

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRÁFEGO DE
MÁQUINAS NA COLHEITA DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*
HILL EX MAIDEN**

JAIR ROSAS DA SILVA

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia – Área
de concentração em Energia na
Agricultura

BOTUCATU - SP
Maio – 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRÁFEGO DE
MÁQUINAS NA COLHEITA DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*
HILL EX MAIDEN**

JAIR ROSAS DA SILVA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Paulo Torres Fenner

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia – Área
de concentração em Energia na
Agricultura

BOTUCATU - SP
Maio – 2003

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, campus de Botucatu e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Área Energia na Agricultura, pelos ensinamentos ministrados.

À Diretoria e Conselho Técnico do Instituto Florestal de São Paulo, pela liberação concedida para realizar o Curso de Doutorado.

À FAPESP e CAPES, pelo financiamento do projeto de pesquisa que alicerçou a realização dessa investigação científica.

À Empresa Duratex S.A., pela disponibilidade de área de produção florestal para implantação do projeto de pesquisa.

À orientação segura, abalizada e competente do Prof. Dr. Paulo Torres Fenner.

Ao Prof. Dr. Ângelo Cataneo e a Prof. Dra. Maria Helena Moraes pelo acompanhamento no desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos de Sousa Pinto, da Escola Politécnica da USP, pelo esclarecimento de aspectos importantes do ensaio Proctor Normal.

Ao Prof. Dr. Haroldo Carlos Fernandes, da Universidade Federal de Viçosa, pelo fornecimento de material didático especializado na área.

Ao Prof. Dr. Casimiro Dias Gadanha Júnior, da ESALQ-USP, pela cessão de equipamento para realização do ensaio de cisalhamento do solo.

Ao Pesquisador do IAC, Dr. Flávio Bussmeyer Arruda, pela cessão de *software* para ajuste de curvas de compactação do solo.

À Prof. Dra. Célia Regina Lopes Zimback, pela atenção dispensada em todos os momentos solicitados.

À Seção de Desenho, Arquitetura e Artes do Instituto Florestal de São Paulo, pelo apoio na elaboração de croquis e gráficos.

Aos funcionários do Instituto Florestal, senhores João Fogaça Simões e Edi Carvalho Pereira, pela colaboração diuturna e amizade.

Aos docentes e funcionários dos Departamentos de Engenharia Rural, Ciências Florestais e Solos, da FCA, pelo apoio constante e companheirismo.

Aos funcionários de Departamento de Solos da FCA, senhores Dorival Mariano de Jesus e Jair Vieira, pelo auxílio nos trabalhos de campo e ao senhor José Garcia Osório Pires, por sua dedicação profissional.

Às funcionárias da Seção Técnica Acadêmica, senhoras Lília Rodrigues e Maria Isabel Gomes, pelo profissionalismo em tratar os eventos técnico-científicos realizados no campus.

Aos colegas de curso Pedro Ivo Borges dos Santos, Flávia Marcelino e Juliana Barilli, pela participação em etapas no desenvolvimento desse trabalho.

À minha sogra, senhora Maria de Lourdes do Espírito Santo Paiva, pelo seu zelo e apoio logístico em Botucatu.

À minha esposa Maria Inês e minha filha Laura, pelo carinho, apoio e incentivo, sem o que não seria possível realizar todo esse trabalho.

A meus pais, Joaquina Conceição e Manoel Rosas da Silva, *in memoriam*, que me ensinaram o caminho a trilhar pela vida, dedico.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
1 RESUMO.....	xii
2 SUMMARY.....	xiv
3 INTRODUÇÃO.....	1
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1 Panorama do setor florestal brasileiro.....	4
4.2 Parâmetros físicos do solo.....	5
4.2.1 Densidade do solo.....	5
4.2.2 Porosidade total.....	6
4.2.3 Macroporosidade.....	7
4.2.4 Microporosidade.....	8
4.2.5 Água disponível no solo.....	10
4.2.6 Taxa de infiltração de água no solo.....	11
4.2.7 Temperatura do solo.....	12
4.2.8 Estabilidade de agregados a seco.....	14
4.3 Parâmetros mecânicos.....	15
4.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração.....	15
4.3.2 Resistência mecânica do solo ao cisalhamento.....	16
4.3.3 Ensaio Proctor Normal.....	18
4.3.4 Pressão de rodados sobre o solo.....	22
4.3.5 Cobertura de galhada.....	26
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
5.1 Material.....	28
5.1.1 Área experimental.....	28
5.1.2 Clima.....	28
5.1.3 Geologia.....	29
5.1.4 Solo.....	29

5.1.5	Espécie florestal.....	30
5.1.6	Máquinas florestais empregadas.....	30
5.1.6.1	Colhedora de madeira (<i>harvester</i>).....	30
5.1.6.2	Trator florestal transportador (<i>forwarder</i>).....	31
5.1.7	Esquema de corte e baldeio adotado.....	33
5.2	Métodos.....	34
5.2.1	Análises físicas do solo.....	34
5.2.1.1	Densidade do solo.....	34
5.2.1.2	Porosidade total.....	35
5.2.1.3	Macroporosidade.....	35
5.2.1.4	Microporosidade.....	36
5.2.1.5	Água disponível no solo.....	36
5.2.1.6	Taxa de infiltração de água no solo.....	37
5.2.1.7	Temperatura do solo.....	38
5.2.1.8	Estabilidade de agregados a seco.....	39
5.2.1.9	Textura do solo.....	41
5.2.2	Análises químicas do solo.....	42
5.2.3	Análises mecânicas do solo.....	42
5.2.3.1	Resistência mecânica do solo à penetração.....	42
5.2.3.2	Resistência mecânica do solo ao cisalhamento.....	44
5.2.3.3	Ensaio Proctor Normal.....	46
5.2.3.4	Formas de imposição de cargas ao solo.....	46
5.2.3.4.1	Sob condição estática.....	47
5.2.3.4.2	Sob condição dinâmica.....	47
5.2.3.4.2.1	Máquinas deslocando-se sobre o talhão.....	47
5.2.3.4.2.2	Máquinas em operação.....	48
5.2.3.5	Pressão de rodados sobre o solo.....	50
5.2.3.5.1	Colhedora de madeira (<i>harvester</i>).....	50
5.2.3.5.2	Trator florestal transportador (<i>forwarder</i>).....	51
5.2.3.6	Cobertura de galhada.....	53

5.3 Análise de resultados	54
5.3.1 Tratamentos e subtratamentos.....	54
5.3.2 Parâmetros de avaliação.....	54
5.3.3 Delineamento experimental.....	55
5.3.4 Coleta de dados.....	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
6.1 Parâmetros físicos do solo	56
6.1.1 Densidade do solo.....	56
6.1.2 Porosidade total.....	59
6.1.3 Macroporosidade.....	61
6.1.4 Microporosidade.....	63
6.1.5 Água disponível no solo.....	64
6.1.6 Taxa de infiltração de água no solo.....	66
6.1.7 Temperatura do solo.....	67
6.1.7.1 Temperatura do solo em agosto de 2001	68
6.1.7.2 Temperatura do solo em outubro de 2001.....	69
6.1.7.3 Temperatura do solo em janeiro de 2002.....	71
6.1.8 Estabilidade de agregados a seco.....	73
6.2 Parâmetros mecânicos do solo.....	75
6.2.1 Resistência mecânica do solo à penetração.....	75
6.2.1.1 Tráfego anterior.....	75
6.2.1.2 Corte de madeira (<i>harvester</i>).....	78
6.2.1.3 Baldeio (<i>forwarder</i>).....	80
6.2.2 Resistência mecânica do solo ao cisalhamento.....	83
6.2.3 Ensaio Proctor Normal.....	88
6.2.3.1 Densidade máxima do solo.....	88
6.2.3.2 Teor de água crítico para compactação.....	90
6.2.3.3 Grau de compactação.....	92
6.2.4 Pressão de rodados sobre o solo.....	94
6.2.4.1 Colhedora de madeira (<i>harvester</i>).....	94

6.2.4.2 Trator florestal transportador (<i>forwarder</i>).....	95
6.2.5 Cobertura de galhada.....	102
7 CONCLUSÕES.....	105
8 RECOMENDAÇÕES.....	107
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	130

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Valores médios de parâmetros químicos de fertilidade do solo no talhão florestal pesquisado, Botucatu, SP.....	130
2 Rotações por minuto utilizadas no aparelho centrifugador, respectivas tensões de retenção de água e limites inferiores de retenção.....	130
3 Características dos pneumáticos que equipam o <i>forwarder</i> pesquisado.....	52
4 Valores médios de parâmetros físicos do solo e respectivas comparações entre os tratamentos pesquisados, a 5% de significância.....	56
5 Valores médios dos parâmetros físicos do solo, por combinação de tratamentos, com indicação de diferenças significativas e não significativas.....	58
6 Valores médios de temperatura do solo, °C, por combinação de tratamentos, com indicação de diferenças significativas e não significativas.....	70
7 Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento trânsito anterior.....	131
8 Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento <i>harvester</i>	132
9 Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento <i>forwarder</i>	133
10 Valores de densidade máxima do solo, g.cm ⁻³ , teores de água críticos para compactação, g.kg ⁻¹ e de matéria orgânica, g.dm ⁻³ , nos tratamentos avaliados.....	88
11 Valores de densidade média e máxima do solo, g.cm ⁻³ , graus de compactação e médias, %, nos tratamentos avaliados.....	92
12 Cargas sobre o eixo dianteiro, traseiro e total do <i>forwarder</i> , kN, segundo Volvo (1997) e Duratex (2001).....	95
13 Valores médios de área de contato pneu-solo, mm ² , por localização, tipo de eixo e condições de carregamento para o <i>forwarder</i> pesquisado.....	95
14 Valores de pressões sobre o solo indicadas ^(1,2) e determinada ⁽³⁾ para o <i>forwarder</i> pesquisado, kPa, em função de carga por pneu.....	97
15 Pressões aplicadas ao solo por rodados, em condição estática, de acordo com os autores mencionados, kPa.....	100
16 Quantificação de galhada seca, por classe de diâmetro e total, kg.m ⁻² , após corte de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 <i>Harvester</i> Caterpillar 320B em operação de corte florestal.....	31
2 Cabeçote derrubador-processador em operação.....	31
3 <i>Forwarder</i> Volvo A-25C empregado no baldeio florestal.....	32
4 Esquema de corte e baldeio adotado.....	34
5 Permeametro de carga variável com amostra de solo saturada.....	37
6 Geotermômetro Testo empregado na pesquisa.....	39
7 Aparelho vibratório para peneiramento a seco de amostras de solo.....	40
8 Determinação da resistência do solo à penetração com penetrógrafo <i>Soil Control</i>	43
9 Avaliação da resistência do solo ao cisalhamento com aparelho <i>sheargraph</i>	45
10 Esquema ilustrativo de distribuição de pressões ao solo por rodado de trator de esteiras (conforme Janzen, 1990).....	47
11 Isóbaras de pressão sob rodado de pneumáticos de tratores (Soehne, 1958).....	48
12 Comparação entre bulbos de pressões impostas ao solo por rodados de pneus e esteiras (Reaves & Cooper, 1960).....	49
13 Esquema de momentos máximos de elevação de cargas permitidas no trabalho do <i>forwarder</i> (Volvo, s.d.).....	50
14 Áreas de contato rodado-solo para o <i>forwarder</i> , respectivamente com carga completa de madeira (a) e sem carregamento (b).....	52
15 Aspecto da cobertura de galhada da área experimental.....	53
16 Temperatura do solo em agosto de 2001.....	68
17 Temperatura do solo em outubro de 2001.....	71
18 Temperatura do solo em janeiro de 2002.....	72
19 Resistência do solo à penetração no tratamento tráfego anterior (linhas do rebaixador de tocos).....	75
20 Resistência do solo à penetração no tratamento tráfego anterior (rastro antigo).....	76
21 Resistência do solo à penetração no tratamento tráfego anterior (área do rebaixador de tocos).....	77
22 Resistência do solo à penetração no tratamento <i>harvester</i> com galhada.....	78

23 Resistência do solo à penetração no tratamento <i>harvester</i> sem galhada.....	79
24 Resistência do solo à penetração no tratamento <i>forwarder</i> com galhada.....	80
25 Resistência do solo à penetração no tratamento <i>forwarder</i> sem galhada.....	81
26 Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento no tratamento trânsito anterior.....	83
27 Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento na fase de corte.....	85
28 Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento na fase de baldeio.....	86
29 Curvas de compactação do solo no tratamento trânsito anterior.....	134
30 Curvas de compactação do solo no tratamento <i>harvester</i> com galhada.....	135
31 Curvas de compactação do solo no tratamento <i>harvester</i> sem galhada.....	136
32 Curvas de compactação do solo no tratamento <i>forwarder</i> com galhada.....	137
33 Curvas de compactação do solo no tratamento <i>forwarder</i> sem galhada.....	138

