <i>Slasher</i> (J. de Souza) - acionamento hidráulico, alcance médio de 7,5 m. No estaleiro realiza o carregamento das toras nos caminhos.



Figura 1 - Escavadeira Caterpillar 320 com cabeçote de *Feller* de Disco direcional.



Figura 2 - *Grapple Skidder* Caterpillar 525 com garra.



Figura 3 - Escavadeira de esteiras Caterpillar 320 com cabeçote processador Valmet 380.



Figura 4 - Escavadeira de esteiras Caterpillar 312 com grua J. de Souza.

4.3.4 Coleta das amostras de solo

As coletas das amostras de solos, antes e após a colheita florestal, para a determinação da densidade, da umidade gravimétrica, da porosidade total, da macroporosidade, da microporosidade e da condutividade hidráulica, foram realizadas no segundo semestre de 2005. Os solos das áreas onde foram coletadas as amostras apresentavam texturas diferentes. Na fazenda Canivete, o talhão 111, da região 13, é caracterizado como um Argissolo Vermelho Distrófico abruptico e na fazenda Terra Vermelha, o solo do talhão 13, da região 50 como um Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Em cada talhão onde foi realizado o estudo, antes da colheita florestal foram distribuídas seis parcelas ao acaso, com um espaçamento de 5 metros, com a finalidade de diminuir a variabilidade natural do solo. As parcelas foram distribuídas em relação às linhas de plantio das árvores, nos locais onde posteriormente ocorreria o tráfego das máquinas utilizadas na colheita do *Pinus taeda* L.

Nas parcelas foram abertas trincheiras, por meio da utilização de uma pá de corte. No horizonte A foram coletadas amostras de solos com estrutura preservada, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, por meio da utilização de cilindros metálicos (5,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro), de um cilindro extrator e de um martelo pedológico. Com o auxílio de uma faca, realizou-se a extração das amostras e a retirada do excesso de solo dos cilindros. As amostras, identificadas, foram embaladas em sacos plásticos, para manter a umidade de campo.

Nas áreas onde foi realizado o corte das árvores foram abertas seis trincheiras para realizar a coleta de amostras. Nas áreas do arraste, do processamento e do carregamento das árvores foram abertas quatro trincheiras em cada local. As amostras de solo foram coletadas nas trilhas formadas devido ao tráfego das máquinas durante a realização dessas atividades.

As coletas das amostras de solos, antes e após as máquinas terem realizado o corte, o arraste, o processado e o carregamento de todo o volume de madeira que existia no povoamento florestal seguiu o ritmo normal de trabalho da empresa, sem que houvesse nenhuma interferência externa.

No estudo da compactação do Argissolo Vermelho Distrófico típico e do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto foram utilizados os seguintes tratamentos:

- ❖ AC= antes da colheita florestal;
- ❖ PC= após o corte das árvores;
- ❖ A1P= após o arraste das árvores com uma passada do *skidder*;
- ❖ A3P= após o arraste das árvores com três passadas do *skidder*;
- ❖ PE= após a retirada da madeira do estaleiro.

4.3.5 Características físicas do solo

No Laboratório de Física do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, as amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e, posteriormente, pesadas e levadas à mesa de tensão, onde foram submetidas a uma tensão de sucção de 6 kPa até o momento em que foi estabelecido o equilíbrio entre a água retida na amostra e a sucção aplicada. Após, realizaram-se novas pesagens nas amostras, e essas foram levadas para a estufa à temperatura entre 105-110⁰C. A seguir, foram feitas as determinações de densidade do solo, da microporosidade, da macroporosidade, da porosidade total e da umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997). A condutividade hidráulica do solo, saturado, foi determinada com o auxílio de permeâmetro de carga constante (Libardi, 2005).

As análises granulométricas do PVd típico e do PVd abrupto foram realizadas em laboratório, pela utilização do método da pipeta, de acordo com EMBRAPA (1997). Na determinação da classe textural dos Argissolos, utilizaram-se as médias de 2 repetições para cada profundidade.

Seguindo os métodos desenvolvidos por Suzuki *et al.* (2004a) e Suzuki *et al.* (2004b), a dispersão das amostras de solo foi realizada por meio de agitação horizontal, com 120 rpm, durante 4 horas. Utilizaram-se vidros de 100 mL contendo 20 g de solo peneirado em malha de 2 mm, 10 ml de NaOH 6% (dispersante químico), 50 ml de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 0,0171 m e densidade de 1,11 Mg m⁻³.

Tabela 3 - Análise granulométrica das camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m dos Argissolos.

Camada (m)	Areia		Silte	Argila
	Grossa	Fina		
	g kg ⁻¹			
PVd típico				
0,00-0,05	125	277	199	398
0,05-0,10	123	286	202	389
0,10-0,20	119	276	212	393
0,20-0,30	100	271	215	415
0,30-0,40	102	255	217	426
Média	114	273	209	404
PVd abruptico				
0,00-0,05	10	335	383	272
0,05-0,10	11	333	395	262
0,10-0,20	10	335	405	249
0,20-0,30	11	326	431	232
0,30-0,40	8	325	423	244
Média	10	331	407	252

4.3.6 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o programa computacional *Statistical Analysis System* (SAS). Nessa análise, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas, sendo que as sub-parcelas referem-se às profundidades, e as parcelas referem-se aos tratamentos: antes da colheita florestal (AC); após o corte das árvores (PC); após o arraste das árvores, com uma passada do *skidder* (A1P); após o arraste das árvores, com três passadas do *skidder* (A3P) e após a retirada da madeira do estaleiro (PE).

Em cada experimento, os resultados da densidade, da porosidade total, da macroporosidade, da microporosidade, da umidade gravimétrica e da condutividade hidráulica do solo foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pela diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade.

4.4 Resultados e Discussão

4.4.1 Argissolo Vermelho Distrófico típico

A densidade (D_s), a condutividade hidráulica do solo ($K_{\theta s}$) e a umidade gravimétrica (U_g) foram dependentes dos tratamentos (Tabela 4).

Os valores de F, para a densidade e a condutividade hidráulica do solo e a interação tratamento e camada, não apresentaram resultados significativos nas camadas de solo.

A umidade gravimétrica do solo apresentou diferença significativa nas camadas estudadas. Porém, na interação tratamento e camada não houve valores de F significativos.

Tabela 4 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade, da condutividade hidráulica e da umidade gravimétrica do PVd típico.

Causa de variação	D_s	$K_{\theta s}$	U_g
Tratamento	72,47 **	5,98 **	34,24 **
Camada	1,81 ns	1,66 ns	4,79 **
Tratamento x Camada	1,34 ns	0,87 ns	0,59 ns
CV (%)	6,05	300,07	8,56

** significativo a 1%; ns = não significativo; D_s = densidade do solo; $K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo saturado; U_g = umidade gravimétrica.

Nos tratamentos analisados, os valores da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade apresentaram diferenças significativas

(Tabela 5). Dentre as características físicas analisadas, somente a porosidade total do solo foi significativa a 5%, nas camadas avaliadas. A interação entre tratamento e camada não apresentou resultados significativos para as propriedades físicas analisadas.

Tabela 5 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade do PVd típico.

Causa de variação	Pt	Mac	Mic
Tratamento	40,04 **	19,34 **	21,55 **
Camada	2,81 *	2,10 ns	0,50 ns
Tratamento x Camada	1,09 ns	1,07 ns	1,46 ns
CV (%)	7,73	47,04	5,51

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; Pt = porosidade total; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade.

4.4.1.1 Densidade do solo

A densidade do solo dos tratamentos AC e A3P diferiram estatisticamente dos demais com relação às atividades realizadas após a colheita florestal (Tabela 6).

Tabela 6 – Diferença percentual da densidade (Mg m^{-3}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC(1)	PC(2)	%(1_2)	A1P(3)	%(1_3)	A3P(4)	%(1_4)	PE(5)	%(1_5)	Média
0,00-0,05	1,01	1,20	+18,81	1,20	+18,81	1,55	+53,47	1,20	+18,81	1,23
0,05-0,10	1,14	1,27	+11,40	1,22	+7,02	1,52	+33,33	1,31	+14,91	1,29
0,10-0,20	1,13	1,23	+8,85	1,22	+7,96	1,46	+29,20	1,27	+12,39	1,26
0,20-0,30	1,15	1,24	+7,83	1,19	+3,48	1,46	+26,96	1,27	+10,43	1,26
0,30-0,40	1,14	1,23	+7,89	1,23	+7,89	1,43	+25,44	1,31	+14,91	1,27
Média	1,11 C	1,23 B		1,21 B		1,48 A		1,27 B		

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância.

AC(1) = antes da colheita; PC(2) = após o corte florestal; A1P(3) = após uma passada do *skidder*; A3P(4) = após três passadas do *skidder*; PE(5) = após a retirada da madeira do estaleiro.

No tratamento PC, houve alteração na estrutura do solo na camada de 0,00-0,05 m. Esse fato foi evidenciado pela alteração significativa que ocorreu na densidade nessa camada, possivelmente devido ao impacto das árvores sobre o solo após o corte. Nas demais camadas, as alterações que aconteceram na estrutura foram em menor intensidade. O nível de compactação considerado prejudicial corresponde a um acréscimo entre 15 a 20% no valor inicial da densidade (GEIST, HAZARD e SEIDEL, 1989).

No tratamento A3P, a compactação foi relativamente maior em todas as camadas, com os valores percentuais da densidade inicial bem acima do nível crítico de compactação. Tal fato pode ter acontecido em função do acúmulo de cargas que ocorreu devido às passadas do *skidder* durante o arraste das árvores. Mantovani (1987) relatou que a compactação é determinada pelo número de passadas da máquina sobre o solo.

Lima *et al.* (2000) analisaram o impacto provocado pelo tráfego do *feller buncher* e do *skidder* e concluíram que houve um acréscimo de 19,6% na densidade do solo devido ao tráfego das máquinas nos primeiros 0,10 m de profundidade.

McNabb e Froehlich (1983), concluíram que a maior compactação em uma trilha de arraste ocorria nas primeiras passadas da máquina. Pelo menos 60% do aumento esperado para a densidade em um trilha onde ocorriam mais de 20 passadas aconteciam a partir de 3 a 5 passadas.

No tratamento A3P, observou-se que a densidade diminuiu com o aumento em profundidade, evidenciando o efeito da colheita florestal predominantemente na camada superficial. Segundo Froehlich *et al.* (1980), a compactação causada por máquinas florestais apresenta maior intensidade próxima à superfície do solo, e decresce em profundidade. Em estudos realizados por esse autor (*ibidem*), foi detectado que a compactação média a 0,15 m de profundidade foi 50% menor que a 0,05 m. Há clara evidência que, na atividade de arraste, após várias passadas do *skidder* ocorreu à compactação do solo até a última profundidade estudada. À medida que aumenta a profundidade, há uma tendência natural de acontecer uma elevação na densidade inicial devido à maior compactação provocada pelo peso das camadas sobrejacentes.

Na camada de 0,00-0,05 m do tratamento A3P, a densidade do solo apresentou um valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$. De acordo com Camargo e Alleoni (1997), para solos de textura franco-argilosos esse valor é considerado crítico.

O aumento na densidade, devido ao tráfego intensivo das máquinas, pode ocasionar a degradação da estrutura, diminuindo a capacidade de infiltração de água no solo e aumentando o escoamento superficial.

4.4.1.2 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A porosidade total, após a realização das atividades de colheita florestal, foi menor no tratamento A3P, o qual apresentou um decréscimo percentual de 24,81% em relação ao tratamento AC (Tabela 7).

Tabela 7 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC	PC	A1P	A3P	PE	Média
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,574	0,500	0,511	0,378	0,511	0,495 a
0,05-0,10	0,523	0,465	0,500	0,390	0,455	0,467 ab
0,10-0,20	0,525	0,485	0,499	0,400	0,470	0,476 ab
0,20-0,30	0,510	0,475	0,502	0,398	0,422	0,461 b
0,30-0,40	0,506	0,474	0,495	0,419	0,467	0,472 ab
Média	0,528 A	0,480 BC	0,501 AB	0,397 D	0,465 C	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,212	0,090	0,110	0,023	0,102	0,107
0,05-0,10	0,144	0,081	0,092	0,032	0,059	0,082
0,10-0,20	0,133	0,074	0,095	0,048	0,073	0,085
0,20-0,30	0,123	0,061	0,102	0,048	0,061	0,079
0,30-0,40	0,120	0,075	0,082	0,076	0,062	0,083
Média	0,147 A	0,076 BC	0,096 B	0,045 C	0,071 BC	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,362	0,411	0,400	0,354	0,410	0,387
0,05-0,10	0,380	0,383	0,408	0,358	0,396	0,385
0,10-0,20	0,392	0,411	0,404	0,351	0,397	0,391
0,20-0,30	0,386	0,414	0,400	0,350	0,361	0,382
0,30-0,40	0,386	0,398	0,412	0,344	0,404	0,389
Média	0,381 B	0,403 A	0,405 A	0,351 C	0,394 AB	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC = antes da colheita florestal; PC= após o corte florestal; A1P= após uma passada do *skidder*; A3P = após três passadas do *skidder*; PE = após a retirada da madeira do estaleiro.

Esse fato está associado às maiores densidades do solo no tratamento A3P. Nesse tratamento, ocorreu o acúmulo de cargas, em função da sobreposição de passadas do *skidder* na área onde foi realizado o arraste das árvores. A maior porosidade total nas camadas superficiais pode estar associada ao acúmulo de

matéria orgânica e à presença de raízes superficiais. De acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), a porosidade total e a densidade podem ser bons indicadores da condição estrutural do solo.

Dentre os tratamentos analisados, o AC demonstrou boas condições estruturais para o desenvolvimento do *Pinus taeda*, pois apresentou a menor densidade média e a maior de porosidade total (Tabelas 6 e 7).

Após a colheita florestal, o tratamento que apresentou a maior porosidade total foi o A1P. Pode-se concluir que solos com maior proporção de espaço poroso em relação ao volume de sólidos possuem menor densidade que solos mais compactados e com menor espaço poroso. Dessa forma, qualquer fator que tenha influência no espaço poroso do solo tenderá a afetar a densidade.

A maior média, para porosidade total no AC, era prevista, uma vez que ainda não haviam sido realizadas as atividades de colheita florestal.

A macroporosidade do solo teve comportamento semelhante ao da porosidade total, ou seja, diminuiu em todos os tratamentos analisados. O menor valor foi obtido no A3P, que é uma consequência da maior densidade. Para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas, Vomocil & Flocker (1961) sugerem uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Com exceção do AC, de um modo geral, todos os tratamentos apresentaram valores inferiores a este limite crítico. Um menor índice de porosidade (relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos), que tem como consequência uma menor quantidade de macroporos, sugere que houve uma compactação. Conseqüentemente, ocorreu uma diminuição na movimentação da água e do ar no solo.

O tráfego das máquinas parece ter afetado a microporosidade, e não somente os poros de maior diâmetro (macroporos).

A microporosidade do solo apresentou comportamento similar nos tratamentos PC e A1P, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. No tratamento A3P, a compactação do solo não ocasionou o aumento da microporosidade. Segundo Trowse (1971), a microporosidade do solo é um dos fatores envolvidos nesse processo, o que permite a conclusão que após três passadas do *skidder* na área de arraste florestal, o solo encontrava-se sob influência da compactação.

4.4.1.3 Umidade gravimétrica

A umidade gravimétrica foi maior no tratamento AC (Tabela 8). A infiltração da água nesse tratamento pode ter ocorrido mais rapidamente, o que pode ser explicado pela macroporosidade (Tabela 7). Porém, a retenção de água mostrou-se menor que nos demais tratamentos, com exceção do tratamento A3P, o que pode ser explicado pela microporosidade (Tabela 7).

No tratamento PC, a umidade do solo diminuiu nas camadas de 0,05-0,10 m e de 0,30-0,40 m. Isso se justifica pela quantidade de microporos presentes nessas camadas (Tabela 7).

No tratamento A1P, o decréscimo no percentual de umidade gravimétrica do solo foi na camada de 0-0,30 m. Os valores médios de microporos do solo aumentaram em relação ao tratamento AC.

No tratamento A3P, a umidade gravimétrica do solo diminuiu em todo o perfil. Os resultados obtidos podem ser explicados pelos menores valores de microporosidade. Assim, é possível afirmar que o solo possui uma menor capacidade para armazenar água sob essa condição. A perda de umidade do solo aconteceu em todas as profundidades no tratamento A3P. Isso explica a maior compactação do solo nesse tratamento. Segunda Cintra (1997), a condutividade hidráulica do solo está relacionada ao volume total e à distribuição do tamanho dos poros.

No tratamento PE, a perda de umidade foi na camada de 0,05-0,40 m, sendo que a maior perda ocorreu na camada de 0,20-0,30 m. Para esse tratamento, o valor médio de microporos obtido foi menor nessa mesma camada.

Nos tratamentos A1P, A3P e PE, a umidade diminuiu em quase todas as camadas do perfil do solo. Assim sendo, nesse solo haverá uma menor disponibilidade de água para as plantas, fazendo com que o crescimento e o desenvolvimento sejam afetados.

O tratamento A3P foi o único a apresentar diferença estatística da umidade gravimétrica dos demais tratamentos analisados.

Tabela 8 – Diferença percentual da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC(1)	PC(2)	% (1_2) A1P(3)		% (1_3) A3P(4)		% (1_4) PE(5)		% (1_5) Média	
0,00-0,05	0,272	0,275	+1,10	0,261	-4,04	0,193	-29,04	0,273	+0,37	0,255 b
0,05-0,10	0,278	0,261	-6,12	0,276	-0,72	0,195	-29,86	0,264	-5,04	0,255 b
0,10-0,20	0,287	0,290	+1,05	0,285	-0,70	0,240	-16,38	0,277	-3,48	0,276 b
0,20-0,30	0,286	0,289	+1,05	0,283	-1,05	0,216	-24,48	0,261	-8,74	0,267 ab
0,30-0,40	0,295	0,282	-4,41	0,300	+1,69	0,225	-23,73	0,285	-3,39	0,278 a
Média	0,284 A	0,279 A		0,281 A		0,214 B		0,272 A		

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC(1) = antes da colheita; PC(2) = após o corte florestal; A1P(3) = após uma passada do *skidder*; A3P(4) = após três passadas do *skidder*; PE(5) = após a retirada da madeira do estaleiro.

4.4.1.4 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica foi maior no tratamento AC, possivelmente em razão da menor densidade, maior porosidade total e macroporosidade. Esse fato demonstra que o volume de vazios era maior antes da colheita florestal, fazendo com que a água se movimentasse com maior rapidez ao longo do perfil do solo (Tabela 9).

No tratamento PC, a condutividade hidráulica do solo apresentou os menores valores médios na camada de 0,20-0,30 m, em função do menor valor de macroporos e do maior valor de microporos, obtidos no tratamento em relação a essa profundidade (Tabela 7).

No A1P, o valor médio da condutividade hidráulica obtido na camada de 0,30-0,40 m foi nulo. Isso pode ter acontecido em decorrência dos valores médios de macroporosidade e de microporosidade obtidos nessa camada.

A condutividade hidráulica, no tratamento A3P, foi menor que nos demais tratamentos. É possível verificar que, devido ao arraste das árvores após três passadas do *skidder*, o espaço poroso sofreu uma redução de 26,42% em relação ao tratamento AC. Analisando os valores médios da Tabela 7, verifica-se que outro fator que justifica a redução na condutividade hidráulica é a redução que ocorreu na

macroporosidade do solo. Uma diminuição na macroporosidade reflete em um movimento de água mais lento ao longo do perfil.