1 RESUMO

Foram avaliados os efeitos causados ao solo pelo tráfego de máquinas florestais de corte e baldeio de madeira, com ênfase à compactação, em floresta de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, de 91 meses de idade, através do comportamento de parâmetros físicos e mecânicos de um Latossolo Vermelho Amarelo, com 480 g.kg⁻¹ de areia total e 430 g.kg⁻¹ de argila. Os tratamentos avaliados foram o trânsito anterior ao experimento, a fase de corte e processamento de madeira, efetuada por colhedora (*harvester*) sobre esteiras e a fase de extração, por trator transportador autocarregável (*forwarder*) com rodado de pneus, considerando-se as condições de presença ou ausência de cobertura de galhada. Os parâmetros físicos empregados na avaliação foram: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, água disponível no solo, taxa de infiltração de água, temperatura do solo e estabilidade de agregados a seco. Os parâmetros mecânicos avaliados foram resistência do solo à penetração e ao cisalhamento, densidade máxima do solo, teor de água crítico para compactação e grau de compactação. Também foram avaliadas a área de contato rodado-solo e a pressão de rodados sobre o solo. Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, sendo os resultados obtidos submetidos à análise de variância pelo *Statistical Analysis System* (SAS), com aplicação do teste Tukey a 5% e 10% de significância. Comparativamente, a densidade do solo, a resistência mecânica ao cisalhamento e a pressão de rodados sobre o solo foram maiores após o tráfego do trator transportador em relação ao conferido pela colhedora de madeira. Os parâmetros porosidade total, macroporosidade, microporosidade, água disponível e estabilidade de agregados a seco foram maiores na fase de corte de madeira do que na fase de baldeio. A extração por baldeio, quando realizada em condições de ausência de revestimento de galhada, determinou aumento na densidade, temperatura e grau de compactação do solo e, ao mesmo tempo, redução na porosidade total e macroporosidade, em

relação ao baldeio efetuado sobre galhada. As condições avaliadas de cobertura de galhada não influenciaram significativamente a taxa de infiltração de água no solo, água disponível, microporosidade, resistência mecânica à penetração e densidade máxima do solo, nas fases de corte e baldeio de madeira. Em todos os tratamentos foi atingido o índice de 2 MPa, referido na literatura como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração para o desenvolvimento de raízes. O teor de água crítico para compactação não diferiu entre os tratamentos estudados, com exceção para o baldeio de madeira efetuado sem a cobertura de galhada, que foi inferior ao observado no corte de madeira sobre galhada, em função da densidade máxima do solo nessas duas condições. O grau de compactação do solo foi maior na fase de baldeio sem a cobertura de galhada, devido à maior imposição e de forma direta de cargas ao solo, que entretanto não diferiu da etapa de corte sobre galhada, em função da densidade e conteúdo de água do solo. É conveniente realizar o monitoramento do teor de água no solo ao iniciar operações mecanizadas de corte e baldeio, visando um afastamento seguro de pontos críticos para compactação do solo. Os resultados da pesquisa indicam que o percurso do *harvester*, na forma e condições em que foi realizado, de um modo geral manteve ou melhorou as propriedades físicas e mecânicas do solo avaliadas, devido a uma adequada distribuição de pressões ao solo, ao passo em que a passagem subsequente do *forwarder*, condicionando efeito de cargas repetidas, resultou em neutralizar esse comportamento do solo.

SOIL COMPACTION DUE TO WOOD HARVESTING OPERATIONS IN AN *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN FOREST. Botucatu, 2003, 138 p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JAIR ROSAS DA SILVA

Adviser: PAULO TORRES FENNER.

2 SUMMARY

A study of soil compaction was carried out on a Red-Yellow Latosol with 43% of clay and 48% of sand, according to some soil physical and mechanical parameters in a harvester of a 91-month-old *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden forest. The aim was to evaluate the influence caused by the traffic of a 100 kWa-tracked harvester followed by a 190 kWa-wheeled-forwarder, over and without slash, in comparison to the soil conditions before the harvesting operations. The physical parameters used were soil dry bulk density, total porosity, air-filled porosity, micro porosity, soil water availability and infiltration rate, temperature and soil mean aggregate sizes. The mechanical parameters were soil penetrometer resistance, shear strength, Proctor test and machine ground pressure. A randomized-block trial with 15 replicates was used, applying Statistical Analysis System (SAS) and Tukey test at 5% and 10% significance levels. Results showed that wheeled-forwarder increased soil dry bulk density, soil shear strength and soil machine pressure in relation to the tracked-harvester. Thus, the parameters total porosity, air-filled porosity, micro porosity, soil water availability and soil mean aggregate sizes were higher on harvesting than on wood hauling. The wheeled-forwarder operating without slash produced a higher soil dry bulk density, temperature and soil compaction degree. Also, this work condition decreased total porosity and air-filled porosity in relation to the same operation accomplished over slash. Micro porosity, water availability, soil infiltration rate, soil penetrometer resistance and the maximum soil dry bulk density were not affected by both machines working on both slash

conditions. All the soil mechanized operations evaluated were rated higher than 2 MPa on soil penetrometer resistance parameter, looked like a soil limit to allow the root growing. In general, the critical moisture content for soil compaction was statistically the same for all the conditions evaluated even though the forwarder traffic without slash was lesser than the harvester traffic over slash, due to the maximum dry bulk density in these soil conditions. The soil compaction degree was higher on the forwarder traffic without slash as a function of this machine pattern to impose charges over the soil. It is advised to control the soil moisture content before mechanized harvesting operations to avoid working on the critical moisture content border. These research results have indicated that tracked-harvester traffic maintained or improved the physical and mechanical soil properties evaluated due to a proper pressure applied on the soil. On the other hand, the following traffic of the wheeled-forwarder, with repeated charges effect over the soil, contributes to neutralize this soil improvement.

Keywords: soil compaction, forest machines, wood harvesting, ground pressure, soil physical properties, soil mechanical properties.

3 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico observado na grande maioria das atividades produtivas tem determinado mudanças nos métodos usuais de trabalho, visando à redução dos custos de produção, o aumento da produtividade, a melhoria dos padrões de qualidade do produto final e a proteção do meio ambiente.

A situação atual nas florestas é bastante diferente daquela do passado. Os homens, com suas máquinas, vieram para se beneficiar dos produtos da floresta, trazendo com eles os efeitos inevitáveis e indesejáveis decorrentes do progresso. A mecanização agora é parte integrante do cenário das operações florestais, pois o desenvolvimento de técnicas e métodos aplicáveis às operações de corte e extração de madeira estão conduzindo a produção florestal na direção de sistemas cada vez mais mecanizados e com aumento do grau de automação.

Desse modo as empresas passaram a avaliar alternativas englobando maior aplicação de máquinas e equipamentos em suas atividades florestais e, a partir de 1990, com a liberação de importações de veículos e máquinas, passou a ser crescente a participação de modelos mecanizados nas operações florestais de produção de madeira.

A produção de madeira em florestas simplesmente exploradas ou colocadas formal ou efetivamente sob um plano de manejo, manteve-se totalmente afastada da questão ambiental há algum tempo atrás. Há informações de que a área de solo afetada por máquinas durante a colheita é variável entre as situações, ocupando entre 4% e 40% da superfície total, segundo diversos autores. Além da compactação, podem ocorrer, de modo variável, outros processos, como por exemplo, a remoção da camada superficial do solo. Os danos advindos da compactação podem permanecer por vários anos e favorecer a erosão.

As deformações físicas do solo são hoje consideradas um fator relevante no processo produtivo florestal. Os danos causados ao solo pelo tráfego de veículos,

principalmente durante o corte e extração por baldeio, tornaram-se uma preocupação constante nos últimos anos e provocaram mudanças importantes, tanto nos veículos e máquinas florestais quanto nos próprios sistemas de corte e extração por baldeio.

Dentro dessa realidade, pesquisas têm sido realizadas na Estação Experimental de Itapetininga, do Instituto Florestal do Estado de São Paulo, com o objetivo de avaliar a influência de sistemas de corte e extração por baldeio de *Pinus elliottii* Eng. var. *elliottii* sobre a compactação do solo, concluindo-se não ter ocorrido diferença quanto à resistência mecânica do solo à penetração em áreas trafegadas e não trafegadas (Silva & Jorge, 1996; Silva et al., 2000a). Tais resultados não pretendem generalizar a conclusão de que o tráfego florestal pesado não promova compactação em solo arenoso.

Por outro lado, a compactação do solo aumenta com a intensidade do tráfego florestal, sob vários percursos de máquinas e a área alterada e a faixa de solo danificada decrescem com a redução da intensidade de colheita, aumentando-se as distâncias entre ramais de extração.

O Brasil é um país com pouca tradição em mecanização florestal, não possuindo modelos de manejo bem definidos e otimizados para florestas nativas, além da diversidade de regiões no que diz respeito à topografia, condições edafo-climáticas e disponibilidade de mão-de-obra. A mecanização florestal encontra-se em uma fase de transição entre os sistemas extrativistas, utilizados durante muitos anos nas florestas nativas e adaptados para trabalhos em reflorestamentos, e os sistemas altamente mecanizados e de alta capacidade operacional.

No corte de madeira e extração por baldeio, as relações entre o tráfego e os danos causados a floresta, bem como os problemas ocasionados em função dos diferentes sistemas de colheita, ainda não foram suficientemente estudados no Brasil. Assim, faz-se necessário avaliar sistemas e modelos mecanizados de corte e extração florestal, com o objetivo de pesquisar a influência sobre algumas características físicas, químicas, mecânicas e biológicas, bem como efetuar uma avaliação qualitativa e quantitativa do comportamento de diversos parâmetros indicadores de degradação do solo, visando alcançar-se um uso racional, sustentado e de longo prazo.

A reabilitação efetiva de danos ambientais causados por um manejo prejudicial ou inadequado para a produção florestal, que possa resultar em alteração das propriedades do solo mencionadas, requer inicialmente que estes sejam bem conhecidos.

O presente estudo teve como objetivo pesquisar a influência do tráfego de máquinas sobre algumas características físicas e mecânicas do solo, com ênfase à compactação, resultantes de operações florestais de corte e extração por baldeio em sistema de colheita de toras curtas, habitualmente utilizado em empresas florestais que atuam nas regiões central e sul do Estado de São Paulo, com vistas à adequação das máquinas utilizadas, a conservação ambiental e a sustentabilidade da atividade florestal.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Panorama do setor florestal brasileiro

O setor florestal brasileiro representa cerca de 5% do Produto Interno Bruto, ou PIB, segundo Minetti et al. (2002). Esse segmento da economia emprega na forma direta ao redor de 31.000 pessoas, com maiores contingentes de mão-de-obra nos estados do Paraná, São Paulo e Bahia, em ordem decrescente, conforme SBS (2002).

Existe atualmente no Brasil cerca de 4,8 milhões de hectares de florestas artificiais de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., representando 0,6% do território nacional, sendo maiores áreas (61,7%) representadas por florestas de eucalipto. As maiores extensões de plantio estão localizadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, nessa ordem, de acordo com SBS (2001a).

O consumo de madeira industrial na forma de toras no Brasil, em 2000, foi avaliado pela cifra de 166 milhões de metros cúbicos, dos quais o total de 38,4% esteve representado por essências nativas (SBS, 2001b).

Do total de produtos madeireiros consumidos anualmente no Brasil, cerca de 29,5% são utilizados na indústria de serrados, 27,2% na produção de carvão vegetal, 19,2% nas indústrias de celulose e papel, 17,4% na produção de energia como lenha industrial, 3,6% na fabricação de lâminas e compensados e 3,0% em painéis reconstituídos, estes englobando a fabricação de aglomerados, chapas de fibra e MDF, conforme SBS (2001b).

Estas características de consumo permitem identificar que o processo de mecanização da colheita florestal não ocorre de maneira homogênea no Brasil. Enquanto setores como de celulose e chapas de madeira procuram evoluir no processo de colheita, através da adoção de novos métodos de trabalho e equipamentos, o mesmo não se pode afirmar com relação à colheita para fins energéticos (Zych, 1993).

Até meados dos anos 1970 a região da Amazônia respondia por 14% da produção de madeira em toras do país. Atualmente, essa região produz cerca de 28 milhões de metros cúbicos de madeira em toras por ano, segundo Vidal et al. (2002).

A colheita florestal é um conjunto de operações realizadas com o objetivo de preparar e transportar a madeira até o seu local de utilização, por meio de técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final. Hoje, há grande diversidade de sistemas de colheita de madeira, cuja implementação depende de disponibilidade de recursos tecnológicos, financeiros e da qualidade da floresta (Minetti et al., 2002).

A colheita representa o principal item de custos de produção florestal, alcançando 50% ou mais do custo final do produto posto fábrica, conforme Minetti et al. (2002). Ao lado da viabilidade econômica, atenção cuidadosa deve ser dada ao desenvolvimento e seleção de sistemas de colheita adequados nas concepções ambientais e sociais (Heinrich, 1993).

4.2 Parâmetros físicos do solo

4.2.1 Densidade

Densidade do solo é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros. A amplitude de variação de densidade do solo situa-se dentro dos seguintes limites médios, em g.cm^{-3} : solos argilosos: 1,00 a 1,25; arenosos: 1,25 a 1,40; solos húmiferos: 0,75 a 1,00; solos turfosos: 0,20 a 0,40 (Kiehl, 1979).

Para Pritchett & Fisher (1987), a densidade de solos de uso florestal varia desde 0,2 g.cm^{-3} em algumas camadas orgânicas a quase 1,9 g.cm^{-3} em areias grossas. Solos com alto teor de matéria orgânica, assim como os frouxos e porosos, têm menores massas por unidade de volume, ou seja, densidade do solo.

De um modo geral, para uma mesma classe de solo, quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será sua compactação, menor será sua estruturação, menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão suas restrições para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Ao interpretar-se a densidade como estimativa da

porosidade e compactação do solo, quanto maior a densidade, menor será a quantidade de vazios, para uma mesma classe textural (Kiehl, 1979).

Pisoteio de animais de pastoreio, emprego de maquinaria pesada de colheita, uso recreacional intensivo ou movimentação enquanto o solo está úmido são fatores de aumento da densidade do solo, especialmente em solos de textura fina. Areias compactadas com densidade além de $1,75 \text{ g.cm}^{-3}$ ou argilas com densidades maiores que $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ podem impedir a penetração das raízes das árvores (Pritchett & Fisher, 1987).

Valores de densidade de solos superiores a $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ indicam que o nível de compactação é alto e evidenciam a necessidade de preparo do solo na área (Lira Filho, 1994).

4.2.2 Porosidade total

A porosidade de um solo pode ser definida como sendo o volume de vazios ou ainda o espaço do solo não ocupado pelo conjunto dos componentes orgânicos e inorgânicos. São usados como sinônimos de porosidade ou porosidade total: volume de poros totais, espaço poroso, volume de poros, volume de vazios, espaço lacunar e espaço intersticial do solo (Kiehl, 1979).

Os limites entre os quais varia a porosidade total de um solo são muito amplos, pois o volume de poros depende da composição granulométrica e da estruturação. Os solos com partículas de tamanho uniforme são mais porosos do que os de partículas de tamanhos diferentes; é que neste caso as partículas finas podem preencher espaços livres existentes entre o material grosseiro (Kiehl, 1979).

Tanto a solução quanto o ar do solo são armazenados e transportados dentro dos espaços porosos. Assim, a fração volumétrica total dos poros do solo, comumente chamada porosidade total, é uma importante propriedade dos solos. Os solos diferem muito em porosidade. Os seguintes intervalos de valores, em volume, têm sido encontrados na superfície dos solos cultivados: arenosos: 0,35-0,50; siltosos e francos: 0,30-0,55; argilosos: 0,40-0,65; húmíferos: 0,60-0,80; turfosos: 0,80-0,85, segundo Prevedello (1996).

Os solos que têm menor porosidade são os arenosos; como suas partículas são predominantemente grandes, a tendência é formar disposição piramidal, que tem menor volume de vazios. Nos solos de textura fina as partículas não se arranjam de maneira

tão compactada; além disso, a argila coloidal contribui para formar agregados que aumentam a porosidade. Na prática, raramente se encontram solos de textura grosseira com porosidade total inferior a 30% ou solos de textura fina com volume total de poros superior a 60% (Kiehl, 1979).

O armazenamento, disponibilidade e transporte da solução e do ar não dependem somente da porosidade total, mas também e, principalmente, de como o espaço poroso total é distribuído por tamanho. Com base no diâmetro, em micras (μm), eles podem ser classificados em: macroporos ($>300 \mu\text{m}$), mesoporos ($50-300 \mu\text{m}$) e microporos ($<50 \mu\text{m}$), conforme Prevedello (1996).

Ritchie (1981) cita que o volume de poros de solos sob florestas é normalmente maior que solos similares usados para fins agrícolas, porque culturas sucessivas resultam na redução de matéria orgânica e dos macroporos. A porosidade da maioria dos solos sob florestas varia entre 30 a 65%. Solos que suportam florestas mistas podem ter maior porosidade total que com florestas homogêneas.

A porosidade total é o parâmetro de maior significado para avaliar a compactação do solo, por sua relação direta com os volumes disponíveis de ar, água e solo, à disposição das plantas, segundo Mantovani (1987).

4.2.3 Macroporosidade

Em 1860 Schumacher classificou a porosidade do solo em duas categorias: a porosidade capilar, atualmente denominada microporosidade e a porosidade não-capilar, presentemente macroporosidade. A macroporosidade, também referida como porosidade de aeração, é a porosidade encontrada no solo na capacidade de campo, isto é, depois do solo ter sido saturado com água e ter ocorrido a percolação da maior parte da água gravitacional, momento em que o ar passa a ocupar os poros não-capilares (Kiehl, 1979).

McNabb & Startsev (1995) postulam que a macroporosidade determinada a campo imediatamente após o percurso de um *skidder* é um indicador mais sensível de alterações físicas do solo do que a sua densidade.

Um estudo sobre os efeitos de compactação simulada por aplicação de cargas repetidas, determinadas pelo tráfego sucessivo de um grupo de tratores agrícolas

pesados, é reportado na União Soviética por Sheptukhov et al. (1982) em um solo Podzólico nátrico, textura média e em um solo *Chestnut* irrigado, textura média argilosa, localizados em áreas de estepes e cultivos florestais. Os autores concluíram que tal compactação resultou em acréscimo na densidade dos solos e, ao mesmo tempo, redução de algumas propriedades físicas do solo, entre as quais a macroporosidade. Para o solo Podzólico nátrico, por exemplo, ocorreu a seguinte correspondência entre valores de densidade e os respectivos valores de macroporosidade do solo: $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$: 25,3%; $1,10 \text{ g.cm}^{-3}$: 20,3%; $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$: 10,4%; $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$: 5,4%; $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$: 0,4% e $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$: 0,0%.

Arvidsson (1999) estudou na Suécia a influência de cargas crescentes sobre o solo impostas por tráfego sucessivo de máquinas leves e pesadas quanto à macroporosidade. O solo, argila siltosa, com a composição de 460 g.kg^{-1} de argila, 500 g.kg^{-1} de silte e 40 g.kg^{-1} de areia, com 4,1% de matéria orgânica na camada arável, foi preparado com enxada rotativa. Com o incremento na intensidade do tráfego, nas condições do experimento, ocorreu decréscimo na macroporosidade, desde 18,2% nas áreas sem tráfego até 3,8% com nove percursos sob alta pressão.

4.2.4 Microporosidade

A microporosidade é a proporção percentual entre o volume dos microporos (poros menores que 0,002 mm) em relação ao volume total do solo (UFRGS, 1978).

A distribuição dos diversos tamanhos de poros regula as relações entre a água e o ar do solo. Assim, os poros menores retêm a água com mais força do que os poros maiores, sendo estes mais facilmente drenados e ocupados pelo ar. Como a medição do diâmetro dos poros do solo é muito difícil, o tamanho destes é analisado pelo seu comportamento quanto à retenção de água quando se aplica uma sucção (força que tende a extrair a água dos poros) equivalente à pressão de uma coluna de água de 60 cm de altura (0,06 atmosferas). O volume de água que permanece nos poros sob essa sucção corresponde ao volume total dos microporos e o volume de água extraída equivale ao volume total dos macroporos (UFRGS, 1978).

Em solos argilosos a textura fina tende a condicionar uma elevada microporosidade (porosidade textural) e a ocorrência de macroporos se restringe aos espaços entre agregados (porosidade estrutural) (UFRGS, 1978).

Alguns autores representam o solo ideal tendo a porosidade total igual a 50%, dividida igualmente entre ar e água, com 25% cada. Outros opinam que a divisão que oferece melhor balanço é a que possui um terço de macroporos e dois terços de microporos, com a justificativa de que a água retida nos microporos, a medida que é consumida pelas raízes, deixa espaços vazios da microporosidade, os quais serão tomados pelo ar. Assim, quando o solo estiver completamente seco, só apresentará as fases sólida e gasosa e, em condições de encharcamento, as fases sólida e líquida (Kiehl, 1979).

Schjonning et al. (1999), pesquisando solos na Dinamarca com teor de argila variando entre 110 a 450 g.kg⁻¹ e silte entre 70 e 110 g.kg⁻¹, concluíram que o volume de microporos (poros menores que 0,002 mm) aumenta com o conteúdo de argila.

Em razão dos microporos serem menos afetados pela compactação, a proporção de microporos é aumentada. Isso tem sido demonstrado em solos de uso florestal após atividades de colheita por Weert e por Dickerson, citados por Greacen & Sands (1980). Um aumento na proporção de microporos significa que o solo se comporta como se tivesse uma textura mais fina. Se o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo nominal aumenta, desse modo aumenta o volume de água por unidade de volume de solo, que é disponível para as raízes das árvores. Isso tem sido demonstrado em solos de uso florestal por Weert & Lenselink, Sands et al. e Hill & Sumner, que mostraram que com um processo de compactação continuado, a ponto de alcançar a redução na porosidade total, determina aumento na proporção de microporos, depois do que a água volumétrica na capacidade de campo se torna menor, o que ocorre também em solos com distribuição de partículas que apresentam bolsões de altas densidades. Relação entre a densidade do solo e retenção de água tem sido estudada por vários pesquisadores, que até mesmo desenvolveram modelos matemáticos de predição de crescimento de plantas, segundo autores citados por Greacen & Sands (1980).

4.2.5 Água disponível no solo

O papel da água no solo no gerenciamento da floresta assume importância impar devido a alta percentagem de terras que, por serem tanto muito úmidas ou muito secas para uso agrícola, são relegadas à implantação de florestas. O suprimento de água nos solos controla os tipos de árvores que podem se desenvolver. Assim, isso influencia a distribuição das florestas ao redor do mundo. Solos com suprimento abundante de nutrientes podem ser completamente improdutivos sem água e, por outro lado, areias podem suportar florestas razoavelmente produtivas se forem supridas com adequado teor de água (Ritchie, 1981).

A diferença entre os limites superior e inferior da água drenada do solo, determinada a campo, é chamada de água extraível (ou disponível). Para melhor acuracidade nessa determinação, a sonda de neutrons é recomendada porque as determinações de campo têm muito menos erro para determinar as mudanças no conteúdo de água com o tempo, porque o mesmo volume de solo é determinado a cada momento (Ritchie, 1981).

Segundo Pritchett & Fisher (1987), o crescimento da floresta é controlado mais pela água disponível do que qualquer um outro fator, na maioria dos locais. A capacidade de retenção de água de um solo é influenciada por um conjunto de fatores, mas principalmente determinada pela estrutura e textura. A textura do solo é um estimador da capacidade de retenção de água e, deste modo, a produtividade do sítio torna-se complexa pela influência da textura sobre a aeração, disponibilidade de nutrientes e outros fatores de fertilidade do solo. Citando Ralston, os autores aduzem que o crescimento da floresta aumenta com o conteúdo de silte mais argila, como resultado de um teor de água e suprimento de nutrientes mais adequado, a ponto de que aumentos nas proporções de partículas finas produzem dificuldades de aeração.

Para as condições do continente africano, Louw (1997), aduz que a água disponível no solo está fortemente relacionada a variáveis como profundidade da camada considerada, comportamento da chuva durante a estação mais seca do ano e presença ou ausência de um lençol freático.

A percentagem de água disponível de um solo Podzólico nátrico, com 334 g.kg^{-1} de argila na camada entre 0-20 cm de profundidade, da União Soviética, pesquisada por Sheptukhov et al. (1982) decresceu com o aumento na densidade do solo, induzida pelo

tráfego de tratores agrícolas pesados, passando de 17,8% na densidade de $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$ para 13,7% na densidade de $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$.

4.2.6 Taxa de infiltração de água no solo

O termo infiltração é geralmente aplicado ao movimento de água através da superfície do solo. A taxa de água introduzida no solo é determinada mais especificamente pelo conteúdo inicial de água, permeabilidade da superfície, características internas do solo (tais como espaço poroso, grau de expansão dos colóides do solo, conteúdo de matéria orgânica), intensidade e duração de chuvas e temperatura do solo e da água (Kramer, 1969).