Considerando a média obtida no tratamento PE, é possível verificar que a velocidade de transmissão de água, nesse tratamento, foi menor, o que pode ser justificado pelo baixo valor médio de macroporos apresentados.

Tabela 9 - Condutividade hidráulica (mm h^{-1}) do PVd típico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC	PC	A1P	A3P	PE	Média
0,00-0,05	240,97	5,00	18,45	0,09	11,75	55,25
0,05-0,10	132,53	18,49	8,26	0,52	2,96	32,55
0,10-0,20	8,90	0,07	0,06	2,77	0,00	2,36
0,20-0,30	51,31	0,06	1,13	0,14	3,74	11,27
0,30-0,40	77,61	2,81	0,00	14,19	0,55	19,03
Média	102,26 A	5,29 B	5,58 B	3,54 B	3,80 B	

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC = antes da colheita; PC= após o corte florestal; A1P = após uma passada do *skidder*; A3P = após três passadas do *skidder*; PE = após a retirada da madeira do estaleiro.

4.4.2 Argissolo Vermelho Distrófico abrupto

A densidade (D_s) e a condutividade hidráulica (K_{0s}) apresentaram significância nos tratamentos e entre as camadas (Tabela 10).

A umidade gravimétrica (U_g) apresentou significância entre os tratamentos.

Os valores de F, para a densidade (D_s), condutividade hidráulica (K_{0s}) e umidade gravimétrica do solo (U_g), na interação tratamento e camada, não apresentaram resultados significativos.

Tabela 10 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade, da condutividade hidráulica e da umidade gravimétrica do PVd abrupto.

Causa de variação	Ds	K _{0s}	Ug
Tratamento	5,33 **	6,64 **	10,13 **
Camada	7,70 **	5,47 **	1,89 ns
Tratamento x Camada	1,11 ns	1,63 ns	1,42 ns
CV (%)	7,77	195,23	11,34

** significativo a 1%; ns = não significativo; Ds = densidade do solo; K_{0s} = condutividade hidráulica do solo saturado; Ug = umidade gravimétrica.

Nos tratamentos analisados, os valores da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade apresentaram diferenças significativas (Tabela 11).

Dentre as características físicas analisadas, somente a microporosidade do solo não foi significativa nas camadas avaliadas. A interação entre tratamento e camada não apresentou resultados significativos.

Tabela 11 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade do PVd abrupto.

Causa de variação	Pt	Mac	Mic
Tratamento	5,05 **	14,35 **	11,90 **
Camada	4,95 **	4,27 **	2,49 ns
Tratamento x Camada	1,34 ns	1,70 ns	1,09 ns
CV (%)	7,08	50,27	5,87

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; Pt = porosidade total; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade.

4.4.2.1 Densidade do solo

O tratamento PC apresentou os maiores valores de densidade, mas não diferiu estatisticamente do tratamento A3P (Tabela12). No tratamento PC, a maior compactação do solo ocorreu na camada de 0,00-0,10 m, onde os incrementos nos percentuais da densidade foram superiores ao valor considerado prejudicial ao crescimento das plantas. O tratamento PC apresentou a maior densidade, provavelmente, em função do peso da máquina de corte, somado ao peso da carga de madeira (fuste, galhos e acículas) que a máquina transportava até a madeira ser amontoada no solo. Alterações na densidade, em profundidade, é função da tendência natural do solo e do manejo. Mudanças na densidade podem ser um indicador de alterações na qualidade do solo e no funcionamento do ecossistema.

Em relação aos demais tratamentos, no A1P a compactação ocorreu com menor intensidade nas camadas de 0,00-0,30 m, Os tratamentos A1P e PE não apresentaram diferenças estatísticas entre si.

No tratamento A3P, a maior compactação ocorreu na camada de 0,00-0,05 m, onde o valor encontrado foi superior ao valor considerado crítico no aumento da densidade inicial que segundo Geist, Hazard e Seidel (1989) está entre 15 a 20%.

Nos tratamentos PC, A1P, A3P e PE, a maior compactação aconteceu na camada de 0,00-0,05 m. É bem provável que isso tenha acontecido devido às pressões acumuladas pelo tráfego das máquinas nessas camadas.

Os valores de densidade, encontrados em todos os tratamentos analisados são menores que o valor considerado crítico ao desenvolvimento das plantas ($1,55 \text{ Mg m}^{-3}$) para os solos de textura média (< 20 a 55% de argila), proposto por Reichert *et al.* (2003).

Tabela 12 – Diferença percentual da densidade (Mg m^{-3}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC(1)	PC(2)	%(1_2)	A1P (3)	%(1_3)	A3P(4)	%(1_4)	PE(5)	%(1_5)	Média
0,00-0,05	0,98	1,22	+24,49	1,06	+8,16	1,18	+20,41	1,10	+12,24	1,11 b
0,05-0,10	1,16	1,37	+18,10	1,25	+7,76	1,20	+3,45	1,20	+3,45	1,24 a
0,10-0,20	1,11	1,22	+9,91	1,15	+3,60	1,20	+8,11	1,17	+5,41	1,17 ab
0,20-0,30	1,16	1,22	+5,17	1,19	+2,59	1,25	+7,76	1,25	+7,76	1,21 a
0,30-0,40	1,20	1,21	+0,83	1,27	+5,83	1,20	0,00	1,24	+3,33	1,23 a
Média	1,13 B	1,25 A		1,19 AB		1,21 A		1,19 AB		

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC(1) = antes da colheita; PC(2)= após o corte florestal; A1P(3) = após uma passada do *skidder*; A3P(4) = após três passadas do *skidder*; PE(5) = após a retirada da madeira do estaleiro.

4.4.2.2 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A porosidade total, após a realização das atividades de colheita florestal, foi menor no tratamento PC (Tabela 13). O evento está associado às maiores densidades do solo, obtidas nesse tratamento (Tabela 12).

Tabela 13 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC	PC	A1P	A3P	PE	Média
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,559	0,470	0,548	0,507	0,516	0,520 a
0,05-0,10	0,516	0,441	0,475	0,505	0,492	0,486 b
0,10-0,20	0,541	0,488	0,525	0,492	0,517	0,513 ab
0,20-0,30	0,533	0,494	0,512	0,498	0,487	0,505 ab
0,30-0,40	0,473	0,493	0,478	0,490	0,488	0,484 b
Média	0,524 A	0,477 B	0,508 AB	0,498 AB	0,500 AB	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,152	0,051	0,131	0,033	0,061	0,086 a
0,05-0,10	0,090	0,035	0,033	0,032	0,033	0,045 b
0,10-0,20	0,133	0,057	0,081	0,033	0,058	0,072 ab
0,20-0,30	0,091	0,070	0,087	0,044	0,045	0,068 ab
0,30-0,40	0,071	0,077	0,057	0,043	0,072	0,064 ab
Média	0,108 A	0,058 BC	0,078 B	0,037 C	0,054 BC	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,05	0,408	0,419	0,417	0,474	0,455	0,435
0,05-0,10	0,425	0,406	0,442	0,473	0,459	0,441
0,10-0,20	0,408	0,430	0,445	0,459	0,459	0,440
0,20-0,30	0,442	0,423	0,424	0,454	0,442	0,437
0,30-0,40	0,402	0,417	0,421	0,447	0,416	0,421
Média	0,417 C	0,419 C	0,430 BC	0,461 A	0,446 AB	

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC = antes da colheita; PC= após o corte florestal; A1P = após uma passada do *skidder*; A3P = após três passadas do *skidder*; PE = após a retirada da madeira do estaleiro.

A porosidade total e a densidade do solo, de acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), podem ser bons indicadores da condição estrutural do solo. Sendo assim, verificou-se que, entre os tratamentos analisados, o tratamento AC é o que pode apresentar as melhores condições estruturais para o desenvolvimento da

espécie. Esse tratamento apresentou a menor densidade e a maior porosidade total. Entretanto, entre as atividades realizadas após a colheita florestal, o tratamento A1P é o que pode oferecer melhores condições estruturais para o desenvolvimento da espécie.

O maior valor de macroporosidade foi obtido no tratamento AC, como era previsto, pois ainda não tinham sido realizadas as atividades de colheita florestal. Todas as etapas da colheita florestal afetaram negativamente a macroporosidade, que diminuiu em todos os tratamentos analisados, reduzindo seus valores para menos de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Vomocil e Flocker (1961) enfatizam que, para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas, a macroporosidade mínima do solo deve ser de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Dessa forma, um menor índice de porosidade, que tem como consequência uma menor quantidade de macroporos, sugere que houve a compactação. A diminuição da macroporosidade, nesses tratamentos, é resultado das maiores densidades que foram obtidas.

A microporosidade do solo aumentou em todos os tratamentos analisados. Segundo Muroski e Hassan (1991), a compactação reduz a quantidade de macroporos e aumenta os microporos.

4.4.2.3 Umidade gravimétrica

Em relação ao tratamento AC, os valores médios obtidos para a umidade gravimétrica no PC foram menores em todas as camadas (Tabela 14). Esse fato pode ser explicado pela menor quantidade de microporos ocorridas nesse tratamento, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,20-0,30 m. Os resultados obtidos nessas camadas, para a microporosidade, indicam a menor capacidade do solo em armazenar água nessas condições. Assim sendo, haverá uma menor disponibilidade de água para planta, fazendo com que seu crescimento e seu desenvolvimento sejam afetados. Ocorreram perdas de umidade em todas as camadas no tratamento PC, o que justifica esse tratamento ter apresentado o maior índice de compactação.

No tratamento A3P, o percentual de umidade do solo aumentou em todas as camadas. A presença do maior percentual de microporos, nesse tratamento, em todas as camadas, é a justificativa para que tenha ocorrido tal situação.

O tráfego de máquinas é bastante prejudicial em solos úmidos. Nos solos com essa condição, as cargas pesadas provocam uma compactação no perfil do solo. A restrição do tráfego das máquinas, para umidades adequadas, é mais difícil nos solos argilosos por levarem mais tempo para reduzir o teor de umidade a condições adequadas que os solos arenosos.

De acordo com Eavis (1972), os solos argilosos possuem maior quantidade de microporos e, através desses, a água se infiltra lentamente. Como consequência, a retenção da água é maior nesse tipo de solo. Entretanto, verificou-se que os valores médios, para a microporosidade foram maiores em todos os tratamentos, bem como em todas as camadas analisadas.

Tabela 14 – Diferença percentual da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC(1)	PC(2)	%(1_2)	A1P(3)	%(1_3)	A3P(4)	%(1_4)	PE(5)	%(1_5)	Média
0,00-0,05	0,333	0,294	-11,71	0,305	-8,41	0,365	+9,61	0,388	+16,52	0,337
0,05-0,10	0,328	0,235	-28,35	0,356	+8,54	0,369	+12,50	0,368	+12,20	0,331
0,10-0,20	0,326	0,310	-4,91	0,310	-4,91	0,357	+9,51	0,362	+11,04	0,333
0,20-0,30	0,331	0,306	-7,55	0,298	-9,97	0,337	+1,51	0,325	-1,81	0,319
0,30-0,40	0,309	0,291	-5,83	0,300	-2,91	0,343	+11,00	0,313	+1,29	0,311
Média	0,325 AB	0,287 C		0,314 BC		0,354 A		0,351 A		

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância.

AC(1) = antes da colheita; PC(2) = após o corte florestal; A1P(3) = após uma passada do *skidder*; A3P(4) = após três passadas do *skidder*; PE(5) = após a retirada da madeira do estaleiro.

4.4.2.4 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica foi maior no tratamento AC, em função da menor média de densidade do solo (Tabela 15). Como não haviam ocorrido alterações na estrutura do solo, a porosidade total e a macroporosidade apresentaram os maiores valores médios neste tratamento.

Tabela 15 - Condutividade hidráulica (mm h^{-1}) do PVd abruptico antes e após as operações da colheita florestal.

Camada (m)	AC	PC	A1P	A3P	PE	Média
0,00-0,05	196,87	6,87	136,91	22,68	1,61	72,99 a
0,05-0,10	80,11	0,08	1,14	0,00	5,69	17,40 ab
0,10-0,20	89,88	3,57	34,66	0,83	0,04	25,80 ab
0,20-0,30	23,42	4,84	11,39	10,82	1,59	10,41 b
0,30-0,40	5,37	10,30	6,97	1,27	14,72	7,73 b
Média	79,13 A	5,13 B	38,21 AB	7,12 B	4,73 B	

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC = antes da colheita; PC= após o corte florestal; A1P = após uma passada do *skidder*; A3P = após três passadas do *skidder*; PE = após a retirada da madeira do estaleiro.

Em relação ao tratamento AC, houve uma redução significativa na condutividade hidráulica no tratamento PC, como consequência da redução da porosidade total e da macroporosidade, após a realização do corte das árvores. Tal fato evidencia a maior suscetibilidade do solo à compactação após a realização dessa atividade. Segundo Cintra (1997), a condutividade hidráulica está relacionada ao volume total e à distribuição do tamanho dos poros.

Houve uma redução na condutividade hidráulica do solo no tratamento A1P, fato esse que pode ser explicado pelas alterações ocorridas na porosidade total e na macroporosidade após o arraste das árvores com uma passada da máquina.

Nos tratamentos A3P e PE, as reduções que ocorreram na condutividade hidráulica do solo foram, igualmente, significativas. Analisando a Tabela 13, verifica-se que ambos os tratamentos apresentaram reduções na porosidade total e na macroporosidade, o que justifica uma taxa mais lenta de transmissão de água, ao longo do perfil do solo.

Nos tratamentos PC, A1P e A3P, a condutividade hidráulica no Argissolo Vermelho Distrófico abruptico mostrou-se maior na camada de 0,00-0,05 m, o que pode ser explicado pela quantidade de macroporos presentes nessa camada.

Nos tratamentos PC e A3P, a condutividade hidráulica decresceu em resposta à compactação do solo. Em relação ao tratamento AC, as reduções da

condutividade hidráulica dos tratamentos PC e A3P atingiram valores de 93,51 e 91%, respectivamente.

Segundo Silva, Libardi e Camargo (1986) a redução da condutividade hidráulica é atribuída ao decréscimo da macroporosidade, com o aumento da densidade. O movimento de água no solo está diretamente relacionado com a porosidade de drenagem e, dependendo do tipo de solo, um pequeno aumento da densidade, causado pela compactação, pode diminuir a taxa de infiltração em até 80% (Oliveira *et al.*, 1998).

A condutividade hidráulica de um solo é um atributo de importância à dinâmica e ao armazenamento de água. Solos com baixa condutividade hidráulica são vulneráveis à erosão devido à maior quantidade de água que permanece na superfície do solo e, conseqüentemente, ao maior escoamento superficial (CERDÀ, 1996).

4.4.3 Relação entre os atributos físicos do Argissolo Vermelho Distrófico típico

Devido o acréscimo da densidade inicial do solo, houve uma redução na porosidade total (Figura 5a). Logo, é possível dizer que existe uma relação direta e negativa entre a densidade e a porosidade total do Argissolo Vermelho Distrófico típico, e esta apresentou um alto coeficiente de determinação $r^2 = 0,93$.

A compactação do solo ocasionou uma redução na porosidade total, principalmente nos macroporos (Figura 5b). A densidade e a macroporosidade apresentaram uma relação negativa e um alto coeficiente de determinação, com um valor de $r^2 = 0,74$. De acordo com Vomocil e Flocker (1961), para que possam ocorrer um crescimento e um desenvolvimento satisfatórios das plantas, o solo deve apresentar uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Substituindo o valor considerado mínimo para a macroporosidade na equação obtida, tem-se um valor crítico de densidade de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$. A partir da análise da Tabela 6, é possível verificar que, no tratamento A1P, o valor obtido para a densidade do solo foi, igualmente, de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$. Nos tratamentos PC e PE, os valores foram próximos a esse e, no A3P, o valor obtido excedeu ao valor crítico, que foi encontrado por meio da equação. O incremento na densidade inicial poderá ter como consequência uma

redução na capacidade de infiltração de água no solo, podendo, assim, ocasionar um aumento no escoamento superficial.

Utilizando a densidade de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ na equação obtida no estudo da relação entre densidade do solo e porosidade total (Figura 5a), obtém-se uma porosidade total de $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Nos tratamentos analisados, somente no AC e no A1p os valores encontrados foram superiores (satisfatórios) em relação ao valor encontrado pela equação (Tabela 7). Nos tratamentos PC, A3P e PE, os valores obtidos são menores que o valor encontrado, o que indica uma condição menos adequada da para que possam ocorrer o desenvolvimento e o crescimento adequados das plantas.

A densidade e a condutividade hidráulica do solo apresentaram um coeficiente de determinação com um valor de $r^2 = 0,33$ (Figura 5c). Incrementos na densidade tendem a diminuir a macroporosidade e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica. Assim, o movimento de água no solo saturado será mais lento.

A macroporosidade e a condutividade hidráulica apresentaram um coeficiente de determinação com um valor de $r^2 = 0,67$ (Figura 5d). À medida que aumentou a macroporosidade, a condutividade hidráulica também aumentou.

Conseqüentemente, ocorrerá um movimento mais rápido de água nesse solo. Utilizando na equação o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a macroporosidade, obtém-se uma condutividade hidráulica de $38,52 \text{ mm h}^{-1}$. Em todos os tratamentos analisados os valores da condutividade hidráulica foram inferiores ao valor encontrado por meio da equação (Tabela 9). Logo, é possível afirmar que em todos os tratamentos analisados o movimento de água ao longo do perfil do solo é mais lento.

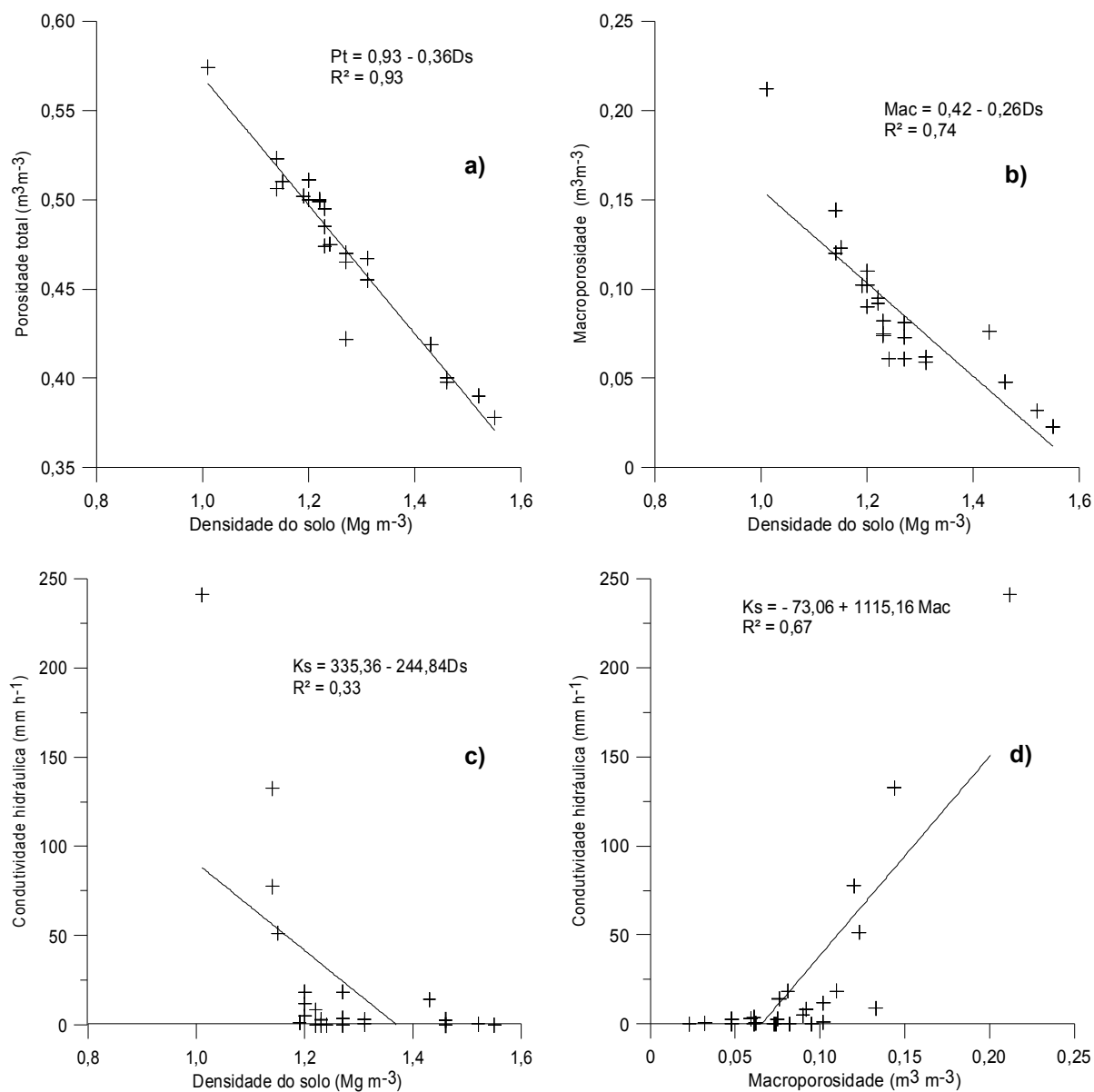


Figura 5 - Relações entre a densidade do solo e a porosidade total **(a)**; densidade do solo e a macroporosidade **(b)**; densidade do solo e a condutividade hidráulica **(c)**; macroporosidade e a condutividade hidráulica **(d)** do PVd típico.