A taxa de infiltração é determinada pela existência de um gradiente de potencial entre a água aplicada e a água no interior do solo e a condutividade hidráulica. Alguns fatores podem influir no movimento da água no interior da massa de solo, como as características da chuva, a cobertura do solo e formação de crostas, o manejo da cultura e dos resíduos, a rugosidade superficial, a qualidade da estrutura do solo, o conteúdo de água anterior e a profundidade de umedecimento (Souza, 1985).

As características do solo que influenciam a taxa de infiltração de água são as diretamente associadas à quantidade e qualidade dos poros. Quando o solo se encontra com os poros cheios de água, a condutividade é denominada condutividade hidráulica de solo saturado. Nesse caso, o solo que tiver maior quantidade de macroporos, que efetivamente permitem a movimentação de água no solo, será o mais condutivo, uma vez que dispõe de maior área de transporte. A taxa de infiltração de água em solo saturado é definida como rápida entre $12,5 \text{ cm.h}^{-1}$ e $25,0 \text{ cm.h}^{-1}$ e muito rápida para valores maiores que $25,0 \text{ cm.h}^{-1}$ (Matos, 1997).

A água se movimenta através do solo em resposta a várias forças: o gradiente de pressão (tensão matricial), o gravitacional, o absortivo e as forças osmóticas. Além disso, os gradientes térmicos e elétricos podem acrescentar forças sobre a água do solo e determinar seu movimento sob certas condições. Uma das correlações físicas básicas usadas para descrever o fluxo de água nos solos é representada pela Lei de Darcy (Klute, 1965).

Na Lei de Darcy, onde K é uma constante, o coeficiente de permeabilidade é um índice da maior ou menor dificuldade que o solo opõe à percolação da

água através de seus poros, isto é, mede a permeabilidade do solo, que é a maior ou menor facilidade com que a percolação de água ocorre através de um solo (Vargas, 1981).

Mudanças na condutividade podem ocorrer na passagem da água pelo solo devido a vários processos químicos, físicos e biológicos. Uma alteração no estado de íons trocáveis em um solo pode afetar grandemente a habilidade desse solo em conduzir água. Essa condutividade tende a ser mais alta quando a concentração de solutos na água é relativamente alta (Klute, 1965).

Como característica física, a taxa de infiltração de água indica a ocorrência de processos de degradação física do solo. Isto porque está relacionada com a textura do solo, tipo de argila, estrutura, estabilidade de agregados, distribuição de tamanhos de poros, densidade do solo e ocorrência de compactação. A compactação reduz a proporção de macroporos, diminuindo o espaço aéreo, com redução na infiltração e no armazenamento de água no solo (Dalla Rosa, 1981).

A compactação do solo influencia a taxa de infiltração pela alteração no tamanho e continuidade dos poros, causando uma drenagem interna deficiente e também reduzindo o movimento de água para as raízes, dois fatores que retardam o crescimento das plantas (Oliveira et al., 1998).

4.2.7 Temperatura do solo

A temperatura do solo que se determina é o balanço entre ganhos e perdas de calor. Os ganhos de calor estão relacionados à absorção da radiação solar direta, absorção de calor do ar quente e infiltração da água aquecida da chuva. As perdas são devidas à radiação, condução e convecção. A principal fonte de calor do solo é a radiação solar (Lutz & Chandler Jr., 1961).

A textura do solo, cor e conteúdo de água têm efeitos sobre a absorção e radiação de calor. A temperatura da superfície do solo varia aproximadamente conforme a temperatura do ar da camada imediatamente acima. A superfície do solo tem maiores flutuações de temperatura que o subsolo (Pritchett & Fisher, 1987).

Os principais fatores ambientais que influenciam a temperatura do solo são: radiação solar, insolação, radiação do céu, condução de calor pela atmosfera, condensação, evaporação, chuva e cobertura do solo. Os principais fatores do solo são:

capacidade e condutividade térmica, atividade biológica, radiação do solo, estrutura, textura, conteúdo de água e sais solúveis (Kohnke, 1968).

O conteúdo de água influi na temperatura do solo porque a alta condutividade dos solos úmidos resulta do fato de que a água que ocupa os seus espaços porosos é melhor condutora de calor que o ar existente nos poros dos solos secos (Pritchett & Fisher, 1987).

Calor específico e condutância de calor são duas propriedades inerentes ao solo que influenciam a oscilação da temperatura diária. O calor específico se refere à energia necessária para elevar de 1°C, uma grama ou 1 cm³ de uma substância. A condutância se refere ao movimento ou penetração de energia térmica no perfil do solo. Essas duas propriedades são influenciadas pela textura, conteúdo de água e teor de matéria orgânica de um solo. Assim, quando as percentagens de silte e argila, ou teor de água, aumentam, maior quantidade de calor é requerida (Pritchett & Fisher, 1987).

A troca de calor entre corpos de temperaturas diferentes pode dar-se por três vias distintas: por condução, convecção e irradiação. No primeiro caso a transmissão de calor se processa de um corpo a outro em contato físico com ele, sem deslocamento apreciável das partículas do corpo. A transmissão de calor por convecção é própria dos fluidos em geral, em que as partículas quentes se afastam do lugar em que recebem calor e vão comunicá-lo às partículas frias. No caso da irradiação, o calor é transportado por meio de vibrações eletromagnéticas da mesma natureza que as ondas luminosas, que independe do meio material e pode, inclusive, opera-se no vácuo, segundo Salmoni (1966).

Quanto à amplitude de variações térmicas ao longo do perfil de um Nitossolo Vermelho, Costa & Godoy (1962) observaram que essa característica decresce com a profundidade. Afirmam que as amplitudes térmicas foram mais elevadas a 2,5 cm e 10,0 cm de profundidade e reduziram-se bruscamente a 20,0 cm, indicando essa profundidade como limite de variações térmicas, caracterizada pelos autores como um “horizonte térmico de transição”.

Silva (1994), utilizando implementos e máquinas de preparo em um Argissolo Hipocrômico distrófico, textura média, com 650 g.kg⁻¹ de areia total e 284 g.kg⁻¹ de silte, concluiu que diferentes sistemas de preparo influenciaram a temperatura do solo a 7,5 cm de profundidade.

4.2.8 Estabilidade de agregados a seco

Agregados referem-se ao agrupamento de partículas primárias sólidas do solo, que são separados de agregados adjacentes por superfícies de fraca resistência, formando a estrutura do solo. A estabilidade da estrutura do solo é a resistência dos agregados à ação desagregadora da água e das atividades mecânicas (Baver et al., 1973).

A estrutura do solo se avalia determinando o grau de agregação, a estabilidade dos agregados e a natureza do espaço poroso, características que se alteram com o manejo da terra e os sistemas de cultivo. Desempenham um papel de grande importância nas relações entre o solo e as plantas (Baver et al., 1973).

O método do peneiramento a seco dos solos tal como se encontram no campo é usado para avaliar a distribuição de agregados e torrões. Considera-se que este método dá uma idéia melhor da agregação de solos áridos da Califórnia do que o peneiramento por via úmida, pois que neste estado os agregados perdem coesão e a ação mecânica do peneiramento é suficiente para destruí-los. Contudo, a obstrução das malhas planas e a ruptura dos agregados mais fracos pela ação mecânica são os principais problemas que se apresentam quando se emprega essa técnica (Baver et al., 1973).

A agregação do solo é geralmente mais estável sob condições de floresta do que em solo cultivado. As lavouras contínuas tendem a reduzir a agregação na maioria dos solos através da ruptura mecânica dos agregados e pela redução do conteúdo de matéria orgânica, associado com a ação cimentante dos exudados microbianos e hifas de fungos (Ritchie, 1981). O diâmetro médio geométrico (DMG) foi proposto como índice de agregação em 1950 por Mazurac, conforme Baver et al. (1973).

Schaller & Stockinger (1953) compararam cinco métodos para expressar dados de agregação e obtiveram correlações de 0,958 e 0,913 entre o índice DMP (diâmetro médio ponderado) e a percentagem de agregados maiores que 2 mm e 1 mm, respectivamente. As correlações correspondentes ao índice DMG foram 0,866 e 0,882. Os autores concluíram que uma correlação muito significativa entre o DMP e o DMG e o estado de agregação indicam que qualquer das duas expressões proporciona um bom índice de agregação do solo.

A agregação do solo é um dos principais fatores que controlam os processos químicos, físicos e biológicos e que contribuem para a produtividade e

sustentabilidade na atividade agrícola. Contudo, pouco é o conhecimento sobre a relação entre o tamanho de agregados obtido pelo método do peneiramento a seco e a estabilidade de agregados. Estudos conduzidos por doze anos em barro siltoso *Thorp* da estação experimental da Universidade de Illinois por Yang & Wander (1998) mostraram que houve correlação positiva entre tamanho de agregado seco e diâmetro médio de agregado úmido e estabilidade de agregado úmido.

4.3 Parâmetros mecânicos

4.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração

Resistência de um solo é a habilidade ou capacidade de um solo, em uma condição particular, de resistir a uma força aplicada. Resistência do solo à penetração ou penetrabilidade é a resistência oferecida à introdução de um corpo sólido na massa de solo (Balastreire, 1990).

Vargas (1981) caracteriza a resistência à penetração como uma propriedade mecânica do solo e que depende, ao mesmo tempo, dos seguintes fatores: granulometria (tamanho de partículas do solo), espécie mineralógica da fração argila, teor de água e arranjo das partículas.

Existem parâmetros que permitem inferir sobre a capacidade de enraizamento das plantas: a densidade do solo, resistência à penetração, resistência ao cisalhamento e capacidade de aeração do solo. Ao degradar-se um solo por um manejo compactante, esses fatores sofrem uma alteração. Por exemplo, a resistência à penetração é um parâmetro usado para diagnosticar o estado estrutural do solo, do ponto de vista de desenvolvimento radicular. As principais propriedades que interagem sobre a resistência à penetração são: conteúdo de água, velocidade de secagem, manejo agrícola e propriedades de penetração (Ellies et al., 1991).

Em Latossolo Amarelo, textura argilosa, Lima (1998) observou que a operação de arraste de madeira com *skidder* Caterpillar 525, impondo ao solo uma carga total de 159 kN, determinou pouco incremento na resistência do solo à penetração, comparativamente ao trabalho de derrubada e amontoamento efetuado por *feller-buncher* Blount Hidro AX-611EX, justificando esse resultado pelo fato das primeiras cargas aplicadas

ao solo durante o corte terem contribuído para a maior compactação mecânica. Esse aspecto é concordante com resultados obtidos por Fenner (1999).

Em pesquisa conduzida na estação experimental da Universidade de Ankara, na Turquia, em Cambissolo imperfeitamente drenado, textura média, com 580 g.kg^{-1} de silte e 210 g.kg^{-1} de argila, Yavuzcan (2000) verificou que o tráfego induzido de tratores leves (32,37 kN) promoveu aumento na resistência mecânica do solo à penetração da ordem de 30 a 74% na camada de 0-10 cm de profundidade e de 7 a 33% na camada entre 10-20 cm. Concluiu também que o tráfego de tratores de pneus aumentou a resistência mecânica em sistemas convencionais de preparo do solo.

Como critério de avaliação de compactação, Camargo et al. (2000) empregam a classificação de *compactação moderada* para valores de resistência mecânica do solo à penetração compreendidos entre 1 MPa e 2 MPa, em que podem ocorrer limitações ao desenvolvimento de raízes de algumas espécies em solos de textura argilosa e de *compactação severa* para valores de resistência do solo superiores a 2 MPa, considerado altamente restritivo à penetração, ramificação e crescimento de raízes.

Esses valores podem variar com a espécie considerada. Em solo sedimentar classificado como *loess*, Ehlers et al. (1983) apontam que o limite de resistência à penetração para raízes de aveia foi 3,6 MPa em solo mobilizado e entre 4,6 MPa e 5,1 MPa em solo não mobilizado.

4.3.2 Resistência mecânica do solo ao cisalhamento

O ensaio de cisalhamento direto do solo estabelece o deslizamento de uma parte do corpo de prova em relação à outra, determinando assim, para cada tensão normal à superfície de deslizamento, um valor do esforço cortante necessário para provocar a deformação contínua da ruptura (Mello & Teixeira, s.d.).

A coesão e o ângulo de atrito interno são características do solo reconhecidas por diversos autores como importantes na relação máquina-solo. Identificar essas características significa possibilitar a construção de modelos matemáticos que expliquem o seu comportamento na reação ao trabalho das máquinas (Figueiredo, 1996).

A avaliação da resistência do solo ao cisalhamento é um dos parâmetros mais difíceis de serem determinados experimentalmente, segundo Haefeli, citado por Caputo (1973).

A comparação entre diversos aparelhos e métodos para determinação dos parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento, entre os quais o *sheargraph*, a coroa prensora (*grouser plate*), a caixa de cisalhamento (*shearbox*) do Instituto Nacional de Engenharia Agrícola (Auburn, USA), resultou em diferentes valores para coesão (C) e ângulo de atrito interno (ϕ). O *sheargraph* atribuiu o mais alto valor para C e o *shearbox*, o menor. Ocorreu pouca variação de ϕ em função do tipo de dispositivo utilizado para determinar uma estimativa ou aproximação dos valores de ϕ (Johnson et al., 1987).

Examinando os fatores que contribuem para a instabilidade de taludes por influência de tensão e resistência ao cisalhamento do solo, provem uma base para compreensão de como diferentes tipos de alteração do solo por colheita florestal podem influenciar a estabilidade do solo (Sauder et al., 1987). Os autores acrescentam que solos são classificados como coesivos e não-coesivos. Solos coesivos têm graduação fina, com alto conteúdo de argila e são considerados plásticos. Solos não-coesivos têm textura grosseira ou granular e são considerados não-plásticos.

Para Caputo (1973), a resistência dos solos ao cisalhamento depende do estado de adensamento, da sensibilidade de sua estrutura, das condições de drenagem e da velocidade de aplicação de cargas.

O contato rodado-solo, tanto no caso de rodas (através das garras dos pneus) como em esteiras (por meio de sapatas) faz com que esses elementos penetrem no solo, tendo os espaços entre as garras ou sapatas preenchidos com solo que, com o movimento de rotação do rodado, são solicitados a esforços de cisalhamento através do torque do rodado. Experimentos com diversos solos mostraram que a resistência ao cisalhamento para solos coesivos (argila úmida) independe da carga aplicada no rodado motriz e, para solos desagregados (areia seca), essa resistência aumenta com a carga aplicada (Santos Filho, 1998).

Figueiredo (1996), trabalhando com Nitossolo Vermelho com 710 g.kg⁻¹ de argila e 110 g.kg⁻¹ de areia, encontrou o valor médio de 117 kPa para coesão do solo, que apresentou uma variação decrescente com aumento do teor de água, numa faixa entre 243

a 343 g.kg^{-1} . Para o ângulo de atrito interno, o valor médio registrou 16° , para o mesmo solo. O autor aduz que tais resultados foram divergentes em relação ao ensaio efetuado pelo aparelho de compressão triaxial (referido na literatura como padrão em relação aos demais métodos, conforme Johnson et al., 1987), em que a média de coesão registrou 34 kPa e o ângulo de atrito interno, 27° , justificando que a comparação de vários aparelhos de cisalhamento com a coroa prensora (*grouser plate*) apresentou valores de coesão até sete vezes maiores que os obtidos no ensaio triaxial, o que é devido ao grau de confinamento da amostra quando se usa a coroa prensora e ao fato da tensão de cisalhamento ocorrer em um plano predeterminado, conforme enunciado por Stafford & Tanner (1983).

Sobre esse tema, Bailey & Weber (1965), trabalhando em caixão de solo com dois tipos de solos artificiais, aduziram que conformidades gerais na determinação da tensão de cisalhamento foram encontradas entre o *sheargraph* e a cabeça de cisalhamento torsional (*torsional shearhead*) e que valores indicados por este dispositivo foram frequentemente maiores que os obtidos com a coroa prensora. Acrescentam que tais observações indicam que diferenças entre resultados obtidos pelos vários dispositivos são atribuídas à variação do solo que está sendo empregado.

4.3.3 Ensaio Proctor Normal

O ensaio de compactação de Proctor constitui-se em um método padrão para determinar a resistência potencial à compactação do solo com referência a uma faixa de conteúdo de água, sob um valor constante de energia de compactação. O teor de água ótimo ou crítico para compactação é o conteúdo de água requerido para produzir a densidade máxima obtida no ensaio (Wagner et al., 1994).

Silva et al. (1986), ao analisarem curvas de compactação em quatro classes de solo, observaram que, para uma mesma energia de compactação, a densidade do solo aumenta com o conteúdo de água, até atingir um ponto máximo e, após atingir esse ponto, adições posteriores de água acarretam uma diminuição da densidade, concordando com conclusão de Bodman (1967), ao classificar de “ótimo” para a compactação o teor de água em que a densidade do solo é máxima.

Trabalhando com solos arenoso e argiloso misturados com várias proporções de turfa e esterco de curral, Ekwue & Stone (1995) concluem que a densidade dos

solos, as resistências ao cisalhamento e à penetração aumentaram com o conteúdo de água em todos os tratamentos até que um ponto máximo foi alcançado, a partir do qual os valores desses parâmetros reduziram com qualquer acréscimo no teor de água. Esses autores citam que esse é um comportamento típico do solo que tem sido reportado por vários pesquisadores, incluindo De Kimpe et al. (1982), Ayers & Perumpal (1982) e Ohu et al. (1985).

Esse comportamento da densidade do solo em relação ao conteúdo crescente de água após o ponto de densidade máxima é justificado por Dias Júnior & Miranda (2000) pela baixa compressibilidade da água.

O ensaio Proctor Normal foi primeiramente utilizado na engenharia civil para determinar o conteúdo ótimo de água para compactação de aterros destinados à construção de fundações e de rodovias e não é empregado rotineiramente em análises de solos para fins agrícolas. Contudo, há um conjunto de literatura que relata a correlação entre essas duas propriedades do solo, o ponto de umidade ótima ou crítica e a máxima densidade do solo e a curva de compactação de Proctor segundo vários parâmetros de classificação de solos (Wagner et al., 1994).

Wagner et al. (1994) fizeram referência a um estudo realizado por Wang et al. (1984), mencionando autores que correlacionaram o teor crítico de água para compactação com outros parâmetros do solo, como Jumikis (1946), com o limite de liquidez e o índice de plasticidade; Turball (1948), com a gradação (graus ou fases de transição); Rowan & Graham (1948), com a densidade do solo, gradação e distribuição de tamanhos de agregados; Davidson & Gardiner (1949), com a gradação, distribuição de tamanhos de agregados e índice de plasticidade. Citam também Hamdani (1983), que desenvolveu um método para determinar o teor de água crítico para compactação e densidade máxima, baseado na indicação de um ponto que requer apenas a definição da densidade do solo no teor de água gravimétrico de 9%.

Citando vários autores, Silva et al. (1986) aduzem que diferentes classes de solo apresentam comportamentos distintos quando submetidos à compactação, destacando-se, entre eles, a granulometria, o conteúdo de água do solo e o teor de matéria orgânica.

Essa assertiva não é compartilhada por Cruz & Bezerra (1971) ao avaliarem a experiência brasileira na compactação do solo na engenharia de construção de

barragens de terra. Os citados engenheiros postulam que, de uma maneira geral, observa-se que não existe uma correspondência direta entre o tipo de compactação utilizado e a classe de solo, uma vez que, tanto os solos argilosos, como siltosos e arenosos, foram compactados com equipamentos de pneus, dando resultados estatísticos de compactação, valores em tudo semelhantes.

Trabalhando com cinco classes de solo, Dias Júnior & Miranda (2000) concluíram que os valores de densidade máxima do solo acompanharam uma tendência proporcional quanto aos respectivos teores de areia total. Assim, um Cambissolo com 480 g.kg⁻¹ de areia apresentou densidade máxima maior que um Latossolo Vermelho-Amarelo com 460 g.kg⁻¹ e, este, maior que um Podzólico Vermelho-Amarelo, com 390 g.kg⁻¹. Prosseguindo em ordem decrescente quanto à densidade máxima, é assinalado um Latossolo Vermelho-Escuro, com 250 g.kg⁻¹ e, a seguir, um Latossolo Roxo, contendo 160 g.kg⁻¹.

De forma concordante com esses resultados, Pacheco & Dias Júnior (1990) observaram que a o teor ótimo de água para compactação diminuiu e a densidade máxima do solo aumentou à proporção em que se adicionou areia em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, em um de textura argilosa e em um outro de textura muito argilosa. Dessa forma e também de acordo com diversos outros autores, aduzem que é esperado que a suscetibilidade à compactação cresça a medida em que o teor de areia dos solos aumente.

Por outro lado e também citando outros autores, Dias Júnior & Miranda (2000) argumentaram que o aumento do teor de água ótimo para compactação com o teor de argila está relacionado com a sua capacidade de adsorção de água. Acrescentam que, com base em resultados do ensaio Proctor Normal, uma classe de solo com maior teor de argila, como, por exemplo, Latossolo Roxo, apresente sua densidade máxima com teores de água maiores do que outros solos.

Essa conclusão foi também observada por Pereira et al. (2002), ao encontrarem o valor de 290 g.kg⁻¹ na avaliação de teores de água para compactação máxima do solo no ensaio de Proctor em uma Terra Roxa Estruturada (Latossolo Roxo, Nitossolo).

A densidade máxima do solo aumenta à proporção em que o teor de água crítico diminui com o aumento do esforço de compactação. Solos argilosos têm menores valores de densidade máxima e maiores valores do teor de água crítico para compactação que

os arenosos. As diferenças entre médias desses valores entre solos argilosos e arenosos diminuem com o aumento dos teores de matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1993).

A redução da densidade máxima do solo e o aumento do teor de água crítico para compactação com o conteúdo de matéria orgânica são atribuídos ao seu baixo valor de densidade e ao aumento do conteúdo de água do solo determinada por sua adição (Ekwue & Stone, 1995).

Citando diversos autores, Stone & Ekwue (1993) afirmam que a matéria orgânica reduz a compactação do solo e que isso ocorre em função do aumento da sua estabilidade. Acrescentam que grandes conjuntos de moléculas de água retidas ao redor de partículas de solo com alto conteúdo de matéria orgânica conferem a estes solos a propriedade de resistirem à compactação. Os autores aduzem também que aumentos nos pontos máximos dos parâmetros de resistência do solo com referência ao grau de compactação são influenciados pela classe de solo e pelo tipo de material orgânico.

Vários experimentos realizados nos Estados Unidos, mencionados por Wagner et al. (1994), mostraram que a ruptura de agregados do solo ocorre próximo ao ponto do teor de água crítico determinado no ensaio Proctor Normal. Esses mesmos estudos indicam uma correspondência inversa entre o total de grandes agregados remanescentes após o cultivo do solo e o ponto de densidade máxima indicado pelo ensaio Proctor Normal.

Modelos de predição de resultados do ensaio Proctor Normal foram desenvolvidos para estimar o teor ótimo de água para compactação, a densidade máxima do solo e a curva de compactação do solo, baseados em algumas de suas propriedades intrínsecas como o conteúdo de areia, silte, argila e matéria orgânica, a partir de 39 amostras de solos. Uma boa correlação foi obtida entre propriedades intrínsecas do solo e o conteúdo ótimo de água com o valor do coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,86. A forma da curva de compactação de Proctor foi estimada usando duas linhas que interceptam o teor ótimo de água e o ponto de densidade máxima. Um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,72 entre valores medidos e estimados foi obtido para valores de densidade no desenvolvimento da curva de compactação de Proctor (Wagner et al., 1994).

As Especificações Gerais para Obras Rodoviárias, instruções adotadas e exigidas pelo DNER (1971b), em seu capítulo Terraplenagem, item Aterros, postula o seguinte: “Todas as camadas (de solo) deverão ser convenientemente compactadas. Para o

corpo dos aterros, deverão sê-lo na umidade ótima, mais ou menos 3%, até se obter a massa específica aparente seca correspondente a 95% da massa específica aparente máxima seca, do Ensaio DNER-ME 47/64. Para as camadas finais, aquela massa específica aparente seca deve corresponder a 100% da massa específica aparente máxima seca, do referido ensaio. Os trechos que não atingirem as condições mínimas de compactação e máxima de espessura (30 cm) deverão ser escarificados, homogeneizados, levados à umidade adequada e novamente compactados, de acordo com a massa específica aparente seca exigida.”

4.3.4 Pressão de rodados sobre o solo

Em se tratando de pressões sobre massas isotrópicas, Yoder (1959a) postula que devem ser empregadas as equações de Boussinesq. Essas equações são aplicadas em materiais modelos, que são perfeitamente elásticos e homogêneos e que seguem a Lei de Hooke:

$$S = E \cdot \delta \dots \dots \dots (1)$$

onde:

S = deformação;

E = módulo de elasticidade;

δ = tensão.