4.4.4 Relação entre os atributos físicos do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto

À medida que houve um aumento na sua densidade inicial do solo, ocorreu uma redução na porosidade total (Figura 6a). A relação entre a densidade e a porosidade total do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto apresentou um coeficiente de determinação com um valor de $r^2 = 0,82$.

A relação entre a densidade e a macroporosidade do solo apresentou um coeficiente de determinação com um valor de $r^2 = 0,57$ (Figura 6b). Os incrementos na densidade acarretaram em reduções na macroporosidade do solo. Substituindo o valor considerado mínimo para a macroporosidade, que corresponde a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na equação, obtém-se um valor para densidade do solo de $1,09 \text{ Mg m}^{-3}$. A partir da análise da Tabela 12, é possível verificar que em todos os tratamentos analisados, os valores médios de densidade são próximos ao valor obtido por meio da equação. Com isso, pode-se dizer que as alterações ocorridas na densidade inicial do solo não foram tão significativas.

Utilizando esse valor de densidade na equação que relaciona a densidade e a porosidade total (Figura 6a), obtém-se um valor de $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No tratamento AC, o valor da porosidade total é semelhante ao valor obtido pela equação. Nos demais tratamentos analisados, os valores da porosidade total são inferiores ao valor obtido por meio da equação.

A densidade e a condutividade hidráulica do solo apresentaram um coeficiente de determinação $r^2 = 0,61$ (Figura 6c). Incrementos na densidade tendem a diminuir a macroporosidade do solo e, conseqüentemente, sua condutividade hidráulica.

A macroporosidade e a condutividade hidráulica apresentaram um coeficiente de determinação $r^2 = 0,73$ (Figura 6d). Com o aumento na macroporosidade, houve um incremento na condutividade hidráulica do solo.

Utilizando na equação o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a macroporosidade, obtém-se uma condutividade hidráulica de $68,47 \text{ mm h}^{-1}$. Em todos os tratamentos analisados os valores da condutividade hidráulica foram inferiores ao valor encontrado por meio da equação (Tabela 15). Logo, é possível afirmar que em todos os tratamentos analisados o movimento de água ao longo do perfil do solo é mais lento.

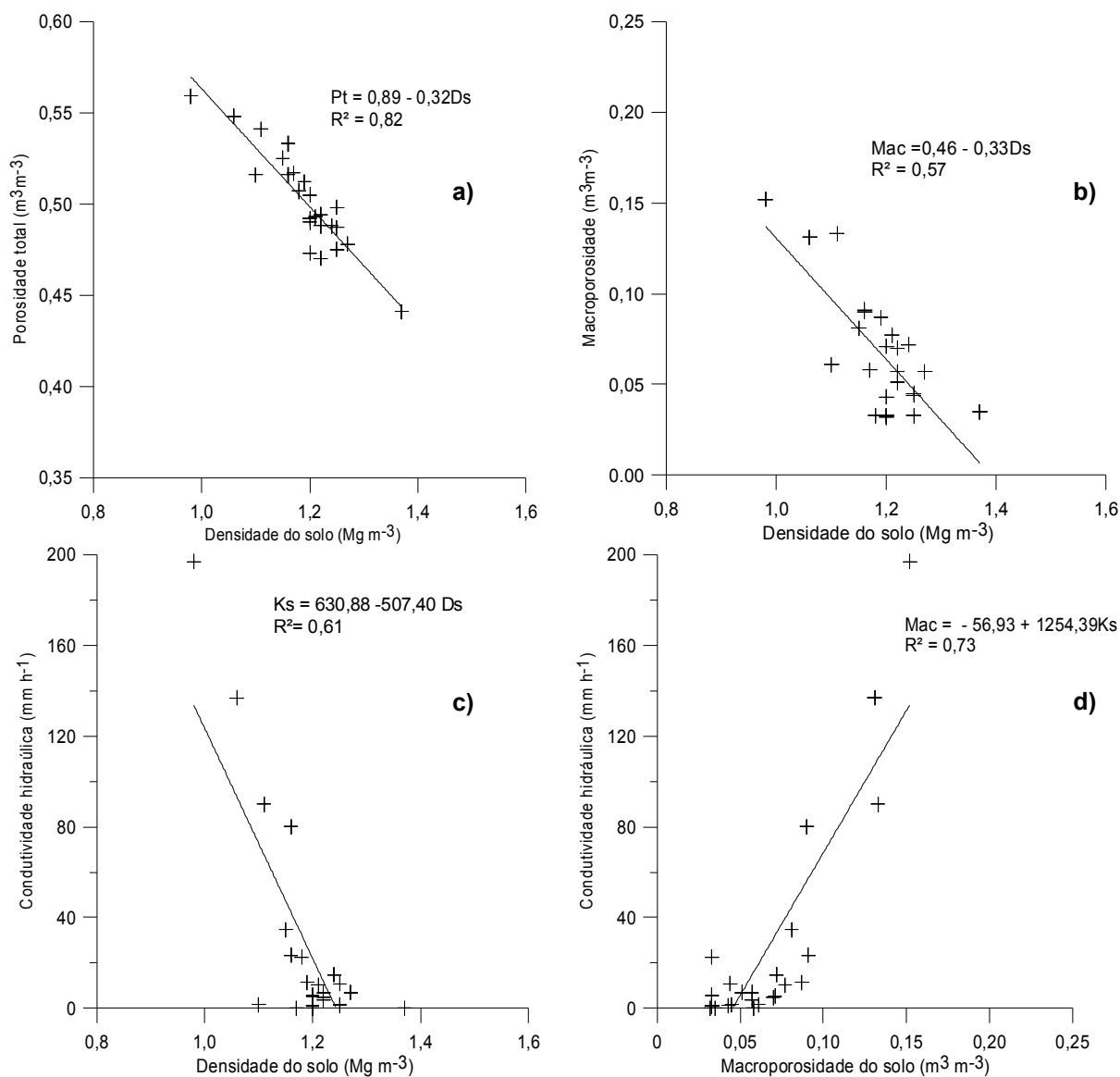


Figura 6 - Relações entre a densidade do solo e a porosidade total **(a)**; densidade do solo e a macroporosidade **(b)**; densidade do solo e a condutividade hidráulica **(c)**; macroporosidade e condutividade hidráulica **(d)** do PVD abrupto.

4.5 Conclusões

No PVd típico, a densidade do solo apresentou um efeito mais significativo após as três passadas do *skidder*, onde a compactação ocorreu em todas as camadas analisadas.

Ambos os Argissolos apresentaram uma redução significativa na condutividade hidráulica, devido às diminuições no volume de macroporos.

A condutividade hidráulica do solo foi o parâmetro que melhor expressou a compactação dos Argissolos.

4.6 Bibliografia Citada

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results modeling. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.61, p.390-398, 1997.

AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. **Estudo do solo para fins ambientais**. Departamento de Solos. PPGCS, CCR/UFSM, 2003. 43p.

BARRICHELO, L.E.G. *et al.* Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando seu aproveitamento industrial. IPEF, n.15, p.1-14, 1977.

BEUTLER, A.N. *et al.* Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.167-177, 2001.

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

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F.L. **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. UFSM, 2000.

CERDÀ, A. **Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain**. *Geoderma*, Amsterdam, v.69, n.2, p.217-232, 1996.

CINTRA, F.L.D. **Disponibilidade de água no solo para portas-enxerto de citros em ecossistemas de tabuleiro costeiro**. 90f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 1997.

DE MARIA, I.C.; 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. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.703-709, 1999.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Tese (Doutorado). - East Lansing, Michigan State University, 1994.

DIAS JUNIOR, M.S. *et al.* Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.371-380, 1999.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

DIAS JUNIOR, M.S. *et al.* Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, v.62, p.248-255, 2005.

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1- mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and soil**, v.36, p.613-622, 1972.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. revisão atualizada. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. EMBRAPA FLORESTAS: Sistemas de produção. ISSN 1678-8281
 Versão Eletrônica. Novembro/2005. Disponível em:
http://sistemaproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivadoPinus/03_2_pinus_taeda.htm

FROEHLICH, H.A. *et al.* **Predicting soil compaction on forested land.** (Final Project Report, Coop. Agreement n.228). Forest Service, equip. Dev. Center, Missoula; 1980, 1210 p.

GEIST, J.M.; HAZARD, J.W.; SEIDEL, K.W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p. 946-50, 1989.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p. 163-189, 1980.

GROHMAN, F. Porosidade. In: MONIZ, A.C. **Elementos de pedologia.** São Paulo, Polígono, 1972. p.77-84.

GUÉRIF, J. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.29, p.367-374. 1984.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, v.11, p.239-282, 1988.

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

IMHOFF, S.C. Indicadores da qualidade estrutural e trafegabilidade dos Latossolos e Argissolos Vermelhos. 2002. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação**. São Paulo, SP, 1996. 153 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23 n.2, p.211-218, 1999.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.450-457, 1980. LEBERT, M.; BURGER, N.; HORN, R.A. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: LARSON, W. E. *et al.* **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 73-80.

LETEY, J. **Relationship between soil physical properties and crop production**. In: *Advances in Soil Science*. V. 1. p. 277-294. 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 1ª ed. Piracicaba : Edusp, 2005. 335p.

LIRA FILHO, J.A. **Interferências ambientais na exploração de florestas plantadas em regiões acidentadas do vale do Rio Doce - MG**. 1992. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

LIMA, J.S. *et al.* Avaliação da compactação do solo em um sistema de colheita de madeira. **Revista Árvore**, v.24, n.3, p. 276-282, 2000.

MCNABB, D.H.; FROEHLICH, H.A. Conceptual model for predicting forest losses from soil compaction. In: *PROCEEDINGS OF THE 1983 SAF NATIONAL CONVENTION*, 1983. p.261-265.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informativo Agropecuário**, v.13, n.17, p.52-55, 1987.

MUROSKEY, D.L.; HASSAN, A.E. **Impact of tracked and rubber-tired skidders traffic on a wetland site in Mississippi. Transactions of the ASAE.** v.34, n.1, p. 322- 7, 1991.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.; SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**. n.54, p.9-16, 1998.

OLIVEIRA, J.O.A.P. *et al.* Influências de sistemas de preparo do solo na produtividade de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.443-450, 2001.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, edição 27, p. 29-48, 2003.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. 1990. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Michigan State University, Michigan, 1990.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle**. Piracicaba, IPEF, 1996. p.1-10 (Circular Técnica IPEF. n.163).

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JR.; E. D.; SOUZA, R.C. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**, n.54, p.9-16, 1998.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. Tese (Livre docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SHIMIZU, J Y, Pinus na silvicultura brasileira. Portal Ambiente Brasil, 2005, Internet. <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./florestal/index.html&contedo=./florestal/artigos/pinus.html>

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.10, n.1, p.91-95, 1986.

SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van, (eds). **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier, p.1-21. 1994.

SUZUKI, L.E.A.S. *et al.* Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004a. CDRom.

SUZUKI, L.E.A.S. *et al.* Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004b. CDRom.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e suas influências nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

TROUSE, A.C. Soil condition as they affect plant establishment, root development and yield. In: BARNES, K.K. *et al.* **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. cap. 6, p. 225-306.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the ASAE**, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1961.

5 CAPÍTULO II

A INFLUÊNCIA DA COLHEITA FLORESTAL NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO MECÂNICA DE DOIS ARGISSOLOS

5.1 Introdução

A resistência à penetração caracteriza o impedimento que o solo oferece ao crescimento das raízes (PEDROTTI *et al.*, 2001). A resistência à penetração aumenta com a compactação e o principal fator que afeta essa é o teor de água do solo (SEIXAS, 1996). Para um solo a uma dada densidade, a resistência à penetração das raízes será maior quanto menor for o teor de água desse solo, podendo atingir valores limitantes para o crescimento e para o desenvolvimento das raízes e das plantas (ROSOLEM *et al.*, 1999).

A compactação afeta a qualidade do solo e, de acordo com (IMHOFF *et al.*, 2000) essa pode ser avaliada por meio da resistência à penetração devido a sua boa correlação com o crescimento radical e com a produtividade das plantas.

A resistência à penetração das raízes é utilizada com frequência para indicar o grau de compactação, em função da facilidade e rapidez com que é possível realizar um grande número de medidas no campo. Trabalhos de pesquisa têm mostrado a relação direta entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo (BORGES *et al.*, 1999). Por outro lado, a umidade do solo é um parâmetro importante a ser considerado quando é medida a resistência à penetração.

A compactação do solo pode ocorrer tanto na superfície como no subsolo, devido principalmente ao tráfego de veículos em condições inadequadas de umidade e ao peso dos equipamentos. A compactação subsuperficial é função da carga total por eixo, já a compactação superficial é função da pressão de inflação dos pneus (SALIRE, HAMMEN e HARDCASTLE, 1994; HAKANSSON e VOORHEES, 1997). Para Pedrotti e Dias Júnior (1996), algumas práticas mecânicas servem para prevenir a compactação, como a utilização de máquinas e equipamentos que gerem o mínimo de compactação no solo; o controle e

planejamento do trânsito de veículos na área; a redução do número de passagens da máquina e implementos no solo; entre outras.

A resistência do solo à penetração varia diretamente com a densidade e inversamente com o conteúdo de água do solo. Com a redução do teor de água no solo, dá-se um aumento na resistência à penetração, o qual decorre da maior coesão entre as partículas do solo. Para valores menores do que 1,1 MPa, a resistência à penetração é muito baixa. Porém segundo Canarache (1990), os valores superiores a 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas.

O conceito de um valor crítico de densidade do solo, no qual o crescimento de raízes é prejudicado, é considerado como o melhor parâmetro físico que caracteriza o crescimento de raízes em solos compactados (THOMPSON, JANSEN e HOOKS, 1987). Alguns pesquisadores sugerem que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicial, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, determinada por meio de um penetrômetro (VOORHEES, 1983).

Taylor e Gardner (1963) comprovaram que a penetração radicular diminuiu com o aumento da densidade para um determinado potencial da água no solo. Igualmente, determinaram que a uma mesma densidade, a penetração diminuiu com a diminuição da umidade. Cogitou-se que a resistência mecânica do solo era uma causa muito maior das alterações na penetração da raiz que a densidade.

Para uma variação da umidade do solo, ocorre variação no sentido contrário na resistência do solo à penetração, pois o teor de água intervém nesse processo, modificando a coesão entre as partículas do solo (BELTRAME *et al.*, 1981).

Quanto à determinação da resistência à penetração, Bengough e Mullins (1990) enfatizam que os penetrômetros fornecem boas estimativas da resistência mecânica do solo à penetração das raízes.

Um aumento da resistência à penetração permite ao solo suportar maiores pressões. Entretanto, deve-se observar até que ponto o solo poderia suportar tal pressão sem prejuízo à sua estrutura e ao desenvolvimento das plantas. Para Suzuki *et al.*, (2006), a capacidade de suporte de carga do solo pode ser estimada pela resistência à penetração. Segundo os autores, quanto maior a resistência do solo à penetração, menor a sua deformação e maior a capacidade de suporte de carga.

Valores críticos de resistência à penetração variam de 1,5 a 4,0 MPa (ROSOLEM *et al.*, 1999), sendo 2,0 MPa aceito como um valor que impede o crescimento radicular (TORMENA *et al.*, 1998). Apesar de a resistência à penetração ser afetada pela textura, pela densidade do solo e pelo conteúdo de água, Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa restringem o pleno crescimento das raízes das plantas. Outros pesquisadores, como Sene *et al.* (1985), consideram críticos os valores que variam de 6,0 a 7,0 MPa, para solos arenosos, e em torno de 2,5 MPa para solos argilosos. Segundo Vepraskas e Miner (1986), valores de resistência à penetração de 2,8 a 3,2MPa retardam a elongação das raízes e com 4,0M Pa não há crescimento de raízes. Existe uma grande amplitude de valores de resistência mecânica do solo à penetração, considerados críticos ao desenvolvimento de raízes; então, o valor de 2,0 MPa tem sido aceito como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração (TAYLOR *et al.*, 1966; NESMITH, 1987).

Taylor *et al.* (1966) consideram que valores de resistência do solo à penetração acima de 2,0 MPa são restritivos ao crescimento e ao funcionamento do sistema radicular. O valor de 2,0 MPa, segundo Passioura e Gardner (1990), tem sido aceito como o limite crítico da resistência mecânica do solo à penetração das raízes, uma vez que, acima desse valor, há restrições no crescimento e no funcionamento do sistema radicular.

A relação entre o crescimento da raiz e a resistência do solo ainda não foi estabelecida para diversas espécies florestais. Essa depende do tipo de solo, das características do penetrômetro e, também, da própria espécie (SANDS, GREACEN e GERARD, 1979; GREACEN e SANDS, 1980).

De acordo com Davies e Zhang (1991), vários estudos ressaltam a importância de se avaliar os atributos físicos do solo, uma vez que as raízes das plantas que crescem sob condições de estresse parecem ser capazes de identificar essas condições e de enviar sinais para a parte aérea, a que controla a expansão foliar. A avaliação da resistência do solo e a determinação da curva de resistência são importantes no estudo do efeito da compactação sobre as condições físicas do solo, podendo ser utilizadas para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo.

5.2 Objetivos

Determinar o impacto provocado pela colheita de madeira de uma floresta comercial sobre a compactação, a partir da avaliação da resistência do solo à penetração, antes e após a colheita florestal.

Avaliar se a compactação do solo ocorre de forma mais intensa no sentido vertical ou no sentido horizontal do perfil do solo.

5.3 Material e Métodos

O estudo foi realizado em povoamentos de *Pinus taeda* situados em Três Barras, no Planalto Norte de Santa Catarina, onde foram coletadas amostras de dois tipos de solos antes e nas atividades após a colheita florestal.