De acordo com o modelo de Boussinesq, a pressão vertical a uma determinada profundidade abaixo da superfície do solo em função de um ponto de carga sobre a superfície, é a seguinte:

$$\sigma_z = k \cdot P \cdot z^{-2} \dots \dots \dots (2)$$

$$k = 3 / 2\pi \cdot \{ 1 + (r / z)^2 \}^{5/2} \dots \dots \dots (3)$$

onde:

σ_z = pressão na massa de solo à profundidade z;

k = módulo de deformabilidade;

P = pressão sobre a superfície do solo;

r = distância radial do ponto de aplicação da carga;

z = profundidade.

A partir da equação (2) é visto que as pressões verticais são dependentes da profundidade e da distância radial do ponto de aplicação do carregamento e independentes das propriedades do meio que as transmite.

Nas últimas décadas a evolução da utilização de máquinas e equipamentos na colheita florestal tem sido enorme. Isso se deu principalmente ao avanço da evolução dos sistemas de colheita, da mecanização, do aumento no comprimento de toras e do melhor treinamento de técnicos e operários (Stohr apud Lima & Sant'Anna, 2001).

Abordando as perspectivas atuais do manejo florestal, Fiedler et al. (2001) aduzem que uma meta importante é o desenvolvimento de modelos de manejo sustentado e exploração de baixo impacto ambiental, objetivando diminuir os danos causados pela exploração, aumentar o incremento anual da floresta remanescente após o corte, melhorar o aproveitamento dos recursos florestais e capacitar a mão-de-obra utilizada na exploração florestal.

Scopel et al. (1992) mencionam que alguns sistemas de exploração deveriam ser pesquisados com intuito de reduzir a compactação. Acrescentam que, recentemente, os estudos em compactação dos solos têm aumentado, mas os resultados desses estudos não são suficientes para fornecer informações adequadas aos técnicos florestais a fim de melhor manejarem estes sítios.

Citando Katon (1989), Scopel et al. (1992) argumentam que a magnitude da mudança na densidade do solo nem sempre é útil como índice do estado físico do solo após sua compactação. Isso significa que as pesquisas devem ser orientadas no sentido de prover conhecimentos para a elaboração de modelos que são necessários como ferramentas no manejo da compactação do solo, considerando o sistema solo-água-máquina-planta.

O uso de maquinários móveis e pesados na colheita de madeira induz à ocorrência de processos físicos e mecânicos no solo de uso florestal. Os efeitos visíveis são os sulcos ou as trilhas formadas pelos pneumáticos e esteiras no transporte de cargas. A magnitude do dano depende do equipamento utilizado, do solo e das condições climáticas, conforme verificado por Hendrison apud Martins (1995).

O primeiro trabalho visando analisar o efeito de uma máquina agrícola sobre o solo, causado por roda revestida de borracha, segundo Mialhe (1993), com base em Reaves & Cooper (1960), supostamente foi realizado por Culpin em 1937. O autor acrescenta

que na década de 1950 surgiram os principais trabalhos responsáveis pelo enorme avanço do conhecimento sobre o efeito dos rodados agrícolas nos solos, que ocorreu nos anos seguintes.

Os efeitos causados ao solo podem ser minimizados do ponto de vista operacional adotando-se módulos de corte em que os tratores possam atuar em áreas menores dentro do talhão, reduzindo as trilhas de tráfego e com o transporte de menores cargas, de forma a não comprometer a sua produtividade. Outras alternativas estão sendo adotadas em algumas empresas, tais como optar por tratores florestais com rodados de esteiras, pneus duplos, pneus com maiores dimensões com baixa pressão interna de inflagem e alta flutuação (BPAF) e rodados geminados, com intuito de proporcionar um menor impacto na compactação do solo (Lima et al., 2001; Fenner, 2002).

O efeito do tamanho do pneu, da carga dinâmica, da pressão interna de inflagem e das múltiplas passadas na densidade do solo varia significativamente com a classe de solo. Para minimizar o acréscimo na densidade do solo é necessário diminuir a pressão de inflagem e aumentar as dimensões dos rodados, segundo Koger et al. (1985).

Por outro lado, resumindo a experiência brasileira em compactação de solos, obtida durante a construção de vinte e uma barragens no Brasil e três em Portugal, Cruz & Bezerra (1971) aduzem que os equipamentos de compactação utilizados são os mais variados, incluindo rolos tipo pé-de-carneiro, desde 49,0 kN até 231,5 kN, rolos de pneus em geral do tipo pesado de 490,5 kN, com pressão de inflagem de pneus de 345 kPa a 552 kPa e rolos vibratórios de pneus de 117,7 kN e 255,1 kN.

Normas específicas para compactação de aterros destinadas à construção de rodovias, elaboradas e exigidas pelo DNER (1971a), recomendam o uso preferencial de rolos autopropelidos sobre pneumáticos para solos arenosos, argilosos ou pouco argilosos, do que se depreende que os rolos de pneus compactam melhor o solo que outras máquinas de compactação.

Aumentando-se a área superficial sujeita a uma dada pressão, haverá um efeito de aumento na pressão máxima experimentada em todas as profundidades dentro do perfil do solo sob carga. Conseqüentemente, reduzindo-se a pressão superficial pela distribuição da carga sobre uma área maior decrescerá a pressão máxima na subsuperfície, mas a um grau mais baixo do que aquela proporcional ao decréscimo na pressão superficial. Isso é demonstrado por Soehne (1958) ao avaliar o padrão de distribuição de pressões sob um pneu

traseiro de um trator agrícola, sob cargas variáveis entre 2943 N e 9810 N e pressão de inflagem de 83 kPa (Scopel et al., 1992).

Taylor et al. (1989), pesquisando solo do Canadá com 140 g.kg^{-1} de conteúdo de água e sob uma carga dinâmica constante de 33 kN, imposta por pneus agrícolas com as dimensões de 18.4 x 42, em polegadas, em rodado simples e 13.6 x 38 polegadas, em rodado duplo, concluíram que o emprego de máquinas com rodado duplo reduziu significativamente a compactação do solo na superfície e em profundidade.

Trabalhando com máquinas de corte e extração por baldeio com rodados de pneus, Fernandes (1996) observou que um *harvester* Valmet-Implemater 636H apresentou maior pressão de contato pneu-solo que um *forwarder* Valmet 636, ao passo em que, com diferentes tipos de rodados, a menor pressão de contato foi determinada por *harvester* de esteiras Fiat-Allis com cabeçote Elof Hanson, comparado a um *forwarder* de rodas Engesa 510.

Sever (1987) menciona que, devido ao rodado de esteiras, a pressão sobre o solo produzida por *forwarders* com esse tipo de rodado é menor que a de *forwarders* com rodado de pneus, de mesmo peso.

Tanto os parâmetros área de contato pneu-solo como carga por eixo em máquinas de corte e extração por baldeio são relevantes. Assim, Fernandes & Leite (2001), ao apresentarem proposta de metodologia para ensaio de máquinas colhedoras de madeira, incluem parâmetros capazes de caracterizar os atributos resultantes da interação entre dimensões e distribuição da massa do espécime submetido a ensaio. Na metodologia proposta estão relacionados os pesos da máquina, tamanho de rodados, transferência de peso e atributos físicos de avaliação da compactação, a saber: densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, teor de água, resistência do solo à penetração, dentre outros.

A redução da pressão sobre o solo, o transporte de cargas menores, o aumento do número de rodas, a adoção de rodas maiores e mais largas e a presença de um sistema de suspensão adequado reduzem a capacidade de compactação das máquinas (Fenner, 2002).

4.3.5 Cobertura de galhada

Denomina-se galhada à cobertura do solo formada de resíduos florestais resultantes de colheita, constituída principalmente de ponteiros, ramos e folhas, que em sua maior parte ainda não sofreram decomposição microbiana. A maior parte dos ramos têm diâmetro abaixo de 6 cm ou 5 cm, conforme o sistema de colheita adotado.

McDonald & Seixas (1997) aduzem que sistemas de colheita que adotam corte no comprimento (*cut-to-length*) estão crescendo como alternativa de colheita florestal. E que muitas razões são citadas para isso, incluindo melhoria nas condições de trabalho, o restabelecimento mais efetivo do produto final e reduzir impactos ambientais. As máquinas colhedoras espalham ramos e ponteiros de árvores em seu modo de processar os troncos. Essa cobertura do solo reduz a compactação do solo pela colocação de uma camada de absorção de cargas, reduzindo a pressão sobre o solo resultante da passagem de máquinas.

Trilhas cobertas com galhada mista de *Pinus taeda* e *Pinus palustris* apresentaram menor decréscimo em macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica saturada após três percursos de um *forwarder* Franklin 170 com pneus 23.1 x 26, inflados a 210 kPa, carga total de 167 kN em solo arenobarrento (McDonald & Seixas, 1997).

Valores de quantidades de serrapilheira de 3,7 kg.m⁻² foram observados em floresta do gênero *Pinus*, em camadas variando entre quatro a nove centímetros de espessura, conforme Zinn (1998). Citando outros autores, o autor informa sobre a acumulação de 2,7 kg.m⁻² de serrapilheira sob *Pinus caribaea* na América Central, enquanto que, para o município de Viçosa, no estado de Minas Gerais, cita o valor de 4,0 kg.m⁻².

A presença de uma camada orgânica sobre o solo minimiza o impacto da exploração e extração por baldeio, protegendo a superfície do solo mineral. Um dos efeitos da presença de galhada é reduzir a densidade do solo, ao se adicionar material com densidade mais baixa. De um modo geral, para cada 10% de aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo, sua densidade decresce 0,05 g.cm⁻³, segundo McKee & Haselton (s.d.).

Boden & Herbert (1988) referem-se à importância da galhada, afirmando que pesquisadores, desde a Finlândia até ao Brasil, enfatizam a necessidade de conservação da biomassa, do solo e da água nas áreas de produção florestal. E que esses recursos devem ser protegidos e manejados ativamente se a produtividade do sítio está sendo otimizada.

Koehler et al. (2000) propuseram uma metodologia de quantificação de resíduos florestais de colheita baseada em interseção, que consiste na contagem do número de peças que cruzam uma determinada linha amostral. O método carece de ajustes em função das espécies florestais e de características locais. Justificam a sua introdução por aduzirem que o método usual de coleta e pesagem de resíduos, embora eficiente, torna-se demorado e oneroso e mais adequado para materiais finos e homogêneos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

5.1.1 Área experimental

A área experimental está localizada no município de Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil, nas coordenadas geográficas 22° 56' de latitude sul e 48° 29' de longitude oeste, altitude média de 860 metros, inserida em região fisiográfica de cerrados.

Os antecedentes indicam que até 1981 a área foi utilizada em exploração citrícola e agropecuária, quando foi realizado o primeiro plantio florestal, cuja colheita deu-se em 1987, completando a primeira rotação, em sistema de talhadia. Ocorreu rebrota do povoamento a partir de 1987 e nova colheita em 1994, ensejando a segunda rotação e, ao mesmo tempo, encerrando o primeiro ciclo de produção florestal. O segundo ciclo foi iniciado com a reforma do povoamento em 1994 e a colheita respectiva em 2001, quando foram efetuadas as avaliações que constituem o escopo do presente estudo.

5.1.2 Clima

A unidade de produção florestal pesquisada, segundo a classificação de Wilhelm Koeppen, está localizada em área de clima Cfa, temperado (mesotérmico), região constantemente úmida, tendo quatro ou mais meses com temperaturas médias superiores a 10°C, cuja temperatura do mês mais quente é igual ou superior a 22°C. O total de precipitação pluvial anual apresenta a média de 1524,5 mm, com total médio no mês mais seco de 37,4 mm e 256,7 mm no mês mais chuvoso. A temperatura média anual é de 20,5°C, sendo 17,2°C no mês mais frio e 23,4°C, no mês mais quente (Martins, 2001).

5.1.3 Geologia

A área pertence à Formação Adamantina, que abrange um conjunto de facies cuja principal característica é a presença de bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, cor róseo a castanho, estratificação cruzada, com espessuras variando entre 2 a 20 metros, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho-avermelhado a cinza castanho, maciços ou com acamamento plano-paralelo grosseiro, freqüentemente com marcas de onda a microestratificação cruzada (Soares et al. apud IPT, 1981).

5.1.4 Solo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo álico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado (Pessotti, s.d.), ou Oxisol, segundo Soil Taxonomy (USDA, 1999), com declividade variando entre 5% e 8%.

O Latossolo Vermelho Amarelo é constituído por solos não-hidromórficos que apresentam um horizonte A fraco ou moderado, um B latossólico, horizonte C e características análogas às do Latossolo Amarelo e do Latossolo Vermelho Escuro. São solos profundos, distróficos, fertilidade natural baixa, saturação por bases baixa e ocorre em relevo plano a suave ondulado (Vieira, 1988).

A composição granulométrica do solo do talhão florestal pesquisado revelou os teores médios de 430 g.kg⁻¹ de argila, 480 g.kg⁻¹ de areia total e 90 g.kg⁻¹ de silte. A areia total, subdividida em suas várias frações, revelou os seguintes teores: areia muito grossa: 10 g.kg⁻¹, areia grossa: 32 g.kg⁻¹, areia média: 206 g.kg⁻¹, areia fina: 152 g.kg⁻¹ e areia muito fina: 80 g.kg⁻¹.

Tais valores de granulometria satisfazem o modelo para determinação do conteúdo de argila em solos com Horizonte B latossólico, apresentado por Kiehl (1979), a saber:

$$A = 83,00 - (0,82 \times At) \dots\dots\dots (4)$$

em que:

A = conteúdo de argila, %;

At = conteúdo de areia total, %.

Imediatamente após a passagem do trator florestal transportador autocarregável (*forwarder*), em novembro de 2001, foi efetuada fertilização mineral mecanizada com aplicação da seguinte composição: 1500 kg.ha⁻¹ de calcário dolomítico, 220 kg.ha⁻¹ da formulação NPK 09-28-14, adicionada de microelementos: 0,5% de boro, 0,2% de zinco e 0,1% de cobre.

A composição química do solo para fins de fertilidade revelou os teores médios apresentados no Quadro 1 (Anexo).

5.1.5 Espécie florestal

A espécie florestal pesquisada foi *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, oriunda de ACS (Área de Coleta de Sementes), de primeira rotação e segundo ciclo, plantio de 1994, colhida aos 91 meses de idade, espaçamento inicial de plantio de 3x2 m, com 1.350 árvores.ha⁻¹, no momento do corte. O DAP (diâmetro à altura do peito) médio era de 0,144 m, a altura média do povoamento na fase de colheita, de 23,10 m, a altura das árvores dominantes, de 28,0 m. O IMA (incremento médio anual) era de 39,91 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ e o volume comercial médio de madeira com casca do talhão foi 262,75 m³.ha⁻¹.

5.1.6 Máquinas florestais empregadas

5.1.6.1 Colhedora de madeira (*harvester*)

Colhedoras florestais ou *harvesters* são processadores com função adicional de derrubada. Efetuam, portanto, funções múltiplas: derrubar, desgallar, destopar, descascar, traçar, transportar e amontoar. Constituem-se de uma máquina-base com rodado de esteiras, de maior largura, ou de pneus, modernamente do tipo baixa pressão e alta flutuação, grua e cabeçote multi-funcional.

O corte do povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden foi efetuado pelo concurso de um *harvester* (Figura 1) montado sobre estrutura de escavadora para obras civis Caterpillar, modelo 320B, motor Cat 3066T, de seis cilindros em linha, turboalimentado, cilindrada de 6.400 cm³, potência bruta de 100 kW a 1.800 rpm, sobre rodado de esteiras de garra tripla com 0,60 m de largura, vão livre de 0,475 m. Dotado de cabeçote processador (Figura 2) Partek Forest modelo 965BR, capacidade máxima de corte de

0,65 m de diâmetro, velocidade dos rolos de alimentação entre 4,5-6,0 m.s⁻¹, grua com alcance máximo de 9,0 m, momento máximo de levantamento da lança de 222,7 kN.m e peso total de 202,2 kN, segundo Duratex (2000) e Caterpillar (2001).



Figura 1. *Harvester* Caterpillar 320B em operação de corte florestal.



Figura 2. Cabeçote derrubador-processador em operação.

5.1.6.2 Trator florestal transportador (*forwarder*)

Trator florestal transportador autocarregável ou *forwarder*, geralmente com chassis articulado, é constituído basicamente de cabina de proteção com comandos, carreta e grua. O trator compõe-se de motor, transmissões, sistemas hidráulicos e

eletromagnéticos, de locomoção e direção. A carreta é composta por estrado, fueiros e sistema de frenagem independente do trator. A grua, de acionamento hidráulico, é formada por rotator, coluna, braço articulado, lança telescópica e garra com movimento de abrir e fechar. A capacidade de transporte do autocarregável varia com a potência do motor do trator e as dimensões da carreta. São dotados de rodados de pneumáticos largos ou do tipo baixa pressão e alta flutuação, podendo ter entre dois a oito eixos motrizes. Possuem a velocidade máxima de 25 km/h (Suzano, s.d.), em geral, podendo alguns modelos atingir 45 km/h (Volvo, s.d.), velocidade de deslocamento utilizada apenas em estradas pavimentadas e sem carga.

O modelo A-25C do *forwarder* Volvo (Figura 3) empregado no estudo é um veículo adaptado, com motor Diesel turboalimentado de 6 cilindros em linha, cilindrada total de 6.730 cm³, potência bruta no motor de 190 kW a 2.400 rpm, com três eixos, motrizes, massa total de 205,5 kN, tração máxima de 264,9 kN, carroçaria projetada originalmente para transporte primário de minério de ferro e substituída por estrado com fueiros para baldeio de madeira, capacidade de carga de 209,8 kN, grua de carregamento e descarregamento Cranab 12/50 com momento máximo de levante de 154,0 kN.m e alcance máximo de 8,2 m. Rodado de pneus do tipo industrial, radial sem câmara, designação dimensional 750/65R-25, capacidade de carga de 104 kN (Michelin, 2002). Pressão sobre o solo estimada em 70 kPa no eixo dianteiro e 120 kPa nos dois eixos traseiros, segundo informações citadas no catálogo do fabricante, conforme Volvo (s.d.).

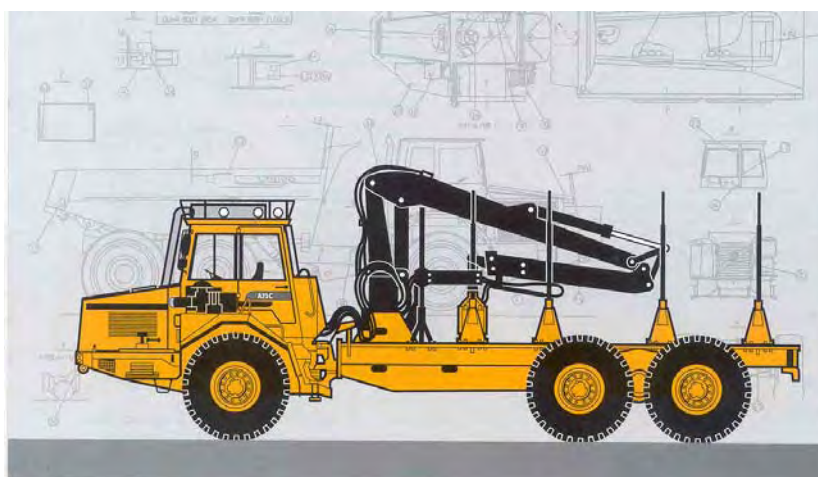


Figura 3. *Forwarder* Volvo A-25C empregado na extração por baldeio.

O limite de altura de carga, determinado pelo comprimento usual dos fueiros, foi 2,10 m. Considerando a medida da largura total do estrado da carreta de 2,88 m e do comprimento de 4,95 m, o volume calculado de carga útil compreendeu 29,94 m³ ou, aproximadamente, 30 m³.

De acordo com os valores apresentados, o *forwarder* pesquisado apresenta uma razão entre peso movimentado e potência do veículo igual a 1,181 kN.kW⁻¹. Portanto, esse valor se enquadra na classificação de Seixas (2002), segundo a qual este parâmetro oscila entre 0,996 kN.kW⁻¹ e 1,992 kN.kW⁻¹, com a maioria dos tratores florestais autocarregáveis situando-se na faixa compreendida entre 1,138 kN.kW⁻¹ e 1,281 kN.kW⁻¹. Essa característica da máquina é atribuída ao fato de tratar-se de um projeto originalmente destinado à mineração e construção civil e posteriormente adaptado para o trabalho florestal.

5.1.7 Esquema de corte e extração por baldeio adotado

O esquema de corte de madeira (Figura 4) constou primeiramente de desbaste sistemático de cada oitava linha do povoamento, efetuada pelo *harvester* mencionado. A seguir foi realizado rebaixamento de tocos nas linhas de desbaste por meio de rebaixador frontal de tesoura de dupla ação, de acionamento hidráulico, em sistema independente, acoplado a trator agrícola Massey Ferguson MF-290. Com acesso ao povoamento a cada oito linhas, o *harvester* efetuava derrubada e processamento das árvores de quatro linhas contíguas do povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, situadas à direita da máquina e, no mesmo percurso, de três linhas adjacentes localizadas à sua esquerda. A sistemática de corte do *harvester* foi devida à constituição do projeto construtivo da máquina, em função do posicionamento do conjunto coluna, lança e cabeçote derrubador-processador em relação à cabina de comando (Figura 1). O amontoamento de toras era efetuado concomitantemente a cada processamento, dispondo a madeira beneficiada no sentido transversal às linhas de plantio. O processamento de madeira constou de desgalhamento, desponte e traçamento, obtendo-se toras curtas de seis metros de comprimento.

A extração por baldeio (Figura 4) foi realizada pelo *forwarder* citado, a cada oito linhas do povoamento, constando de transporte sem carga fora e dentro do talhão,

apreensão por meio da garra e carregamento da carreta de pilhas de toras posicionadas no eito de corte na operação com *harvester*, transporte com carga dentro e fora do talhão e descarga de madeira em estaleiros localizados em extremidades de talhões.

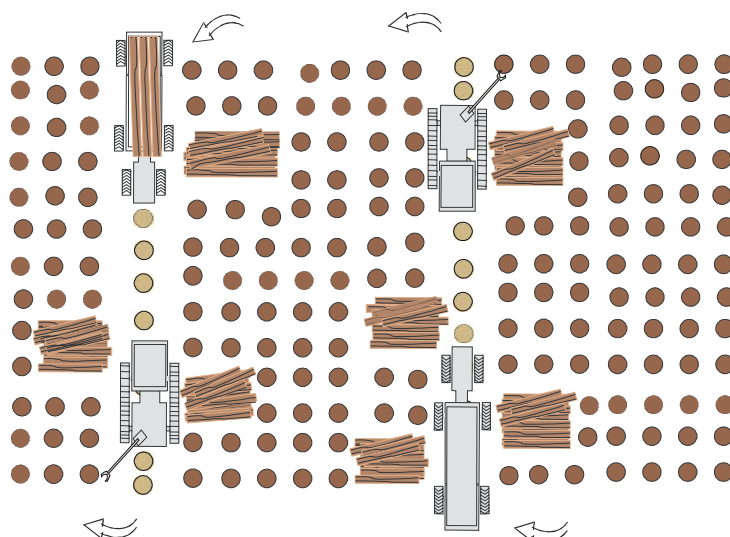


Figura 4 – Esquema de corte e extração por baldeio adotado.

5.2 Métodos

5.2.1 Análises físicas do solo

As análises físicas do solo foram efetuadas conforme Embrapa (1997).

5.2.1.1 Densidade do solo

Realizou-se a determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico de Uhland, em que foram retiradas no campo amostras de solo com estrutura indeformada na faixa de profundidade entre 5 cm e 10 cm, com quinze repetições, avaliando a massa de um volume conhecido de solo seco em estufa a 105-110°C, até peso constante. O volume interno do anel (ou cilindro) que encerra a amostra (esse volume, avaliado com uso de um paquímetro em cinco repetições), revelou o valor médio de 95,54 cm³.

5.2.1.2 Porosidade total

A porosidade total foi determinada pelo método da centrifugação de amostras de solo, na faixa de profundidade entre 5 cm e 10 cm, com quinze repetições. O aparelho utilizado no ensaio foi uma centrífuga clássica Kokusan Enshinki, modelo H-1400 pF, fabricação japonesa, com capacidade para ensaiar quatro amostras de solo por turno.

O método de centrifugação consiste em colocar a gaze na extremidade inferior dos anéis volumétricos com amostras de solo, saturar com água as amostras, retirar o excesso de água, pesar quatro amostras isoladamente e com os suportes do aparelho de centrifugação. Equilibrar as massas dos quatro conjuntos e colocá-los na bandeja de rotação da centrífuga, com proteção de papel de filtro nas extremidades superior e inferior da amostra, fechar a centrífuga e selecionar a primeira rotação desejada (no caso, 800 rpm), correspondente ao limite inferior de tensão matricial de água retida pelos macroporos do solo e centrifugar por trinta minutos. Retirar os anéis da bandeja de centrifugação, pesar os cilindros com gaze, com os conjuntos e equilibrar os pesos novamente. Recolocar os conjuntos na bandeja de centrifugação e selecionar a segunda rotação (no caso, 3.300 rpm), correspondente à tensão matricial limite de absorção de água do solo pelas plantas, centrifugar por trinta minutos, pesar os anéis e assim sucessivamente. Calcular a percentagem de água retida pelas amostras de solo em cada rotação. O valor da porosidade total é a diferença entre o peso de água da amostra saturada e o peso da amostra seca a 105-110°C, referido em peso ou volume.