5.3.1 Solos estudados

Os solos estudados são classificados como Argissolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, A proeminente, álico e como Argissolo Vermelho Distrófico abrupto, textura areno-argilosa, A moderado, álico, caulínítico, hipoférico.

Maiores detalhes sobre as áreas em estudo foram fornecidas no capítulo 1.

5.3.2 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada por meio de um penetrômetro digital e manual, da marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico dos dados e ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e base de 12,83 mm de diâmetro. Tanto no Argissolo Vermelho Distrófico típico como no Argissolo Vermelho Distrófico abrupto, as leituras foram realizadas nas profundidades de 0 a 0,50 m, antes e após a colheita

de madeira. Antes da colheita de madeira as medições foram realizadas nas áreas de corte, de arraste após uma passada, de arraste após três passadas da máquina e no estaleiro. Os valores de RP foram determinadas em 6 pontos nas trilhas das máquinas, com espaçamento entre si de 3 metros. Após a colheita, nas áreas de corte e arraste após uma passada da máquina os valores de RP foram determinadas em 5 pontos, no local correspondente à largura dos pneus e das esteiras das máquinas. Após a colheita, nas áreas de arraste após várias passadas da máquina e do estaleiro, as leituras dos valores de RP foram determinadas, aleatoriamente, em 2 pontos.

Em cada local correspondente a uma repetição, foi determinado um perfil de resistência à penetração, no centro da rota a compactar ou compactada e mais dois perfis para cada lado. Com esses dados gerou-se um mapa de resistência à penetração, interpolando-se os dados.

5.4 Resultados e Discussão

5.4.1 Resistência à penetração do Argissolo Vermelho Distrófico típico

No tratamento AC, os valores médios da RP do PVd típico indicaram uma pequena e desuniforme compactação do solo no sentido vertical. Todavia, o solo atingiu o limite crítico de RP maior que 2,0 MPa a partir de 0,14 m até 0,50 m de profundidade (Figura 7a). Tal fato pode ser explicado pela realização das atividades de manejo no povoamento florestal após o plantio e durante o desenvolvimento da planta. De acordo com Seixas (1996), as principais forças que provocam a compactação dos solos florestais têm origem no tráfego das máquinas utilizadas nas atividades de manejo e colheita da madeira.

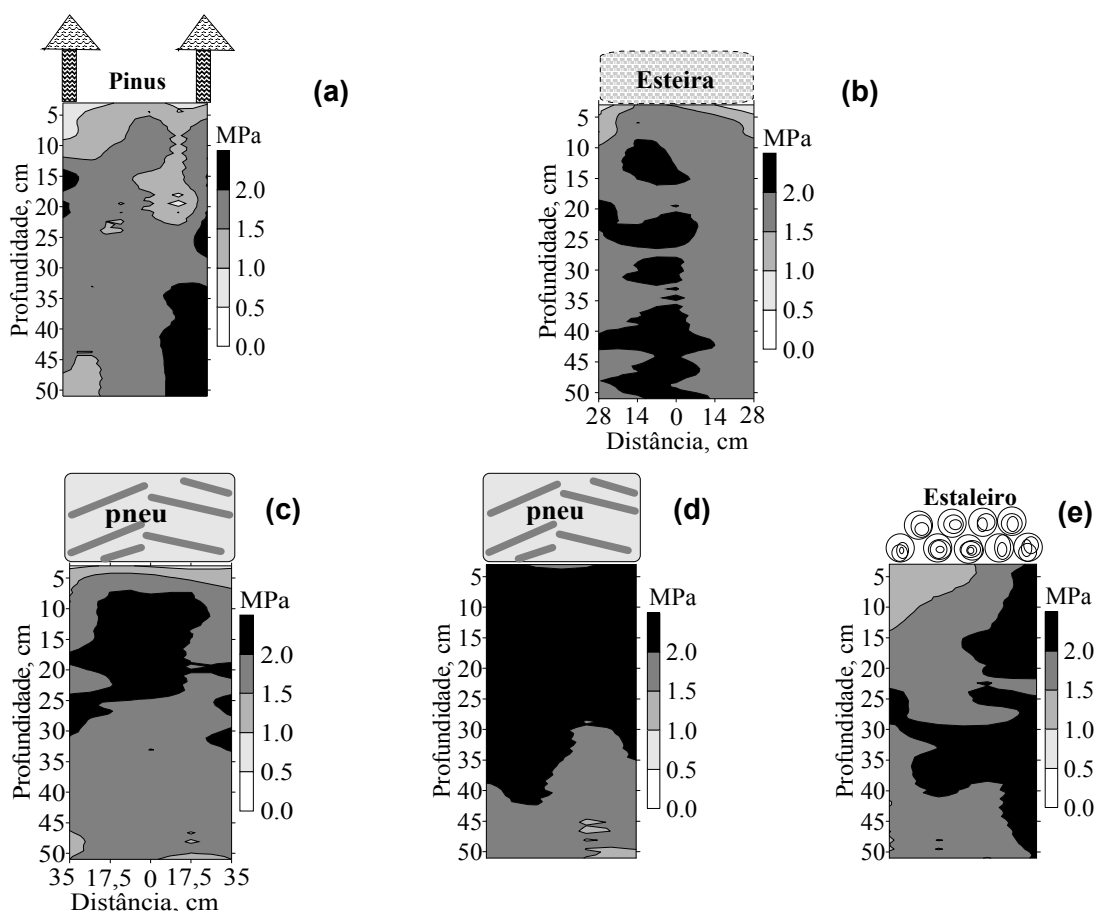


Figura 7 - Valores de resistência à penetração do PVd típico (a) antes da colheita; (b) após o corte florestal; (c) após uma passada do *skidder*; (d) após três passadas do *skidder*; (e) após a retirada da madeira do estaleiro.

No tratamento PC houve um aumento da compactação do solo no sentido vertical, dos 0,08 até 0,50 m de profundidade, onde a RP do solo era superior a 2 MPA (Figura 7b). Isso aconteceu devido ao elevado peso da escavadeira com Feller direcional, apesar da máquina estar utilizando o rodado com esteira; ao amontoamento das árvores cortadas no local e ao tráfego do *skidder* para realizar o arraste das árvores até o estaleiro e ao impacto das árvores sobre o solo na queda das mesmas. Durante as operações florestais de colheita alguns distúrbios ao solo são comuns. A compactação inicia-se com o corte das árvores e seu impacto na queda, tendo continuidade nas operações subseqüentes de colheita (OLIVEIRA JUNIOR, *et al.*, 2004). A área de ocorrência de RP, entre 1,5 a 2,0 MPa, também indicou que o estado de compactação aumentou ao longo do perfil até 0,50 m. As pressões aplicadas sobre a superfície do solo foram distribuídas ao longo do perfil

desse solo, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, de acordo com as características físicas do solo (SEIXAS,1996).

Ocorreu um aumento na compactação do solo, no tratamento A1P, predominantemente, entre as profundidades de 0,05 a 0,34 m (Figura 7c). O peso das árvores arrastadas, somado ao peso da máquina, foram os fatores que provocaram a compactação do solo.

Houve um aumento significativo da compactação no tratamento A3P, e o solo ultrapassou o limite crítico de RP entre a faixa de 0 até 0,43 m de profundidade, aproximadamente (Figura 7d). De acordo com Seixas (2002), considera-se o valor de 3 MPa de resistência à penetração do solo como limite para o desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais. Esse fato ocorreu em consequência do peso das árvores arrastadas, somado ao peso da máquina, e devido às várias passadas da máquina no local. Em função do efeito de sobreposição de passadas dos rodados da máquina, houve um acúmulo de cargas no solo. Nesse tratamento, a densidade apresentou um acréscimo de 22,3% em relação à densidade inicial do solo e a umidade gravimétrica diminuiu em 24,6% (Tabelas 6 e 8). Em todos os tratamentos pós-colheita florestal ocorreram incrementos na densidade inicial do solo e reduções na umidade gravimétrica. O efeito mais drástico ocorreu no tratamento A3P, onde o aumento na densidade inicial do solo apresentou valores médios com variações entre 25 a 53,7% e o decréscimo da umidade gravimétrica variou entre 16,38 a 29,86%.

Nesse sentido, Lima *et al.* (2001) avaliaram o comportamento da resistência do solo à penetração nas trilhas entre as linhas de um plantio de eucalipto, em função da profundidade e do teor de água no solo. No corte e amontoamento das árvores foi utilizado um trator florestal *feller buncher* de pneus e no arraste um *skidder* com pneus de baixa pressão. Segundo os autores, a resistência do solo à penetração apresentou variações após o tráfego das máquinas. A variação mais acentuada ocorreu na profundidade entre 0-10 cm, apresentando um comportamento crescente com o aumento em profundidade. Porém, a influência do número de passadas dos rodados de um *forwarder* no nível de compactação de um solo, analisado segundo a sua densidade, ocorreu, conforme Fernandes, Orlando e Lanças (1997), depois da primeira passada, voltando a acontecer após a nona. Esses autores observaram que o número de

passadas não influenciou significativamente os valores de resistência do solo à penetração.

Porém, o efeito no solo poderá não ser muito pronunciado, principalmente em função das condições de umidade e tipo de solo. O tráfego de um módulo *feller buncher* e *skidder* em solo de areia quartzosa com 10% de teor de umidade, registrou um aumento da resistência do solo em até 20 cm de profundidade, sem atingir o limite de 3 MPa, teoricamente considerado como crítico para o crescimento do sistema radicular do eucalipto (SEIXAS, 2002).

No tratamento PE ocorreu um aumento na compactação, com valor superior ao limite crítico de RP no solo (Figura 7e), porém com efeito menor que uma ou várias passadas do *skidder*. No local, além do peso da madeira empilhada sobre o solo, havia ainda a presença das máquinas utilizadas no processamento e carregamento da madeira, bem como o acúmulo de cargas sofridas devido ao trabalho realizado pelo *skidder* no empilhamento da madeira e no arraste das “árvores” no local.

A compactação causada por máquinas florestais apresentou uma maior intensidade próxima à superfície do solo e essa decresceu rapidamente em profundidade. Em um estudo realizado por Froehlich *et al.* (1980), foi detectado que a compactação média, a 0,15 m de profundidade, foi 50% menor que a 0,05 m.

Devido à maior quantidade de microporos nesse solo, torna-se possível uma maior retenção de água e um maior teor de água no mesmo. Logo, o grau de compactação desse solo será maior e, conseqüentemente, haverá uma maior resistência à penetração das raízes.

O maior aumento na densidade inicial do solo ocorreu no tratamento A3P, onde essa apresentou um valor médio de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$. Jussof (1988) realizou trabalhos em que foi testada a sensibilidade de espécimes de *Pinus taeda* à compactação do solo. Essas não conseguiram penetrar as suas raízes em solos que apresentavam uma densidade acima de $1,30 \text{ g cm}^{-3}$.

Em geral, os solos argilosos são mais suscetíveis à compactação pelo tráfego de máquinas do que os mais arenosos, devido à sua maior porosidade total e à sua maior capacidade de armazenamento de água nos microporos (SILVA, 1999). Isso faz com que solo argiloso retenha mais umidade e por um período maior, necessitando maiores cuidados com a umidade do solo nas práticas de preparo do solo e tráfego de máquinas para reduzir os riscos de compactação.

5.4.2. Resistência à penetração do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto

Os valores médios da resistência do solo à penetração do PVD abrupto, antes do tráfego de máquinas, após o corte, depois do arraste com uma passada, após o arraste com três passadas e depois do estaleiramento da madeira, estão apresentados na Figura 8.

Tanto antes como nas atividades após a colheita florestal, o valor máximo de RP obtido foi de 2,0 MPa. Como se pode notar, a compactação, a qual é medida pela resistência do solo à penetração, ocorreu com menor intensidade nesse solo, o que indica que ele apresenta menor susceptibilidade à compactação (Figuras 8a, 8b, 8c, 8d e 8e).

No tratamento PC, a densidade apresentou um acréscimo de 10,6% em relação à densidade inicial do solo e a umidade gravimétrica diminuiu em 11,7%, conforme pode ser observado a partir da análise dos dados médios obtidos das Tabelas 12 e 14. A máquina que realizava o corte de árvores utilizava esteiras no rodado. Entretanto, a compactação do solo foi maior após o corte das árvores, quando o percentual de umidade gravimétrica do solo diminuiu em relação à umidade inicial, e o percentual da densidade do solo aumentou em relação à densidade inicial. Os motivos que, provavelmente, justificam o fato ocorrido são: o peso das árvores e da máquina, no local do corte florestal, a pressão que as árvores exercem sobre o solo, ao serem amontoadas sobre ele, e a entrada do *skidder*, na área de corte, para realizar o arraste das árvores até o estaleiro, provocando, assim, um tráfego intenso na área, com conseqüente acúmulo de cargas devido à sobreposição de passadas no local.

O maior aumento na densidade inicial do solo ocorreu no tratamento PC, onde essa apresentou um valor médio de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$. O conteúdo de água do solo influenciou os valores de resistência mecânica à penetração.

Em todos os tratamentos analisados ocorreram incrementos na densidade inicial do solo. Entretanto, as reduções na umidade gravimétrica aconteceram somente nos tratamentos PC e A1P. Nos demais tratamentos a umidade gravimétrica do solo aumentou. Tal fato pode ser explicado pelo valor médio de microporos obtidos nesses tratamentos.

Os efeitos do conteúdo de água se alteram com as características dos solos e o esforço de compactação aplicado sobre este. De acordo com Seixas (2000), quando o teor de água aumenta a resistência do solo à compactação diminui, devido à maior lubrificação entre as partículas do solo.

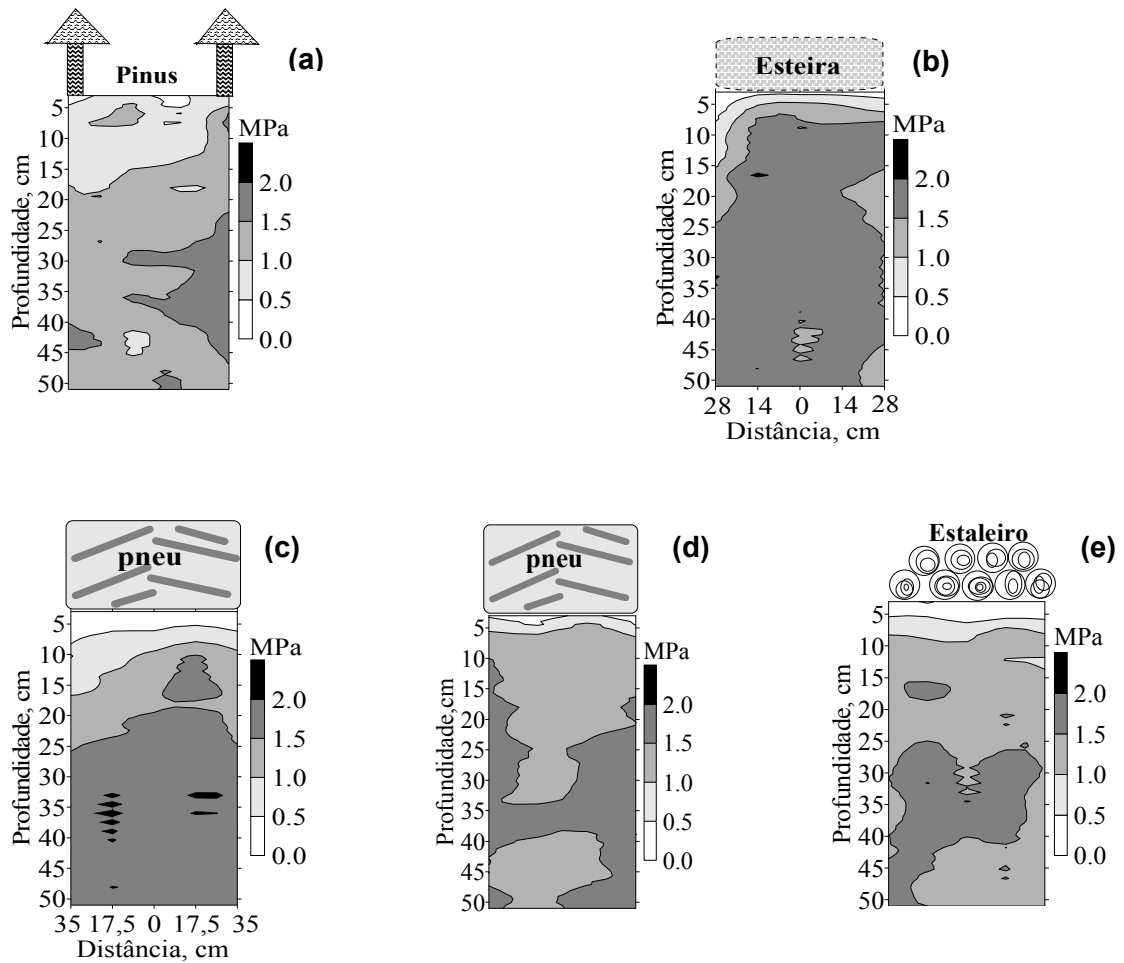


Figura 8 - Valores de resistência à penetração do PVd abruptico **(a)** antes da colheita; **(b)** após o corte florestal; **(c)** após uma passada do *skidder*; **(d)** após três passadas do *skidder*; **(e)** após a retirada da madeira do estaleiro.

5.5 Conclusões

No Argissolo Vermelho Distrófico típico, após três passadas do *skidder* a compactação ocorreu com maior intensidade na superfície do solo e essa apresentou uma distribuição uniforme nas camadas do perfil. Antes da colheita, após o corte florestal, após uma passada do *skidder* e após a retirada da madeira do estaleiro a compactação ocorreu mais no sentido vertical;

No Argissolo Vermelho Distrófico abruptico a compactação do solo ocorreu em menor intensidade. Tal fato foi comprovado pela menor resistência do solo à penetração mecânica, a qual indica uma menor suscetibilidade do solo à compactação.

5.6 Bibliografia Citada

BELTRAME, L.F.S. et al. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas. v.5, p.145-149, 1981.

BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p.341-358, 1990.

BORGES, A.L. et al. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.1019-25, 1999.

CANARACHE, A. Penetrometer - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**. V.16, p.51-70, 1990.

DAVIES, W.J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. Palo Alto, v. 42, p.55-76, 1991.

FERNANDES, H.C.; ORLANDO, R.C.; LANÇAS, K.P. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do "forwarder" e do "harvester". **Engenharia na Agricultura**, v. 5, n. 4, p. 276 - 280, 1997.

FROEHLICH, H.A. *et al.* **Predicting soil compaction on forested land**. (Final Project Report, Coop. Agreement n.228). Forest Service, equip. Dev. Center, Missoula; 1980, 1210 p.

GREACEN, E.L.; SANDS.R. Compaction of forest soils: a review. **Australian journal of soil research**, v.18, p. 163-189, 1980.

HAKANSSON, I., VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W.H., VALENTIN, C., *et al.* (eds.) **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

IMMHOF, S.; SILVA, A.P.TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.7, p.1493-1500, 2000.

JUSSOF, K. **Soil compaction from of-road transportation machine on Hill Forest Land**. Universidade da Malásia. v. 11, n. 1, 1988.

LIMA, J.S.S. *et al.* Estudo do comportamento da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego na colheita de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE DE MADEIRA FLORESTAL, 5., 2001, Porto Seguro. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 2001. p. 281-289.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.183-186, 1987.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D. *et al.* **Estudos prévios previnem compactação do solo**. Revista da Madeira. nº 82. 2004.

PASSIOURA, J.B.; GARDNER, P.A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.149-157, 1990. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/paper/PP9900149.htm>. (acessado em 02/08/2006).

PEDROTTI, A. *et al.* Resistência mecânica do solo à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 9, n. 4, p. 50-52, 1996.

ROSOLEM, C.A. *et al.* Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.821-828, 1999.

SALIRE, E.V., HAMMEN, J.E., HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil Tillage Research**, v. 31, p. 235-248, 1994.

SANDS, R.; GREACEN, E.L.; GERARD, G.J. Compaction of sand soils in radiata pine forests: I- a penetrometer study, **Australian journal of soil research**, v.17, p. 101-113, 1979.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle.**(Circular Técnica. IPEF; n.163) p. 1-10, Piracicaba: IPEF, 1996.

SEIXAS, F. Solos - compactação. 2002. Disponível em: www.cultivar.inf.br.

SENE, M. *et al.* Relationships of soil texture and structure to corn yield response to sub soiling. **Soil Science Society**, v. 49, p. 422-27. 1985.

SILVA, V.R. **Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água.** Santa Maria, RS, 1999.

116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Biodinâmica de Solos) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

SUZUKI, L.E.A.S. *et al.* Estimativa da pressão de preconsolidação pela resistência à penetração. In: XVI REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 2006, Aracaju. Anais. Sergipe. (CD-ROOM).

TAYLOR, H.M., GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength soil. **Soil Science**, v.96, p.153-156, 1963.

TAYLOR, H.M. *et al.* Soil strength-root penetration for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

THOMPSON, P.J., JANSEN, I.J., HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.1288-1293, 1987.

TORMENA, C.A. *et al.* Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.129-133, 1983.

6 CAPÍTULO III

COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE DOIS ARGISSOLOS NA COLHEITA FLORESTAL

6.1 Introdução

A deformação do solo corresponde à diferença entre a altura inicial da amostra e a altura no final da aplicação de cada pressão, dividido, pela altura inicial da amostra. Para Silva, Reinert e Reichert (2000), a deformação do solo pode ser considerada alternativa na representação do efeito da aplicação de pressões no solo.

A compactação do solo pode ocorrer tanto na superfície como no subsolo, devido, em geral, ao tráfego de veículos em condições inadequadas de umidade e ao peso dos equipamentos. Pedrotti e Dias Junior (1996) recomendam algumas práticas mecânicas para prevenir a compactação do solo, tais como a utilização de máquinas e implementos leves, o controle e o planejamento do trânsito de veículos na área e a redução do número de passagens das máquinas e implementos.

Os efeitos dos sistemas de manejo nos atributos do solo, que influenciam no comportamento compressivo, são a estrutura (HORN, 1988), a umidade e a densidade do solo (DIAS JUNIOR, 1994) e o teor de matéria orgânica (STONE e EKWUE, 1995).

Para Reaves e Cooper (1960), as causas da compactação podem ser originadas pela pressão exercida no solo pelos pneus e esteiras dos tratores (Figura 9), das cargas e dos equipamentos das máquinas, pelo tráfego constante da máquina sobre o solo, da textura e da agregação do solo (SEIXAS, 1988).

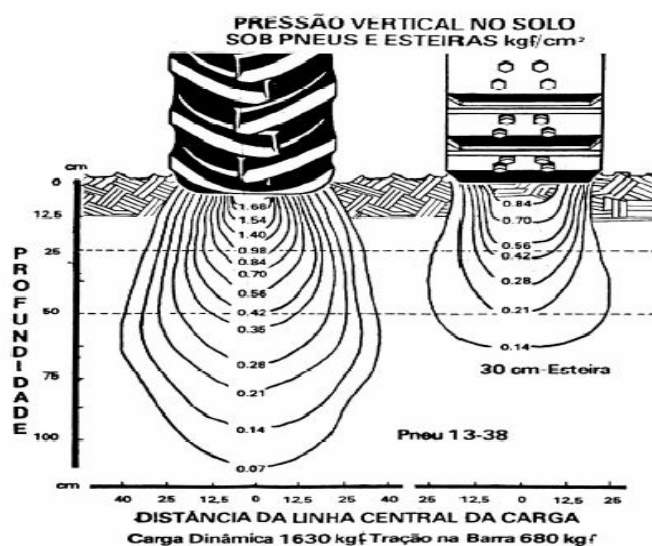


Figura 9 – Distribuição das tensões sob uma roda e uma esteira.

Fonte: Reaves e Cooper (1960)

O tráfego de máquinas, em solo úmido, durante a realização das atividades florestais é um dos fatores que determinam a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas. Nessa condição, a compactação do solo pode não ser significativa (DIAS JUNIOR, 1994). Entretanto, em condições de elevada umidade, o solo fica suscetível à compactação devido à sua baixa capacidade de suporte de carga. Lanças *et al.* (2005), enfatizam que não é conveniente realizar certas operações mecânicas a partir de determinados teores de água. Logo, é necessário determinar a pressão de preconsolidação do solo, a fim de estabelecer os limites de teor de água para cada solo e para cada carga aplicada no mesmo, a partir do qual o tráfego de máquinas deve ser evitado.

De acordo com Weaver (1950), a umidade ideal para execução das operações de preparo do solo coincide aproximadamente com o teor que proporciona a máxima compactação do solo. Deve-se procurar trabalhar com umidades mais baixas ou utilizar máquinas que exerçam o mínimo de pressão possível sobre o solo. Entretanto, para uma mesma condição, a propriedade que governa a intensidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a sua umidade no momento das operações mecanizadas (DIAS JUNIOR, 1994). Lanças *et al.*

(2005), enfatizam que não é conveniente realizar certas operações mecânicas a partir de determinados teores de água. Logo, é necessário determinar a pressão de preconsolidação do solo, a fim de estabelecer os limites de teor de água para cada solo e para cada carga aplicada no mesmo, a partir do qual o tráfego de máquinas deve ser evitado.

A pressão de inflação dos pneus é função do peso, do modelo e da montagem (simples, duplo ou triplo) de cada pneu. Para Lanças (2007), a calibragem correta do pneu diminui em até 20% o consumo de combustível, há uma economia de 7,5% no tempo gasto para a realização da atividade e diminui até 80% a compactação do solo.

A utilização dos resíduos florestais serve como uma alternativa para minimizar o impacto provocado, devido o tráfego das máquinas, na estrutura dos solos sob colheita florestal (SEIXAS, OLIVEIRA JÚNIOR e SOUZA, 1998; OLIVEIRA JUNIOR, 1998). Os resíduos servem para distribuir as pressões aplicadas, evitando, assim, que a capacidade de suporte de carga do solo seja superada. De acordo com McMahon e Evanson (1994), isso reduziria o risco da compactação e a formação de sulcos pelos rodados das máquinas.

A aplicação de pressões menores que a maior pressão à qual o solo foi submetido, no passado, pode ter efeitos benéficos, enquanto que pressões maiores que a maior pressão sofrida pelo solo, no passado, pode ter efeitos prejudiciais. Isso mostra a importância de serem conhecidos os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e a umidade do solo no momento das operações, evitando, dessa forma, a compactação adicional (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

Segundo Kondo e Dias Junior (1999), as propriedades físico-mecânicas do solo têm sido utilizadas na avaliação da susceptibilidade do solo à compactação, bem como na determinação do momento ideal para a realização das atividades mecanizadas no campo. Dias Junior (1994), Dias Junior e Pierce (1996), Kondo e Dias Junior (1999) e Silva, Reinert e Reichert (2000) citam, como exemplos dessas propriedades, o índice de compressão e a pressão de preconsolidação.

Algumas das propriedades relativas ao comportamento compressivo do solo são obtidas a partir da curva de compressão do solo, que considera o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada, obtém-se a pressão de preconsolidação (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). A pressão de preconsolidação (σ_p) determina a máxima pressão que foi aplicada ao solo no

passado (DIAS JUNIOR, 1994) e serve como um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de pressão do solo (REINERT, 1990; KONDO e DIAS JUNIOR, 1999; SILVA, REINERT e REICHERT, 2000; IMHOFF *et al.*, 2001; PENG *et al.*, 2004). A aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo. Com isso, suas propriedades físicas mantêm-se constantes. Por outro lado, a aplicação de pressões maiores a esse valor provoca a compactação adicional ao solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; KONDO e DIAS JUNIOR, 1999), causando deformações plásticas (não recuperáveis) e alterando consideravelmente as propriedades físicas do solo (HOLTZ e KOVACS, 1981; LEBERT e HORN, 1991).

O índice de compressão é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação e esse diminui com o aumento do tamanho de agregados. Segundo Pereira *et al.* (2005), os valores de pressão de pré-compressão diminuem com o aumento do tamanho de agregados e com o teor de água do solo.

DA ROSA (2007) verificou que a tensão de preconsolidação e o coeficiente de compressibilidade são bons indicadores do estado de compactação do solo. Segundo o autor, à medida que aumentava o efeito da compactação no solo, aumentavam a tensão de preconsolidação, a resistência ao cisalhamento e a demanda do esforço de tração e vertical. Entretanto, reduzia o coeficiente de compressão, indicando o nível de compactação em que se encontravam os tratamentos em estudo.

Apesar das propriedades mecânicas permitirem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos, no Brasil, poucos são os trabalhos que quantificam os níveis de pressões que podem ser aplicados para evitar a compactação adicional do solo (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999).

O entendimento do comportamento compressivo do solo, utilizando as curvas de compressão, adquire uma grande importância em razão de serem essas as bases, sob o ponto de vista físico, para adotar as decisões sobre o manejo mais apropriado do solo, o qual possa reduzir os efeitos prejudiciais ocasionados pelo processo de compactação. Os solos que foram sujeitos ao processo de compactação são chamados solos pré-compactados. Esses resistirão ainda mais às cargas mecânicas, até que o carregamento exceda a pressão de pré-compactação inicial. Com o intuito de minimizar a compactação causada ao solo, durante as

operações, é desejável limitar as pressões aplicadas abaixo da pressão de pré-compactação do solo (PEREIRA *et al.*, 2005).

A avaliação da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga, sob diferentes condições de umidade e sob diversos sistemas de manejo, é segundo (DA SILVA e CABEDA, 2006), importante para determinar as pressões máximas que o solo pode suportar nessas condições e também para minimizar os riscos à compactação dos solos. Kondo e Dias Junior (1999) enfatizam que essas avaliações auxiliam na seleção de máquinas que desempenhem pressões menores sobre o solo, reduzindo o impacto gerado à qualidade estrutural dos solos.

6.2 Objetivos

Estudar o comportamento compressivo de um Argissolo Vermelho Distrófico típico e de um Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes e após a realização das atividades de colheita florestal, por meio da pressão de pré-consolidação e do índice de compressão;

Relacionar classes de grau de saturação em água com a suscetibilidade à compactação de dois argissolos.

6.3 Material e Métodos

6.3.1 Localização e características climáticas das áreas

A pesquisa foi realizada em áreas sob floresta comercial de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade, pertencentes à Empresa Rigesa Celulose, Papel e Embalagens Ltda, localizada no Município de Três Barras, Santa Catarina, entre os paralelos 26°07' S de latitude e 50°19' W de longitude e a 770 m de altitude. O clima característico da região é o Cfb (Köppen), com precipitação média anual de aproximadamente 1429,29 mm, e temperatura média anual em torno de 19,3°C.

No estudo do comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico típico (PVd típico) e do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto (PVd abrupto) foram utilizados os seguintes tratamentos:

- ❖ AC= antes da colheita florestal;
- ❖ PC= após o corte das árvores;
- ❖ AF= após o arraste das árvores;
- ❖ PE= após a retirada da madeira do estaleiro.

Maiores detalhes, referentes às áreas em estudo, podem ser obtidos no capítulo 1.

6.3.2 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo, com estrutura preservada, foram coletadas no segundo semestre de 2005. Para isso, foram utilizados cilindros metálicos, com 0,025 m de altura e diâmetro de 0,061 m, antes de ser realizada a colheita florestal e após essa, nas atividades de corte, arraste e no estaleiramento da madeira, que era feito à beira da estrada. As amostras foram coletadas nas camadas de 0,025-0,05 m e 0,10-0,125 m, nas mesmas condições, para ambos os Argissolos.

Antes da realização das atividades de colheita florestal, as parcelas foram distribuídas ao acaso, em relação às linhas de plantio das árvores, nos locais onde futuramente ocorreria o tráfego das máquinas para a colheita do *Pinus taeda*. Foram abertas seis trincheiras e em cada trincheira foi coletada duas amostra para cada camada, resultando em um total de 24 amostras para o PVD típico e 24 amostras para o PVD abrupto.

Após a colheita florestal, foram abertas quatro trincheiras no local onde foi realizado o corte florestal e quatro trincheiras no local onde foi realizado o arraste das árvores. Para cada condição foram coletadas duas amostras por camada, totalizando 32 amostras para o PVD típico e 32 amostras para o PVD abrupto.

No estaleiro foram abertas quatro trincheiras, sendo coletada uma amostra por camada, totalizando 8 amostras para o PVD típico. No PVD abrupto foram abertas três trincheiras, sendo coletadas 1 amostra por camada, totalizando 6 amostras.

6.3.3 Composição da serapilheira sobre os Argissolos

No campo, foram coletadas, de forma aleatória, cinco amostras da serapilheira acumulada sobre o PVd típico e cinco amostras para o PVd abrupto, utilizando uma moldura de ferro quadrada com 0,25 m X 0,25 m e sendo feita a medição da altura da manta, por meio de uma régua, para cada amostra. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas, devidamente identificadas. No Laboratório de Física do Solo da UFSM, o material foi separado nas seguintes frações: > 8,0 mm; 8,0-4,0 mm; 4,0-2,0 mm e folhas, galhos, estruturas reprodutivas, casca e resíduos.

Depois da separação do material, por meio de peneiras em malhas, com frações específicas, as amostras foram pesadas, para que pudesse ser obtido seu peso úmido, acondicionadas em sacos de papel e, posteriormente, encaminhadas ao Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais da UFSM, com a finalidade de obter o peso seco.

No laboratório, as amostras foram secadas em estufa de circulação e renovação de ar a 75°C por 72 horas. Após a estabilização do peso, as amostras foram pesadas em balança de precisão (0,01 g).

Tabela 16- Percentual dos componentes da manta de serapilheira sobre o PVd típico e sobre o PVd abrupto.

Amostra	Fração			
	> 8,0 mm	8,0-4,0 mm	4,0-2,0 mm	galhos, folhas, cascas
PVd típico				
1	36	26	26	12
2	64	13	7	16
3	67	17	7	9
4	60	4	2	34
5	66	16	8	10
Média (%)	59	15	10	16
PVd abrupto				
1	15	50	26	9
2	23	60	11	6
3	36	28	27	9
4	45	31	14	10
5	52	22	20	6
Média (%)	39	35	18	8

6.3.4 Cálculo da pressão das máquinas sobre o solo

A tabela 17 apresenta os dados referentes aos pesos das máquinas e dos equipamentos vazios, as capacidades de cargas dos equipamentos e as áreas de contato das esteiras das escavadeiras hidráulicas e dos pneus do skidder.

Tabela 17 – Pressões que as máquinas da colheita florestal exercem sobre os Argissolos.

EC320 com CFD	GSC 525	EC 320 com CV 380	EC 312 com GH
46,60 kPa ^(*)	153,13 kPa ⁽¹⁾ 459,38 kPa ⁽²⁾	46,80 kPa ^(*)	48,65 kPa ^(*)

EC320 com CFD= Escavadeira Caterpillar 320 com cabeçote de Feller de Disco direcional; GSC 525= Grapple Skidder Caterpillar 525; EC 320 com CV 380= Escavadeira Caterpillar 320 com cabeçote Valmet 380; EC 312 com GH= Escavadeira Caterpillar 312 com grua hidráulica; (*) = por esteira; (1) = roda dianteira; (2) = roda traseira .

A pressão que cada máquina exerce sobre o solo, foi calculada dividindo-se o peso total (peso da máquina vazia + peso do equipamento + capacidade de carga do equipamento) pela área de contato da esteira e do pneu.

Para o skidder Caterpillar 525 foi realizado o cálculo com base na distribuição de 75% de peso para eixo traseiro e 25% para o eixo dianteiro. Para as escavadeiras Caterpillar 312 e 320, foi realizado o cálculo com base na distribuição de 50% de peso para cada esteira.

Posteriormente, multiplicou-se o valor obtido em kgf por 0,0098 (kg m^{-2}), obtendo-se assim, o valor da pressão estática, em kPa, para cada máquina.

6.3.5 Teste de compressão uniaxial

Posteriormente à coleta das amostras, essas foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Então, realizou-se o toaleta nas amostras e, em seguida, parte delas foi saturada em

água por 24 horas. Na panela de pressão, 25 amostras (12 amostras do PVD típico e 13 amostras do AVD abrupto) foram equilibradas a 0,1 bar e 29 amostras (15 amostras do PVD típico e 14 amostras do AVD abrupto) foram equilibradas a 1,0 bar, com a utilização da câmara de pressão de *Richards* (KLUTE, 1986). Ainda, 70 amostras foram utilizadas com umidade de campo (2 amostras ficaram fora do teste, pois a estrutura das mesmas havia se rompido). As amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, no consolidômetro de modelo S-450 *Terraload* (*Durham Geo - Interprises*) com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. O ensaio consistiu na aplicação sucessiva e contínua de pressões crescentes e pré-estabelecidas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa (Figura 15).

Para cada carga aplicada, foi respeitado um intervalo de tempo de 5 minutos, pois, segundo Silva *et al.* (2000), mais de 99% da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga.

O deslocamento vertical, depois da aplicação de cada carga, foi medido no consolidômetro. Esse ensaio permitiu a obtenção da curva de compressão do solo, a qual é representada por um gráfico onde no eixo das abscissas são colocados os valores das pressões aplicadas em escala logarítmica e, no eixo das ordenadas, os valores da densidade do solo ou do índice de vazios em escala natural. Nessa curva, identifica-se o ponto de raio mínimo de curvatura e por ele traça-se uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva de compressão do solo. Do ângulo formado entre essas duas retas, traça-se a bissetriz, correspondendo à abscissa do ponto de intercessão da bissetriz com o prolongamento da reta de compressão virgem à pressão de pré-consolidação (σ_p) (DIAS JUNIOR, 2000; SILVA, REINERT e REICHERT, 2000).



Figura 10 – Prensa uniaxial - consolidômetro modelo S-450 *Terraload*.

Após o ensaio, as amostras foram colocadas em estufa para secagem a 105°C, por 24 horas. A partir da massa de solo seco em estufa e de volume do solo do cilindro, determinou-se a densidade do solo (D_s) (BLAKE e HARTGE, 1986) para cada pressão aplicada.

A densidade inicial (D_{si}) e ao final (D_{sf}) do teste de compressão uniaxial, a deformação do solo ao final do teste (Def), a umidade gravimétrica (U_{gi}) e o grau de saturação (G_{si}), antes do teste de compressão uniaxial foram calculados por meio do programa computacional *Compress* (REINERT, ROBAINA e REICHERT, 2003).

A pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão do solo (C_c), foram determinados pelo método de Casagrande (1936) com ajuste manual dos dados (método 2) no programa computacional *Compress* (REINERT, ROBAINA e REICHERT, 2003).

6.3.6 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada considerando o delineamento experimental inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos à análise de

variância e comparados pelo teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) a 5% de probabilidade. O programa computacional utilizado foi o *Statistical Analysis System*.

6.4 Resultados e Discussão

6.4.1 Comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico típico

No teste realizado por meio da utilização de amostras com umidade de campo, na camada de 0,025-0,05 m, a densidade do solo antes (Dsi) e ao final do teste de compressão uniaxial (Dsf) foi significativa, respectivamente, a 1% e 5% para os tratamentos.

Na camada de 0,10-0,125 m, a deformação do solo (Def), ao final do teste de compressão, foi significativa a 1%. (Tabela 18).

Tabela 18 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade inicial, da densidade final e da deformação do PVd típico.

Causa de variação	Dsi	Dsf	Def
Camada de 0,025 - 0,05 m			
Tratamento	7,16 **	4,71 *	3,24 ns
CV (%)	7,32	5,01	16,91
Camada de 0,10 - 0,125 m			
Tratamento	0,76 ns	1,21 ns	9,09 **
CV (%)	5,13	6,17	20,29

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; Dsi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial.

Na camada de 0,025-0,05 m o índice de compressão (Cc) foi significativo a 5%, enquanto que, no caso da camada de 0,10-0,125 m, apenas a umidade gravimétrica (Ugi) foi significativa (Tabela 19).

Tabela 19 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão para o PVd típico.

Causa de variação	Ugi	Gsi	σ_p	Cc
Camada de 0,025-0,05 m				
Tratamento	0,90 ns	3,03 ns	1,77 ns	6,91 **
CV (%)	12,11	21,19	40,69	19,74
Camada de 0,10-0,125 m				
Tratamento	8,37 **	2,38 ns	1,76 ns	4,07 ns
CV (%)	12,77	19,06	29,94	25,46

** significativo a 1%; ns = não significativo; Ugi = umidade gravimétrica antes do teste de compressão uniaxial; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

Embora alguns indicadores relacionados à estrutura do solo, como a densidade do solo antes do teste (Dsi), densidade do solo ao final do teste (Dsf), deformação do solo ao final do teste (Def) e índice de compressão (Cc) tenham sido significativos, a pressão de preconsolidação (σ_p) não apresentou o mesmo comportamento. Esse fato pode estar associado ao elevado coeficiente de variação dos valores de σ_p . Lima *et al.* (2004a) e Lima *et al.* (2004b) também verificaram elevados valores de coeficiente de variação para os valores de σ_p .

Para a camada de 0,025-0,05 m (Tabela 20), a densidade do solo antes do teste (Dsi), a densidade do solo ao final do teste (Dsf) e o índice de compressão (Cc) apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos. Independente da etapa da colheita florestal (corte, arraste ou estaleiramento da madeira), houve um aumento da Dsi em relação ao tratamento AC. Os maiores aumentos da densidade do solo ocorreram no Tratamento PE e no Tratamento PC, o que talvez esteja associado ao maior peso das máquinas, o correspondente a 21 toneladas cada uma.

A maior densidade do solo ao final do teste (Dsf) foi obtida no tratamento PE. Contudo, nas três etapas da colheita florestal (corte, arraste e estaleiramento da madeira), a diferença entre a densidade do solo ao final do teste (Dsf) e densidade do solo antes do teste (Dsi) foi semelhante, em torno de 0,40 Mg m⁻³.

Tabela 20 - Valores da densidade inicial, da densidade final, da deformação do solo, da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão do PVd típico.

Camada (m)	AC	PC	AF	PE
Dsi, Mg m ⁻³				
0,025-0,05	1,04 C	1,22 AB	1,09 BC	1,26 A
0,10-0,125	1,21 A	1,24 A	1,24 A	1,27 A
Dsf, Mg m ⁻³				
0,025-0,05	1,50 B	1,60 AB	1,49 B	1,66 A
0,10-0,125	1,61 A	1,60 A	1,51 A	1,53 A
Def, cm				
0,025-0,05	0,790 A	0,589 A	0,681 A	0,604 A
0,10-0,125	0,640 A	0,564 AB	0,412 BC	0,327 C
Ugi, kg kg ⁻¹				
0,025-0,05	0,219 A	0,236 A	0,229 A	0,207 A
0,10-0,125	0,240 A	0,249 A	0,185 B	0,174 B
Gsi, %				
0,025-0,05	39,10 A	56,96 A	44,27 A	52,07 A
0,10-0,125	55,83 A	60,59 A	45,81 A	45,38 A
σ_p , kPa				
0,025-0,05	53,08 A	50,35 A	84,33 A	78,77 A
0,10-0,125	87,53 A	84,55 A	66,95 A	54,87 A
Cc				
0,025-0,05	0,48 A	0,29 B	0,41 AB	0,31 B
0,10-0,125	0,35 A	0,31 A	0,21 A	0,22 A

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância. AC = antes da colheita florestal; PC = corte florestal; AF = arraste florestal; PE = estaleiramento da madeira. Dsi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Ugi = umidade gravimétrica antes do teste de compressão uniaxial; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

O solo apresentou maior suscetibilidade à compactação (C_c) no tratamento AC, enquanto que, nos tratamentos PC e PE, a suscetibilidade à compactação foi semelhante, fato que pode estar relacionado às elevadas pressões aplicadas ao solo por essas máquinas, elevando a densidade do solo nessas etapas da colheita. A maior suscetibilidade à compactação, antes do tráfego, pode ter ocorrido em função de o solo estar mais solto, ou mais desagregado, pela ação de raízes grandes e grossas.

Na camada de 0,10-0,125 m a deformação do solo após o teste (Def) e a umidade gravimétrica antes do teste (U_{gi}), apresentaram diferença estatística entre os tratamentos.

A maior deformação do solo ao final do teste (Def) ocorreu antes da colheita, em função de o solo estar mais solto e com maior espaço poroso. A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total do solo, especialmente a macroporosidade. Quanto maior a deformação do solo, maiores serão as reduções na macroporosidade e na porosidade total do solo (SILVA, REINERT e REICHERT, 2000). Como consequência disso, alguns prejuízos, para as plantas e meio ambiente, tal como a redução da aeração e da infiltração de água no solo, podem ocorrer. A menor U_{gi} foi obtida nos tratamentos AF e PE.

O PVd típico apresentou as maiores pressões de preconsolidação (σ_p) no tratamento AF, na camada de 0,025-0,05 m, e no tratamento AC, na camada de 0,10-0,125 m (Tabela 20), indicando uma maior capacidade de suporte de carga. Entretanto, a suscetibilidade do solo à compactação (C_c), nessas camadas, é maior quando comparadas aos demais tratamentos, o que indica que, ao haver o tráfego com o skidder (459,38 kPa), este tratamento e camadas sofrerão o efeito mais nocivo da compactação. A pressão estática que o skidder CAT 525 exerceu sobre o solo é potencializada pelos seguintes fatores: (i) o skidder apresenta um equipamento (garra) com maiores peso e capacidade de carga do que as escavadeiras; (ii) os pneus do mesmo possuem uma área de contato com o solo menor do que a área de contato referente às esteiras das escavadeiras.

Quanto maior a pressão que a máquina exerce sobre o solo, maior será a compactação ocorrida sobre esse. De acordo com Seixas (2002), entre os fatores que influenciam o nível de compactação estão o tamanho da roda, o peso e a função da máquina. Nesse sentido, Greacen e Sands (1980) realizaram estudos sobre a compactação do solo na atividade de arraste florestal por meio da utilização de um

skidder. Os autores detectaram uma pressão entre 85 kPa e 100 kPa. As interferências dinâmicas causadas pelo movimento da máquina e aquelas causadas pelo peso da madeira não foram desprezadas. Segundo os autores, a carga dinâmica, a pressão interna dos pneus e as múltiplas passadas da máquina afetam a densidade do solo, a qual varia significativamente de acordo com a classe de solo.

Quando se trata de máquinas grandes, a carga aplicada por eixo parece exceder a influência da pressão do pneu na compactação, principalmente na camada superficial de 20 a 50 cm (TAYLOR e BURT, 1987). Hakansson e Danfort (1981) consideram que cargas superiores a 6 toneladas por eixo podem causar séria compactação abaixo de 0,40 m.

O valor obtido para a pressão de preconsolidação pode estar associado ao percentual de serapilheira encontrado para o PVd típico, que apresentou 59% nas frações de tamanho > 8,0 mm e 16% para galhos, folhas e cascas (Tabela 16). Nesse sentido, Wronski (1990) concluiu que camadas de resíduos florestais proporcionavam uma redução significativa na formação de sulcos e aumento na capacidade de suporte do solo. Para cada 10 kg m⁻² adicionais de resíduo, colocados sobre outros 10 kg m⁻², havia um aumento de 25% na resistência do solo. Também, Seixas *et al.* (1995) detectaram reduções significativas na compactação do solo devido ao tráfego de um *forwarder* sobre a camada de resíduos da colheita de madeira. Coberturas de galhos e acículas com densidades de 10 e 20 kg m⁻² reduziram, em média, cerca de 40% do incremento na densidade do solo, observado em parcelas sem cobertura.

As camadas de resíduos da colheita de madeira proporcionam uma redução significativa na formação de sulcos e um aumento na capacidade de suporte do solo (SEIXAS, 2002). O autor realizou um estudo onde avaliou o tráfego de um trator agrícola equipado com grua e carreta sobre camadas de resíduos (10 kg m⁻² de casca, galhos e folhas) na colheita de *Eucalyptus grandis*. Também concluiu que a camada de resíduos reduziu, em média, 56% o nível de compactação, que foi medida pela densidade, até 17 cm de profundidade do solo.

O efeito da camada de resíduos florestais sobre a pressão de preconsolidação de um Latossolo Amarelo e de um Latossolo Vermelho foi avaliado por Silva *et al.* (2007). Os autores verificaram que, à medida que aumentou a intensidade de tráfego do *forwarder*, de duas para oito passadas, ocorreu degradação na estrutura do solo em todas as condições de disposição dos resíduos,

o que foi evidenciado pelo aumento dos valores das pressões de preconsolidação, principalmente para a condição de solo sem resíduo.

6.4.2 Comportamento compressivo do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto

Para a camada de 0,025-0,05 m das amostras com umidade de campo, nenhum parâmetro foi significativo a 5%, enquanto que, no caso da camada de 0,10-0,125 m, a deformação do solo, ao final do teste, foi significativa (Tabela 21).

Tabela 21 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da densidade inicial, da densidade final e da deformação do PVd abrupto.

Causa de variação	Dsi	Dsf	Def
Camada de 0,025-0,05 m			
Tratamento	0,76 ns	0,57 ns	1,03 ns
CV (%)	13,54	10,25	40,66
Camada de 0,10-0,125 m			
Tratamento	2,36 ns	0,37 ns	13,31 **
CV (%)	9,24	7,20	22,76

** significativo a 1%; ns = não significativo. Dsi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial.

Na camada de 0,025-0,05 m e amostras com umidade de campo, nenhum parâmetro foi significativo a 5%. No entanto, o índice de compressão do solo foi significativo na camada de 0,10-0,125 m (Tabela 22).

Tabela 22 - Valores de F, significância e coeficiente de variação da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão do PVd abrupto.

Causa de variação	Ugi	Gsi	σ_p	Cc
Camada de 0,025-0,05 m				
Tratamento	1,65 ns	0,90 ns	1,92 ns	0,72 ns
CV (%)	15,71	20,33	29,61	51,41
Camada de 0,10-0,125 m				
Tratamento	0,11 ns	1,70 ns	1,40 ns	8,11 **
CV (%)	24,05	20,26	19,61	31,99

** significativo a 1%; ns = não significativo; Ugi = umidade gravimétrica antes do teste de compressão uniaxial; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

As maiores deformação do solo ao final do teste (Def) e o índice de compressão (Cc) ocorreram na camada de 0,10-0,125 m do tratamento AC, ao passo que, no tratamento PC, a Def e o Cc foram semelhantes nas diferentes etapas da colheita (Tabela 23). Assim como no caso do PVd típico, a maior Def e Cc, ocorridas antes da colheita (tratamento AC), podem estar relacionadas ao fato de o solo estar mais solto, ou mais desagregado, pela ação das raízes. No PVd abrupto, talvez não ocorram diferenças entre as diferentes etapas da colheita devido à porosidade textural do solo, associada ao arranjo das partículas mais grosseiras que ele apresenta.

Tabela 23 - Valores da densidade inicial, da densidade final, da deformação do solo, da umidade gravimétrica inicial, do grau de saturação, da pressão de preconconsolidação e do índice de compressão do PVd abrupto.

Camada (m)	AC	PC	AF	PE
Dsi, Mg m ⁻³				
0,025-0,05	1,07 A	1,15 A	1,07 A	1,22 A
0,10-0,125	1,16 A	1,34 A	1,28 A	1,19 A
Dsf, Mg m ⁻³				
0,025-0,05	1,41 A	1,52 A	1,40 A	1,45 A
0,10-0,125	1,57 A	1,55 A	1,52 A	1,49 A
Def, cm				
0,025-0,05	0,713 A	0,613 A	0,628 A	0,399 A
0,10-0,125	0,784 A	0,334 B	0,430 B	0,456 B
Ugi, kg kg ⁻¹				
0,025-0,05	0,268 A	0,254 A	0,226 A	0,215 A
0,10-0,125	0,241 A	0,226 A	0,229 A	0,247 A
Gsi, %				
0,025-0,05	52,09 A	54,36 A	43,38 A	52,17 A
0,10-0,125	49,48 A	65,86 A	59,18 A	55,84 A
σ_p , kPa				
0,025-0,05	40,53 A	69,27 A	61,23 A	57,30 A
0,10-0,125	86,16 A	73,98 A	69,40 A	65,45 A
Cc				
0,025-0,05	0,35 A	0,37 A	0,37 A	0,20 A
0,10-0,125	0,41 A	0,16 B	0,19 B	0,29 AB

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. AC = antes da colheita florestal; PC = corte florestal; AF = arraste florestal; PE = estaleiramento da madeira. Dsi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Ugi = umidade gravimétrica antes do teste de compressão uniaxial; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconconsolidação; Cc = índice de compressão.

A compressibilidade do solo é menos pronunciada em solos com estrutura grosseira e menos agregada (HORN e LEBERT, 1994). Os autores afirmam que, dentre os fatores dos quais depende a resistência do solo, estão: a distribuição do tamanho de partículas, o tipo de argilo-mineral, o conteúdo e o tipo de substâncias orgânicas, a distribuição de raízes, a densidade, a distribuição do tamanho de poros, a continuidade dos poros e agregados e a água no solo.

A uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressivo quanto menor a densidade e menor o potencial de água. Solos com estrutura grosseira apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação) (LIMA *et al.*, 2004a). Solos formados por partículas de diferentes tamanhos, em geral, são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores (TORRES, ODILON E GALERANI, 1993). Segundo os autores (*ibidem*), a intensidade da compactação nos solos é resultante das características de cada solo, aliadas a compactação causada pelos veículos, dos implementos e teores de umidade do solo.

Uma classificação, para a pressão de pré-consolidação, baseada em solos revolvidos da Alemanha, foi apresentada por Horn e Fleige (2003). Essa classificação foi obtida através de funções de pedotransferência, que consideravam a umidade, a densidade e os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os referidos autores classificaram a pressão de pré-consolidação em muito baixa (< 30 kPa), baixa (30-60 kPa), média (60-90 kPa), alta (90-120 kPa), muito alta (120-150 kPa) e extremamente alta (> 150 kPa). Pelos resultados obtidos nesse estudo, os solos avaliados apresentaram uma σ_p média, com valores entre 61,23 e 84,33 kPa.

Nas camadas de 0,025-0,05 m e de 0,10-0,125 m, o PVd abrupto apresentou as maiores pressões de preconsolidação (σ_p) no tratamento PC e no tratamento AC, respectivamente (Tabela 22).

Porém, os valores referentes à suscetibilidade do solo à compactação foram maiores nesses tratamentos, apesar da maior capacidade de suporte do solo à compactação dos mesmos.

O conjunto escavadeira CAT 320 com cabeçote de feller exerceu sobre o solo a menor pressão estática entre as máquinas avaliadas (46,60 kPa). Apesar do peso dessa ser maior do que os pesos do skidder e da escavadeira Cat 312, a área e contato entre a máquina e o solo é maior e a capacidade de carga da mesma é menor quando comparada às demais.

Assim, Seixas (2002) enfatiza que a distribuição da pressão no solo, sob as rodas dos veículos, depende do peso do veículo, o qual irá determinar a força total sobre o solo e da área de contato entre a roda e o solo, que irá determinar a pressão e da distribuição da força na área de contato.

Tomando como base o tratamento testemunha é possível dizer que os demais tratamentos sofreram efeito da compactação, pois o índice de compressão reduziu mais da metade, praticamente, exceto o tratamento PE, indicando a presença de compactação. Aliado a isso, a pressão de preconsolidação desses tratamentos foram superiores ao tratamento AC.

O valor obtido para a pressão de preconsolidação pode estar associado ao percentual de serapilheira encontrado para o PVd abruptico, que apresentou 35% na fração de tamanhos entre 8,0-4,0 mm e 18% para a fração de tamanhos entre 4,0-2,0 mm (Tabela 16).

Portanto, uma alternativa para minimizar o impacto do tráfego na estrutura dos solos sob colheita florestal consiste na utilização dos resíduos florestais (SEIXAS *et al.*, 1998). Segundo McMahon e Evanson (1994), a finalidade do uso desses resíduos é que eles distribuem as pressões aplicadas, de tal forma a evitar que a capacidade de suporte de carga do solo seja superada, o que reduziria o risco da compactação e a formação de sulcos pelos rodados das máquinas.

6.4.3. Grau de saturação do Argissolo Vermelho Distrófico típico

Para obter diferentes classes de grau de saturação, foram utilizadas amostras coletadas nas camadas de 0,025-0,05 m e 0,10-0,125 m, equilibradas na tensão de 0,1 e 1 bar, e amostras com a umidade de campo, perfazendo um total de 56 amostras.

Obtiveram-se as seguintes classes de grau de saturação: classe 1 (< 34%); classe 2 (35-39%); classe 3 (40-44%); classe 4 (45-49%); classe 5 (50-54%); classe 6 (55-59%); classe 7 (60-64%); classe 8 (65-69%) e classe 9 (>70%). No caso específico desse solo, não foram obtidas amostras com grau de saturação da classe 9 (>70%).

Os valores de densidade do solo ao final do teste (D_{sf}) e pressão de pré-consolidação (σ_p) não foram significativos para as classes de grau de saturação do solo, ao passo que a deformação do solo ao final do teste (Def) foi significativa a 5%, e o índice de compressão (C_c) foi significativo a 1% para as classes de grau de saturação (Tabela 24).

Tabela 24 - Valores de F, significância, coeficiente de variação e diferença mínima significativa da densidade final, da deformação do solo, da pressão de pré-consolidação e do índice de compressão para as classes de grau de saturação do PVd típico.

Causa de variação	D_{sf}	Def	σ_p	C_c
Classes de Gsi	1,75 ns	2,31 *	2,16 ns	4,77 **
CV (%)	6,27	25,81	36,97	30,60
DMS 5%	0,17	0,26	38,75	0,20

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; D_{sf} = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de pré-consolidação; C_c = índice de compressão.

Ainda que não tenham sido significativas, as maiores densidade do solo ao final do teste de compressão (D_{sf}) e a pressão de pré-consolidação (σ_p) ocorreram, respectivamente, na classe de grau de saturação 5 e 6, com um valor de aproximadamente $1,68 \text{ Mg m}^{-3}$ e 80 kPa (Figura 11).

A deformação do solo (Def) foi maior nas classes de graus de saturação 3 e 5, com um valor de aproximadamente 0,07 m.

O máximo valor de índice de compressão (C_c) obtido, aproximadamente de 0,5, ocorreu na classe com grau de saturação 1. Nota-se, com base nos resultados

da deformação do solo (Def) e do índice de compressão (Cc), que o solo deve ser trafegado na classe 8 de grau de saturação (65-69%), para evitar maiores deformações e suscetibilidade do solo à compactação.

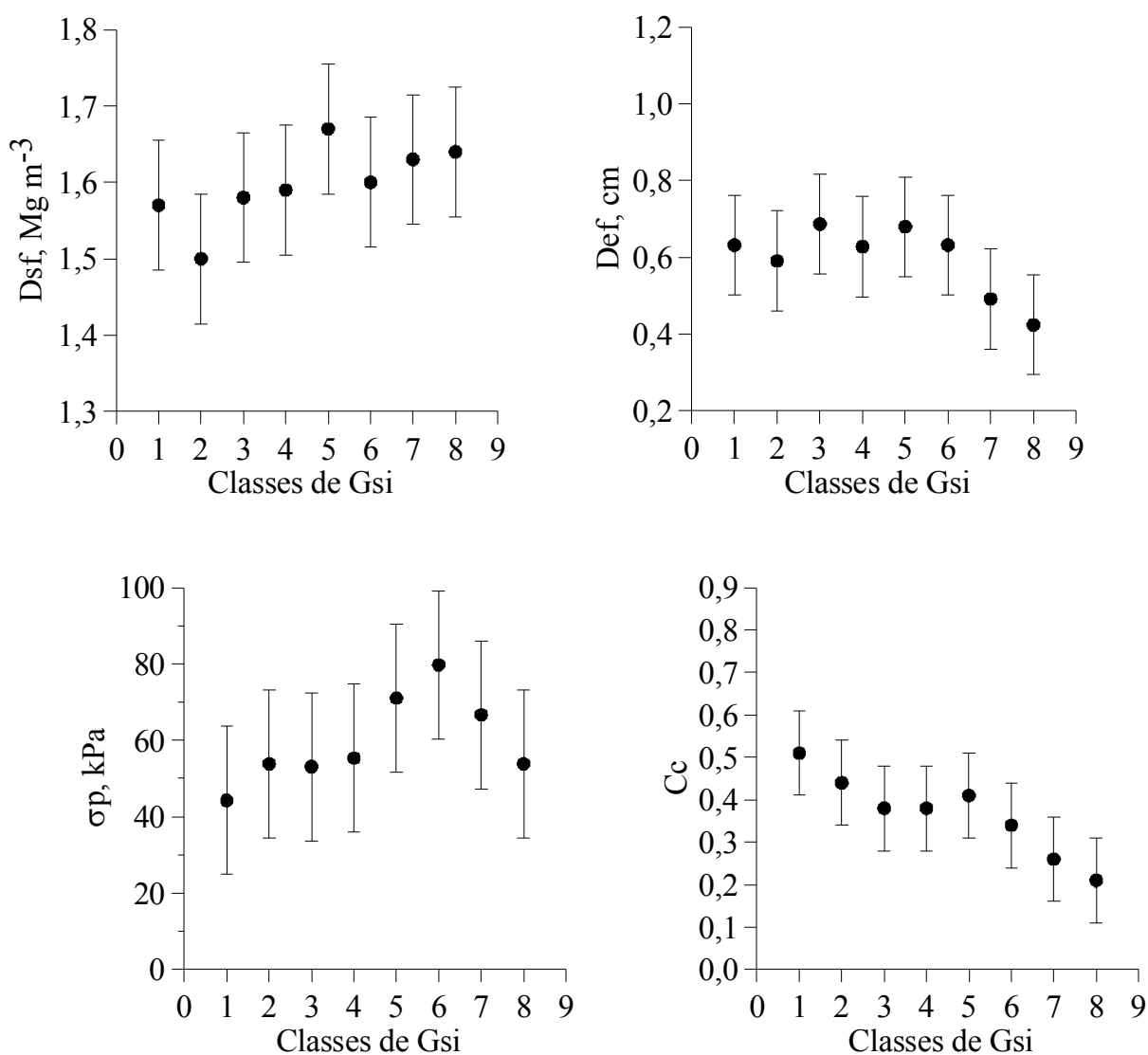


Figura 11 - Valores médios da densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Dsf) **(a)**; deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) **(b)**; pressão de pré-consolidação (σ_p) **(c)** e índice de compressão (C_c) **(d)** em função das classes de grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial (Classes de Gsi: 1 = < 34%; 2 = 35-39%; 3 = 40-44%; 4 = 45-49%; 5 = 50-54%; 6 = 55-59%; 7 = 60-64%; 8 = 65-69%; 9 = >70%) do PVd típico.

6.4.4 Grau de saturação do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto

Para obter diferentes classes de grau de saturação, foram utilizadas amostras coletadas nas camadas de 0,025-0,05 m e 0,10-0,125 m, equilibradas na tensão de 0,1 e 1 bar, e amostras com a umidade de campo, perfazendo um total de 47 amostras.

Obtiveram-se as seguintes classes de grau de saturação: classe 1 (< 34%); classe 2 (35-39%); classe 3 (40-44%); classe 4 (45-49%); classe 5 (50-54%); classe 6 (55-59%); classe 7 (60-64%); classe 8 (65-69%) e classe 9 (>70%). No caso específico desse solo, não foram obtidas amostras com grau de saturação da classe 2 (35 – 39%).

Para as classes de grau de saturação do solo, a densidade do solo ao final do teste (Dsf), a deformação do solo (Def) e o índice de compressão (Cc) foram significativos a 1% (Tabela 25).

Tabela 25 - Valores de F, significância, coeficiente de variação e diferença mínima significativa da densidade final, da deformação do solo, da pressão de preconsolidação e do índice de compressão para as classes de grau de saturação do PVd abrupto.

Causa de variação	Dsf	Def	σ_p	Cc
Classes de Gsi	3,43 **	4,35 **	1,75 ns	8,93 **
CV (%)	6,79	31,26	32,76	31,28
DMS 5%	0,19	0,33	40,97	0,21

** significativo a 1%; ns = não significativo; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

A maior densidade do solo ao final do teste (Dsf) foi detectada na classe de grau de saturação 8, com um valor de aproximadamente $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, diferindo da classe 1 (< 34%). A deformação do solo (Def) foi maior na classe de grau de saturação 1, com um valor próximo a 0,09 m (Figura 12).

O solo apresentou a maior pressão de pré-consolidação (σ_p) na classe de saturação 6, com um valor de, aproximadamente, 75 kPa.

O maior valor de índice de compressão do solo (C_c) ocorreu na classe 1 de grau de saturação, com valor próximo a 0,6.

A classe de grau de saturação 6 (55 – 59%) apresentou os maiores valores de pressão de pré-consolidação (σ_p), em ambos os solos analisados. Essa faixa de grau de saturação está próxima à obtida por Secco (2003). Esse autor observou um incremento médio na pressão de pré-consolidação à medida que ocorreu redução no grau de saturação de água de 91 para 58% em um Latossolo Vermelho Distrófico típico (550 g kg⁻¹ argila) e de 93 para 68% para um Latossolo Vermelho Distroférrico típico (610 g kg⁻¹ argila), sugerindo que, quanto mais seco estiver o solo, maior será sua capacidade de suporte em função de as partículas e/ou dos agregados estarem mais coesos.

Para um grau de saturação inferior a 45% e 60%, respectivamente para o primeiro e segundo solo, a pressão de pré-consolidação foi pouco influenciada pela água. De acordo com o autor (*ibidem*), em solo úmido, a água atua como lubrificante entre as partículas, deixando o solo mais macio, alterando a consistência e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de suporte de carga.

A densidade ao final do teste (D_{sf}) apresentou um comportamento crescente com aumento do grau de saturação em água, enquanto a deformação do solo (D_{ef}) e o índice de compressão (C_c) tiveram os seus valores reduzidos com aumento do grau de compactação. A pressão de pré-consolidação (σ_p) apresentou um valor máximo nas classes intermediárias de grau de saturação, tendo os menores valores nos extremos.

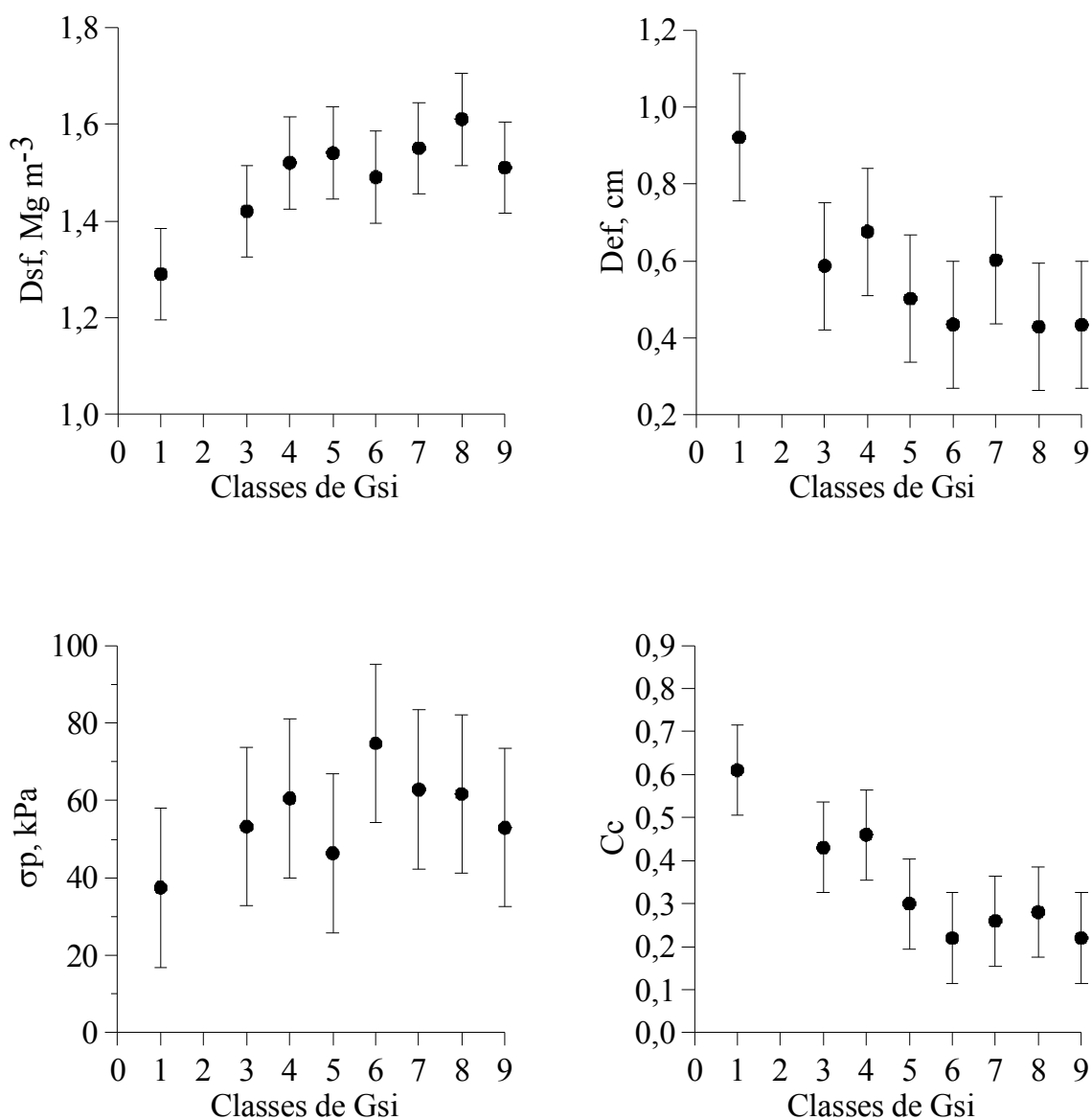


Figura 12 - Valores médios da densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Dsf) **(a)**; deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) **(b)**; pressão de preconsolidação (σ_p) **(c)** e índice de compressão (C_c) **(d)** em função das classes de grau de saturação antes do teste de compressão uniaxial do PVd abrupto (Classes de Gsi: 1 = < 34%; 2 = 35-39%; 3 = 40-44%; 4 = 45-49%; 5 = 50-54%; 6 = 55-59%; 7 = 60-64%; 8 = 65-69%; 9 = >70%).

6.5 Conclusões

As maiores deformação e suscetibilidade do solo à compactação ocorreram antes da colheita florestal e reduziram com o aumento do nível de compactação.

Considerando a deformação do solo e o índice de compressão, o Argissolo Vermelho Distrófico típico deve ser trafegado com grau de saturação de 65 a 69%, para evitar maiores deformações e reduzir a suscetibilidade do solo à compactação.

Para um grau de saturação inferior a 50%, a pressão de pré-consolidação foi pouco influenciada pelo grau de saturação.

A densidade do solo ao final do teste de compressão apresentou um comportamento crescente com aumento do grau de saturação em água. Porém, a deformação do solo e o índice de compressão tiveram seus valores reduzidos com aumento do grau de saturação.

A pressão de pré-consolidação apresentou um valor máximo nas classes intermediárias de grau de saturação, tendo os menores valores nos extremos das classes de grau de saturação definidas nesse trabalho.

6.6 Bibliografia Citada

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge, ICSMFE, 1936. v.3. p.60-64.

DA SILVA, A.J.N; CABEDA, M.S.V.: Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.30, n.6, 2006.

DA ROSA, D.P.: **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Tese (Doutorado em Crop and Soil Science), Michigan State University, Michigan. 1994.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.H. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M. S. Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 55-162, 2000.

HAKANSSON, I.; DANFORTH, B. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ISTVS, 7, Calgary, 1981. Proceedings, 1981, vol. I p.239-253.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, v.11, p.53-71, 1988. Supplement.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact offload on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Tillage Research**, v.73, p.89-99, 2003.

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

IMHOFF, S. *et al.* Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.11-18, 2001.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KONDO, M.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

LANÇAS, K.P. *et al.* Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**. v.35 n.2, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103782005000200018&script=sci_arttext&lng=

LANÇAS, K.P. **Tráfego, tração e compactação: otimização e desafios**. XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/cbcs/palestras/KleberLancas.pdf>.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v.19, p.275-286, 1991.

LIMA, C.L.R. *et al.* Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.409-414, 2004a.

LIMA, C.L.R. *et al.* Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004b.

MCCMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. **Logging Industry Research Organisation Report**, V.9, P.1-8, 1994.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a duas pressões diferentes, ESALQ. 1998.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, v.9, p.50-52, 1996.

PEREIRA, J.O. *et al.* Pressão de pré-compressão e comportamento hídrico de um Nitossolo Vermelho distroférico em função do tamanho de agregados. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, p. 513-519, 2005.

REAVES, C.A. & COOPER, A.W. – Stress distribution in soil under tractor loads. **Agr. Eng.**, 41: 20-1, 31, 1960.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. 1990. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Michigan State University, Michigan, 1990.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle**. Piracicaba: IPEF, 1988. p.1-10, (Circular Técnica IPEF, n. 163).

SEIXAS, F. *et al.* Effect of slash on forwarder soil compaction. In: Proceedings of the 1995 COFE Annual Meeting. COFE, Cashiers, NC, p: 77-86, 1995.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.; SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário de madeira. **Scientia Forestalis**, v.54, p.9-16, 1998.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, A.R.; *et al.* Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.1, p.89-93, 2007.

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

TALOR, H.T.; BURT, E.C. Total axle load effects on soil compaction. *J. Terramech*, Hannover, 24: 179-186, 1987.

TORRES, E.; ODILON, F.S.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71p. (Circular Técnica, 12).

WEAVER, H.A. – Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. *Agr. Eng.*, 31: 182-3, 1950.

7 CONCLUSÃO GERAL

A colheita florestal apresentou impacto na qualidade estrutural do solo com diferentes graus de intensidade para cada operação. As operações que utilizaram as máquinas mais pesadas e/ou que provocavam maior pressão sobre o solo compactaram mais, sendo que a resposta do solo foi variável, embora em menor escala que as operações, em função do tipo de solo.

O impacto da compactação foi maior na condutividade hidráulica do solo saturado, que esteve associada à macroporosidade e esta a densidade do solo.

8 SUGESTÕES

Ao término deste estudo e com base nos resultados, sugere-se à empresa a análise dos seguintes aspectos:

- ❖ manter os resíduos da colheita florestal no solo do povoamento, pois a serapilheira proporciona uma redução significativa na formação de sulcos e um aumento na capacidade de suporte do solo em função da pressão exercida pelas máquinas;
- ❖ estudar a viabilidade técnica e econômica da utilização de tratores de esteiras, dos tipos *tracked skidder* ou *clambunk*, com a finalidade de verificar qual dos dois exerce menor impacto sobre a compactação dos solos.
- ❖ dentro do talhão, concentrar o tráfego do *skidder* na menor área possível, de forma a diminuir o tamanho da área afetada. Apesar das trilhas determinadas para o arraste atingirem níveis mais altos de compactação, haverá uma redução na extensão do solo compactado.
- ❖ reduzir a pressão de contato dos pneus do *skidder* para menos de 200 kPa, tanto quanto for possível, uma vez que segundo os dados fornecidos pela empresa a pressão de inflação da máquina corresponde a 35 psi.
- ❖ utilizar pneus mais largos, pois esses distribuem o peso da máquina sobre o solo, proporcionando uma maior área de contato.

APÊNDICES

TABELA 26 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
DS (Mg m^{-3})							
Antes da colheita florestal							
00-05	0,96	0,99	0,93	0,97	1,05	1,17	1,01
05-10	1,10	1,10	1,20	1,15	1,10	1,20	1,14
10-20	1,10	1,03	1,10	1,15	1,17	1,22	1,13
20-30	1,19	1,14	1,12	1,14	1,17	1,13	1,15
30-40	1,12	1,02	1,20	1,10	1,22	1,21	1,14

Ds = densidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 27 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Ds (Mg m^{-3})					
Corte florestal					
00-05	1,27	1,28	1,13	1,13	1,20
05-10	1,25	1,28	1,27	1,28	1,27
10-20	1,25	1,21	1,29	1,17	1,23
20-30	1,21	1,22	1,28	1,27	1,24
30-40	1,23	1,16	1,29	1,25	1,23
Arraste com uma passada					
00-05	1,26	1,13	1,17	1,25	1,20
05-10	1,25	1,20	1,17	1,25	1,22
10-20	1,24	1,25	1,20	1,20	1,22
20-30	1,14	1,20	1,20	1,23	1,19
30-40	1,23	1,24	1,23	1,21	1,23
Arraste com três passadas					
00-05	1,55	1,50	1,60	1,55	1,55
05-10	1,48	1,52	1,58	1,50	1,52
10-20	1,39	1,44	1,56	1,45	1,46
20-30	1,48	1,30	1,55	1,50	1,46
30-40	1,50	1,20	1,56	1,46	1,43
Estaleiro					
00-05	1,18	1,20	1,20	1,20	1,20
05-10	1,31	1,38	1,20	1,36	1,31
10-20	1,24	1,31	1,15	1,38	1,27
20-30	1,27	1,31	1,25	1,25	1,27
30-40	1,34	1,37	1,30	1,24	1,31

Ds = densidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 28 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Ug (Kg Kg^{-1})							
Antes da Colheita							
00-05	0,261	0,273	0,277	0,271	0,268	0,285	0,272
05-10	0,290	0,294	0,253	0,274	0,278	0,278	0,278
10-20	0,274	0,280	0,332	0,270	0,265	0,300	0,287
20-30	0,271	0,275	0,299	0,280	0,287	0,306	0,286
30-40	0,286	0,312	0,280	0,297	0,290	0,308	0,295

Ug = umidade gravimétrica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 29 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Ug (Kg Kg^{-1})					
Corte					
00-05	0,273	0,278	0,280	0,267	0,275
05-10	0,228	0,252	0,291	0,274	0,261
10-20	0,292	0,285	0,294	0,288	0,290
20-30	0,306	0,286	0,284	0,279	0,289
30-40	0,279	0,285	0,279	0,284	0,282
Arraste com uma passada					
00-05	0,294	0,247	0,257	0,243	0,261
05-10	0,264	0,277	0,286	0,277	0,276
10-20	0,270	0,285	0,286	0,298	0,285
20-30	0,292	0,282	0,279	0,279	0,283
30-40	0,292	0,282	0,335	0,292	0,300
Arraste com três passadas					
00-05	0,191	0,231	0,181	0,170	0,193
05-10	0,198	0,225	0,181	0,177	0,195
10-20	0,342	0,229	0,196	0,193	0,240
20-30	0,199	0,270	0,197	0,198	0,216
30-40	0,211	0,266	0,205	0,220	0,225
Estaleiro					
00-05	0,270	0,299	0,265	0,259	0,273
05-10	0,260	0,266	0,253	0,278	0,264
10-20	0,282	0,283	0,265	0,277	0,277
20-30	0,274	0,268	0,212	0,290	0,261
30-40	0,273	0,276	0,293	0,300	0,285

Ug = umidade gravimétrica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 30 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Pt ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da Colheita Florestal							
00-05	0,577	0,626	0,611	0,602	0,512	0,517	0,574
05-10	0,547	0,590	0,480	0,512	0,582	0,430	0,523
10-20	0,509	0,577	0,569	0,470	0,502	0,525	0,525
20-30	0,498	0,530	0,507	0,526	0,542	0,456	0,510
30-40	0,508	0,590	0,523	0,510	0,444	0,461	0,506

Pt = porosidade total do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 31 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Pt ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,474	0,457	0,543	0,528	0,500
05-10	0,455	0,468	0,470	0,470	0,465
10-20	0,494	0,478	0,467	0,500	0,485
20-30	0,517	0,459	0,466	0,457	0,475
30-40	0,473	0,516	0,445	0,460	0,474
Arraste com uma passada					
00-05	0,502	0,538	0,518	0,485	0,511
05-10	0,486	0,500	0,515	0,500	0,500
10-20	0,483	0,504	0,487	0,520	0,499
20-30	0,541	0,508	0,500	0,457	0,502
30-40	0,480	0,479	0,516	0,504	0,495
Arraste com três passadas					
00-05	0,400	0,368	0,366	0,377	0,378
05-10	0,416	0,388	0,351	0,404	0,390
10-20	0,438	0,392	0,366	0,404	0,400
20-30	0,395	0,454	0,369	0,374	0,398
30-40	0,389	0,506	0,381	0,400	0,419
Estaleiro					
00-05	0,513	0,506	0,520	0,505	0,511
05-10	0,470	0,407	0,501	0,442	0,455
10-20	0,493	0,448	0,514	0,424	0,470
20-30	0,460	0,439	0,419	0,370	0,422
30-40	0,459	0,451	0,465	0,493	0,467

Pt = porosidade total do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 32 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Mac ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da colheita florestal							
00-05	0,216	0,2352	0,2442	0,2642	0,1883	0,1249	0,212
05-10	0,160	0,2077	0,0976	0,1175	0,2457	0,0339	0,144
10-20	0,124	0,1847	0,1300	0,0931	0,1351	0,0695	0,123
20-30	0,115	0,1539	0,0986	0,1468	0,1627	0,0632	0,123
30-40	0,129	0,2203	0,1299	0,1259	0,0584	0,0586	0,120

Mac = macroporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 33 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Mac ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,042	0,042	0,138	0,137	0,090
05-10	0,112	0,181	0,059	0,072	0,081
10-20	0,077	0,069	0,045	0,104	0,074
20-30	0,110	0,045	0,039	0,051	0,061
30-40	0,081	0,137	0,041	0,042	0,075
Arraste com uma passada					
00-05	0,056	0,177	0,134	0,072	0,110
05-10	0,061	0,121	0,117	0,070	0,092
10-20	0,100	0,100	0,087	0,093	0,095
20-30	0,148	0,115	0,093	0,051	0,102
30-40	0,072	0,076	0,093	0,088	0,082
Arraste com três passadas					
00-05	0,039	0,013	0,017	0,025	0,024
05-10	0,041	0,018	0,025	0,044	0,032
10-20	0,089	0,030	0,029	0,045	0,048
20-30	0,067	0,057	0,035	0,031	0,048
30-40	0,040	0,168	0,040	0,055	0,076
Estaleiro					
00-05	0,138	0,069	0,099	0,214	0,102
05-10	0,078	0,005	0,124	0,029	0,059
10-20	0,108	0,028	0,137	0,019	0,073
20-30	0,068	0,046	0,114	0,016	0,061
30-40	0,064	0,037	0,066	0,083	0,062

Mac = macroporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 34 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Mic ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da Colheita Florestal							
00-05	0,362	0,391	0,366	0,338	0,324	0,393	0,362
05-10	0,387	0,383	0,382	0,394	0,336	0,397	0,380
10-20	0,384	0,392	0,439	0,377	0,366	0,468	0,392
20-30	0,383	0,376	0,408	0,379	0,379	0,392	0,386
30-40	0,380	0,370	0,394	0,384	0,386	0,403	0,386

Mic = microporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 35 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Mic ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,432	0,415	0,405	0,391	0,411
05-10	0,342	0,199	0,411	0,398	0,383
10-20	0,417	0,409	0,422	0,396	0,411
20-30	0,407	0,414	0,427	0,407	0,414
30-40	0,392	0,379	0,404	0,418	0,398
Arraste com uma passada					
00-05	0,446	0,360	0,384	0,413	0,400
05-10	0,425	0,379	0,399	0,430	0,408
10-20	0,383	0,405	0,400	0,427	0,404
20-30	0,392	0,393	0,407	0,407	0,400
30-40	0,407	0,403	0,423	0,416	0,412
Arraste com três passadas					
00-05	0,361	0,356	0,349	0,351	0,354
05-10	0,375	0,370	0,325	0,360	0,358
10-20	0,348	0,362	0,336	0,358	0,351
20-30	0,328	0,397	0,334	0,343	0,350
30-40	0,349	0,339	0,342	0,346	0,344
Estaleiro					
00-05	0,375	0,433	0,421	0,253	0,410
05-10	0,391	0,402	0,377	0,413	0,396
10-20	0,385	0,421	0,377	0,405	0,397
20-30	0,392	0,394	0,305	0,354	0,361
30-40	0,395	0,414	0,398	0,410	0,404

Mic = microporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 36 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
$K_{\theta s}$ (mm.h^{-1})							
Antes da colheita florestal							
00-05	206,33	406,55	437,74	151,14	242,07	1,97	240,97
05-10	3,88	98,15	0,00	0,00	693,15	0,00	132,53
10-20	0,00	0,10	35,79	0,00	8,63	8,90	8,90
20-30	0,55	0,00	37,46	217,99	51,84	0,00	51,31
30-40	0,00	464,86	0,26	0,57	0,00	0,00	77,61

$K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 37 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico típico após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
$K_{\theta s}$ (mm.h^{-1})					
Corte					
00-05	0,00	0,00	7,05	12,95	5,00
05-10	0,00	18,49	0,00	55,47	18,49
10-20	0,19	0,00	0,00	0,09	0,07
20-30	0,00	0,00	0,26	0,00	0,06
30-40	0,00	11,24	0,00	0,00	2,81
Arraste com uma passada					
00-05	0,00	66,96	2,09	4,74	18,45
05-10	0,00	0,36	32,16	0,52	8,26
10-20	0,09	0,17	0,00	0,00	0,06
20-30	4,51	0,00	0,00	0,00	1,13
30-40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arraste com três passadas					
00-05	0,00	0,00	0,00	0,35	0,09
05-10	1,74	0,35	0,00	0,00	0,52
10-20	6,96	3,26	0,00	0,88	2,77
20-30	0,00	0,56	0,00	0,00	0,14
30-40	0,00	50,98	5,79	0,00	14,19
Estaleiro					
00-05	20,62	0,00	14,64	11,75	11,75
05-10	6,04	0,00	5,82	0,00	2,96
10-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-30	0,00	14,60	0,00	0,36	3,74
30-40	0,00	0,00	0,00	2,20	0,55

$K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 38 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Ds (Mg m^{-3})							
Antes da colheita florestal							
00-05	0,79	0,98	1,02	1,05	1,20	0,85	0,98
05-10	1,07	1,08	1,35	1,30	1,07	1,09	1,16
10-20	1,08	1,04	1,23	1,28	0,93	1,12	1,11
20-30	1,22	1,15	1,08	1,17	1,20	1,11	1,16
30-40	1,17	1,21	1,21	1,25	1,20	1,18	1,20

Ds = densidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 39 - Valores médios da densidade (Mg m^{-3}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Ds (Mg m^{-3})					
Corte florestal					
00-05	1,20	1,31	1,20	1,18	1,22
05-10	1,30	1,40	1,39	1,38	1,37
10-20	1,28	1,29	1,17	1,14	1,22
20-30	1,28	1,23	1,18	1,18	1,22
30-40	1,30	1,17	1,23	1,14	1,21
Arraste com uma passada					
00-05	1,06	0,78	1,30	1,11	1,06
05-10	1,32	1,20	1,25	1,24	1,25
10-20	1,13	1,16	1,17	1,14	1,15
20-30	1,24	1,15	1,12	1,25	1,19
30-40	1,35	1,23	1,23	1,28	1,27
Arraste com várias passadas					
00-05	1,16	1,09	1,27	1,20	1,18
05-10	1,24	1,17	1,25	1,16	1,20
10-20	1,17	1,18	1,27	1,18	1,20
20-30	1,26	1,20	1,33	1,23	1,25
30-40	1,19	1,16	1,26	1,19	1,20
Estaleiro					
00-05	1,11	1,22	1,04	1,04	1,10
05-10	1,21	1,20	1,23	1,16	1,20
10-20	1,10	1,28	1,22	1,07	1,17
20-30	1,18	1,35	1,27	1,19	1,25
30-40	1,14	1,34	1,31	1,18	1,24

Ds = densidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 40 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Ug (Kg Kg^{-1})							
Antes da Colheita							
00-05	0,310	0,299	0,299	0,414	0,278	0,396	0,333
05-10	0,318	0,343	0,277	0,324	0,360	0,348	0,328
10-20	0,304	0,336	0,299	0,312	0,377	0,326	0,326
20-30	0,379	0,335	0,344	0,346	0,264	0,325	0,332
30-40	0,270	0,335	0,311	0,310	0,309	0,317	0,309

Ug = umidade gravimétrica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 41 - Valores médios da umidade gravimétrica (Kg Kg^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Ug (Kg Kg^{-1})					
Corte					
00-05	0,345	0,278	0,300	0,253	0,294
05-10	0,178	0,241	0,261	0,260	0,235
10-20	0,335	0,286	0,302	0,319	0,310
20-30	0,290	0,298	0,319	0,318	0,306
30-40	0,287	0,280	0,278	0,319	0,291
Arraste com uma passada					
00-05	0,315	0,348	0,261	0,296	0,305
05-10	0,282	0,311	0,529	0,303	0,356
10-20	0,316	0,310	0,300	0,315	0,310
20-30	0,289	0,315	0,300	0,287	0,298
30-40	0,285	0,345	0,293	0,276	0,300
Arraste com três passadas					
00-05	0,354	0,384	0,351	0,370	0,365
05-10	0,358	0,383	0,354	0,380	0,369
10-20	0,364	0,373	0,330	0,361	0,357
20-30	0,335	0,358	0,315	0,340	0,337
30-40	0,357	0,349	0,327	0,340	0,343
Estaleiro					
00-05	0,373	0,349	0,400	0,430	0,388
05-10	0,361	0,348	0,361	0,401	0,368
10-20	0,388	0,324	0,320	0,416	0,362
20-30	0,344	0,284	0,330	0,341	0,325
30-40	0,334	0,285	0,298	0,335	0,313

Ug = umidade gravimétrica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira.

TABELA 42 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Pt ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da Colheita Florestal							
00-05	0,612	0,564	0,574	0,470	0,486	0,650	0,559
05-10	0,556	0,531	0,444	0,476	0,540	0,547	0,516
10-20	0,555	0,550	0,549	0,463	0,586	0,547	0,541
20-30	0,563	0,530	0,558	0,533	0,481	0,535	0,533
30-40	0,391	0,507	0,504	0,474	0,473	0,491	0,473

Pt = porosidade total do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 43 - Valores médios da porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abruptico.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Pt ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,500	0,473	0,474	0,432	0,470
05-10	0,454	0,431	0,573	0,438	0,441
10-20	0,469	0,466	0,510	0,506	0,488
20-30	0,467	0,490	0,500	0,520	0,494
30-40	0,456	0,509	0,496	0,512	0,493
Arraste com uma passada					
00-05	0,566	0,646	0,448	0,532	0,548
05-10	0,441	0,470	0,496	0,492	0,475
10-20	0,524	0,527	0,525	0,525	0,525
20-30	0,485	0,504	0,541	0,517	0,512
30-40	0,453	0,510	0,473	0,476	0,478
Arraste com três passadas					
00-05	0,513	0,536	0,481	0,501	0,507
05-10	0,503	0,514	0,492	0,513	0,505
10-20	0,508	0,499	0,456	0,504	0,492
20-30	0,487	0,515	0,483	0,509	0,498
30-40	0,502	0,519	0,476	0,462	0,490
Estaleiro					
00-05	0,537	0,494	0,508	0,527	0,516
05-10	0,489	0,478	0,486	0,517	0,492
10-20	0,514	0,490	0,513	0,549	0,517
20-30	0,510	0,453	0,479	0,508	0,487
30-40	0,514	0,455	0,461	0,521	0,488

Pt = porosidade total do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 44 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Mac ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da Colheita Florestal							
00-05	0,249	0,170	0,182	0,030	0,080	0,200	0,152
05-10	0,180	0,093	0,031	0,028	0,110	0,100	0,090
10-20	0,180	0,152	0,132	0,033	0,182	0,121	0,133
20-30	0,069	0,102	0,110	0,092	0,061	0,114	0,091
30-40	0,056	0,066	0,088	0,054	0,074	0,091	0,071

Mac = macroporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 45 - Valores médios da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Mac ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,015	0,070	0,051	0,067	0,051
05-10	0,033	0,031	0,044	0,034	0,035
10-20	0,032	0,057	0,067	0,073	0,057
20-30	0,052	0,072		0,086	0,070
30-40	0,044	0,111	0,065	0,086	0,077
Arraste com uma passada					
00-05	0,160	0,220	0,061	0,083	0,131
05-10	0,028	0,041	0,029	0,035	0,033
10-20	0,090	0,096	0,092	0,045	0,081
20-30	0,072	0,091	0,118	0,068	0,087
30-40	0,048	0,050	0,075	0,054	0,057
Arraste com três passadas					
00-05	0,047	0,052	0,020	0,015	0,033
05-10	0,035	0,028	0,030	0,035	0,032
10-20	0,040	0,030	0,027	0,033	0,033
20-30	0,026	0,057	0,043	0,052	0,044
30-40	0,042	0,085	0,024	0,020	0,043
Estaleiro					
00-05	0,088	0,055	0,048	0,053	0,061
05-10	0,024	0,067	0,014	0,027	0,033
10-20	0,043	0,050	0,094	0,043	0,058
20-30	0,045	0,048	0,043	0,046	0,045
30-40	0,109	0,049	0,045	0,085	0,072

Mac = macroporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 46 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
Mic ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
Antes da Colheita Florestal							
00-05	0,363	0,394	0,391	0,440	0,406	0,450	0,408
05-10	0,376	0,438	0,413	0,448	0,430	0,447	0,425
10-20	0,375	0,397	0,417	0,430	0,404	0,425	0,408
20-30	0,494	0,428	0,448	0,441	0,420	0,421	0,442
30-40	0,335	0,441	0,416	0,421	0,399	0,400	0,402

Mic = microporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 47 - Valores médios da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
Mic ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
Corte					
00-05	0,486	0,403	0,424	0,365	0,419
05-10	0,419	0,400		0,399	0,406
10-20	0,437	0,410	0,443	0,433	0,430
20-30	0,414	0,421		0,435	0,423
30-40	0,412	0,398	0,431	0,426	0,417
Arraste com uma passada					
00-05	0,406	0,425	0,387	0,449	0,417
05-10	0,413	0,429	0,468	0,457	0,442
10-20	0,433	0,432	0,434	0,480	0,445
20-30	0,413	0,413	0,423	0,449	0,424
30-40	0,406	0,459	0,398	0,422	0,421
Arraste com três passadas					
00-05	0,466	0,483	0,461	0,486	0,474
05-10	0,468	0,486	0,462	0,478	0,473
10-20	0,468	0,469	0,428	0,471	0,459
20-30	0,461	0,458	0,440	0,457	0,454
30-40	0,461	0,433	0,452	0,442	0,447
Estaleiro					
00-05	0,449	0,439	0,460	0,474	0,455
05-10	0,465	0,411	0,472	0,489	0,459
10-20	0,470	0,440	0,419	0,506	0,459
20-30	0,465	0,405	0,436	0,462	0,442
30-40	0,405	0,406	0,416	0,436	0,416

Mic = microporosidade do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.

TABELA 48 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto antes da colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Média
$K_{\theta s}$ (mm.h^{-1})							
Antes da colheita florestal							
00-05	211,36	276,55	377,91	0,00	5,41	309,99	196,87
05-10	222,29	9,99	80,11	26,15	124,95	17,15	80,11
10-20	123,67	37,99	71,07	0,00	257,33	49,20	89,88
20-30	4,64	11,98	69,74	11,67	0,00	42,47	23,42
30-40	19,85	1,57	5,21	0,00	3,33	2,27	5,37

$K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4; T5 = trincheira 5; T6 = trincheira 6.

TABELA 49 - Valores médios da condutividade hidráulica (mm.h^{-1}) do Argissolo Vermelho Distrófico abrupto após a colheita florestal.

Camadas (m)	T1	T2	T3	T4	Média
$K_{\theta s}$ (mm.h^{-1})					
Corte					
00-05	0,00	0,00	9,61	17,88	6,87
05-10	0,07	0,00	0,07	0,17	0,08
10-20	7,32	0,00	0,00	6,96	3,57
20-30	0,52	5,71	4,84	8,28	4,84
30-40	0,00	0,00	2,11	39,10	10,30
Arraste com uma passada					
00-05	168,53	379,11	0,00	0,00	136,91
05-10	0,00	0,36	2,89	1,32	1,14
10-20	0,35	23,46	35,69	79,14	34,66
20-30	0,00	18,41	22,09	5,07	11,39
30-40	10,09	0,00	4,94	12,85	6,97
Arraste com três passadas					
00-05	0,00	22,68	68,03	0,00	22,68
05-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10-20	0,00	0,00	3,32	0,00	0,83
20-30	26,78	16,50	0,00	0,00	10,82
30-40	5,08	0,00	0,00	0,00	1,27
Estaleiro					
00-05	0,54	0,45	0,00	5,44	1,61
05-10	22,49	0,00	0,26	0,00	5,69
10-20	0,00	0,00	0,00	0,18	0,04
20-30	4,69	0,00	0,00	1,68	1,59
30-40	27,50	11,23	17,17	2,99	14,72

$K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo; T1 = trincheira 1; T2 = trincheira 2; T3 = trincheira 3; T4 = trincheira 4.