A percentagem em volume de porosidade total do solo foi calculada conforme Vomocil (1965), pela equação:

$$\% \text{ água em volume} = \% \text{ água em peso} \times \text{densidade do solo} \dots \dots \dots (5)$$

A correspondência entre rotações por minuto (rpm) utilizadas no aparelho centrifugador e respectivas tensões de retenção de água, é apresentada no Quadro 2 (Anexo).

5.2.1.3 Macroporosidade

Também denominada porosidade de aeração, é referida em percentagem do volume total. A macroporosidade foi avaliada pelo método da centrifugação de amostras de solo, entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com quinze repetições.

O índice de macroporosidade, ou seja, a retenção de água nos macroporos do solo corresponde até ao limite de tensão matricial de $-0,006$ mPa (ou $-6,0$ kPa). Esse ponto ocorre quando o aparelho centrifugador opera na rotação padronizada de 800 rpm, durante 30 minutos. A macroporosidade do solo é representada pela quantidade de água, em peso ou volume, igual à diferença entre o peso da amostra saturada de água e após submetida a centrifugação na rotação de 800 rpm, por 30 minutos, correspondente à tensão matricial de -6 kPa, 60 cm de coluna d'água ou $-0,06$ atmosferas.

A macroporosidade referida em percentagem em volume foi determinada conforme Vomocil (1965), com aplicação da equação (5).

5.2.1.4 Microporosidade

A determinação da microporosidade foi realizada pelo método de centrifugação de amostras de solo obtidas entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com quinze repetições e cálculo respectivo. Corresponde ao teor percentual de água da amostra de solo, em peso ou volume, compreendido entre o limite de água retida na amostra de solo segundo a tensão matricial de -6 kPa e a amostra seca em estufa a $105-110^{\circ}\text{C}$, até peso constante.

A microporosidade referida em percentagem em volume foi determinada conforme Vomocil (1965), com aplicação da equação (5).

5.2.1.5 Água disponível no solo

O ponto em que o aparelho centrifugador opera na rotação de 3.300 rpm, após 30 minutos e a tensão de centrifugação atinge o valor de $-0,1$ MPa (ou -100 kPa), corresponde à tensão matricial de água do solo que representa o limite de absorção pelas raízes das plantas, de um modo geral.

A água disponível é determinada pelo cálculo da diferença entre conteúdos de água na amostra de solo em que o aparelho centrifugador opera no intervalo de tensões entre $-6,0$ kPa (limite superior da microporosidade) e -100 kPa (limite de absorção pelas plantas), o que é respectivamente obtido nas rotações de 800 rpm e 3.300 rpm, após 30 minutos.

O teor de água disponível contido na amostra de solo, obtida entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com quinze repetições e referido em percentagem volumétrica, também foi determinado com emprego da equação (5).

5.2.1.6 Taxa de infiltração de água no solo

A taxa de infiltração de água no solo é também denominada velocidade de infiltração de água ou permeabilidade. Foi determinada pelo método do permeametro de carga variável, empregando quinze amostras de solo, obtidas entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com estrutura indeformada e saturadas de água por capilaridade, em anéis volumétricos de Uhland.

O permeametro (Figura 5) empregado nessa análise é constituído por um suporte munido de nível de bolha, destinado a nivelar horizontalmente a mesa de ensaio, com aberturas para encaixe das cubas destinadas a alojar o conjunto de amostras de solo contidas nos cilindros de Uhland, as conexões das amostras com os tubos e os tubos medidores de vazão.



Figura 5. Permeametro de carga variável com amostra de solo saturada.

Determina-se o coeficiente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica saturada, empregando-se a equação de Darcy, conforme Klute (1965):

$$K = (a \cdot l / A \cdot t) \ln (H_1 / H_2) \dots \dots \dots (6)$$

onde:

k = coeficiente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica saturada, cm.h^{-1} ,

a = área de seção transversal do tubo do permeametro, cm^2 ,

l = altura da amostra, cm ,

A = área de seção transversal da amostra, cm^2 ,

t = tempo de infiltração, h ,

H_1 = altura da amostra + referência inicial (H_1) do tubo do permeametro, cm ,

H_2 = altura da amostra + referência final (H_2) do tubo do permeametro, cm .

5.2.1.7 Temperatura do solo

A temperatura do solo foi determinada pela introdução de uma bateria de geotermômetros na massa do solo, com seus termoelementos instalados a 7,5 cm de profundidade. O método de determinação da temperatura do solo utilizou a variação da oscilação térmica diária em períodos contínuos entre 8 e 19 horas, com medições a cada hora, portanto perfazendo doze determinações, com três repetições.

Foram utilizados geotermômetros da marca Testo, modelo 905-T1 (Figura 6), com resolução de $0,1^\circ\text{C}$, amplitude de medição entre -50°C a 350°C (Testo, s.d.), constituídos por uma haste metálica de 200 mm de comprimento, seção cilíndrica, em cuja extremidade inferior há um sensor do tipo bateria termoeletrica (termoelemento), do tipo k , que registra de forma contínua as oscilações térmicas do solo na profundidade em que está instalado. Na parte superior do aparelho há uma cabeça com articulação rotativa, onde se localiza o mostrador, possibilitando giros de até 180° . O aparelho fornece avaliações de temperatura em graus centígrados ($^\circ\text{C}$) ou graus Fahrenheit ($^\circ\text{F}$).

Foram efetuadas determinações de temperatura do solo em três épocas:

- 1) a primeira a 17 de agosto de 2001, compreendendo quatro condições: talhão vizinho sem colheita, floresta com tráfego anterior ao experimento (testemunha) e percurso do *harvester* com e sem o revestimento de galhada;
- 2) a segunda a 25 de outubro de 2001, com as situações: trânsito anterior (testemunha), percurso do *harvester* sem cobertura de galhada e percurso do *forwarder* com e sem a cobertura de galhada;

3) a terceira a 29 de janeiro de 2002, com as situações: trânsito anterior (testemunha), percurso do *harvester* sobre galhada e percurso do *forwarder* com e sem o recobrimento de galhada.



Figura 6. Geotermômetro Testo empregado na pesquisa.

5.2.1.8 Estabilidade de agregados a seco

A avaliação da estabilidade de agregados do solo foi efetuada pela determinação da distribuição de tamanhos de agregados do solo de amostras retiradas entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com quinze repetições sob cobertura de galhada, por peneiramento mecânico a seco e cálculo do índice DMG (diâmetro médio geométrico).

O aparelho para análise de distribuição de tamanhos de agregados a seco (Figura 7) é composto por um conjunto de sete peneiras metálicas de 200 mm de diâmetro, envolvido por um suporte metálico, onde são posicionadas as peneiras segundo diâmetros decrescentes de malhas, com as seguintes dimensões: 4,00 mm, 2,00 mm, 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm, 0,125 mm e 0,053 mm. Esse conjunto recebe a ação de um movimento rotatório a 300 rpm e, ao mesmo tempo, vibratório, produzido por motor elétrico com potência de 187 watts (Marconi, s.d.). O topo do conjunto de peneiras é revestido por cobertura emborrachada destinada a receber impactos intermitentes efetuados por uma barra metálica com massa de 15 N, que se movimenta em queda livre, funcionando como um martelo mecânico destinado a neutralizar ação de colar partículas finas na face inferior das peneiras,

produzida por efeitos da eletricidade estática resultante do movimento de agitação do conjunto de peneiras.

O resultado do ensaio de distribuição de tamanhos de agregados do solo pode ser expresso em percentagem de material retido em cada peneira em relação à amostra inicial analisada ou pelos índices DMP (diâmetro médio ponderado) e DMG (diâmetro médio geométrico).

No presente estudo, foi utilizado o índice DMG, determinado pela seguinte expressão:

$$\text{DMG} = \text{antilogaritmo natural } \sum (\ln X_i \cdot W_i) / W_t \dots \dots \dots (7)$$

em que:

DMG = diâmetro médio geométrico de agregados, adimensional;

X_i = média de classes de diâmetros de agregados, mm;

W_i = peso de agregados retidos na classe de diâmetro X_i , g;

W_t = peso total da amostra de agregados, g.



Figura 7. Aparelho vibratório para peneiramento a seco de amostras de solo.

Segundo Baver et al. (1973), o peso dos agregados em uma fração de um dado tamanho se multiplica pelo logaritmo (natural) do diâmetro médio dessa fração; a

soma dos produtos correspondentes a todas as frações divididas pelo peso total da amostra, é o índice DMG (o antilogaritmo desse número).

5.2.1.9 Textura do solo

A textura do solo foi determinada por ensaio de caracterização, pelo método do densímetro, também denominado método do hidrômetro ou de Bouyoucos, em amostras retiradas na faixa entre 5 cm e 10 cm de profundidade, com cinco repetições. O método baseia-se no princípio de que as partículas de solo em suspensão comunicam determinada densidade ao líquido. Com um densímetro, Bouyoucos relacionou as densidades com os tempos de sedimentação e com a temperatura, segundo a Lei de Stokes, calculando com esses dados a percentagem de partículas presentes na suspensão e seus diâmetros.

A lei de Stokes tem a seguinte expressão, segundo Kiehl (1979):

$$T = 9 \cdot V_i \cdot h / 2 (D_r - D_{ag}) g \cdot r^2 \dots\dots\dots(8)$$

onde:

T = tempo de sedimentação ou leitura, s;

V_i = viscosidade absoluta do líquido, no caso, coeficiente de viscosidade da água, poises;

h = altura de queda, cm;

D_r = densidade da partícula, $g \cdot cm^{-3}$;

D_{ag} = densidade da água, $g \cdot cm^{-3}$;

g = aceleração da gravidade, $cm \cdot s^{-2}$;

r = raio da partícula, cm.

O método de Bouyoucos resume-se em dispersar a amostra de TFSA (terra fina seca ao ar, passada em peneira de 2 mm) em um agitador elétrico a 12.000 rpm, transferir para um cilindro de sedimentação e ler as densidades com hidrômetro a vários intervalos de tempo. A perfeita dispersão da amostra é fundamental para qualquer método de análise granulométrica. Em função disso é recomendável adicionar solução de hexametáfosfato de sódio e agitar em alta rotação por cinco minutos. Em seguida passa-se a suspensão para o cilindro de sedimentação e completa-se o volume com o hidrômetro mergulhado no líquido. Após homogeneizar a suspensão por um minuto, com um agitador manual, são efetuadas leituras com o hidrômetro. A primeira leitura é feita após quatro

minutos do início de sedimentação das partículas, que corresponde à quantidade de argila e silte em suspensão, uma vez que a fração areia sedimentou. A segunda leitura é realizada duas horas após e corresponde à argila em suspensão, uma vez que todas as partículas de silte já teriam ultrapassado a massa líquida que envolve o densímetro.

As leituras de densidade do líquido correspondem às densidades das partículas de solo em suspensão, segundo uma tabela de conversão proposta por Bouyoucos (Kiehl, 1979), para uma temperatura de 19,45°C. Como a temperatura do líquido influi na sua viscosidade e, conseqüentemente, na velocidade de sedimentação das partículas, faz-se a correção das leituras, multiplicando-se a diferença entre a temperatura padrão e a do líquido pelo fator 0,62 e somando-se ou subtraindo-se do valor de densidade encontrado na tabela, caso a temperatura da suspensão seja maior ou menor que 19,45°C. Para isso deve-se tomar a temperatura média da suspensão, entre as duas leituras efetuadas.

5.2.2 Análises químicas do solo

As análises químicas do solo para fins de fertilidade foram efetuadas em quinze repetições, segundo metodologia descrita em Raij & Quaggio (1983).

As análises efetuadas segundo essa metodologia foram as seguintes: acidez do solo em CaCl₂ (pH), acidez potencial (H+Al), teor de matéria orgânica, teores de cálcio, fósforo, magnésio e potássio. Com base nesses valores, foram determinadas a soma de bases permutáveis (valor S), a capacidade de troca catiônica (valor T ou CTC) e a saturação de bases (valor V).

Os resultados de análise química do solo do talhão florestal pesquisado, para fins de fertilidade, são apresentados no Quadro 1.

5.2.3 Análises mecânicas do solo

5.2.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração

A determinação da resistência mecânica do solo à penetração foi realizada por meio da introdução de um penetrógrafo perpendicularmente na massa de solo, desde a superfície até à profundidade máxima de 30 cm, seguida de leitura e interpretação dos valores obtidos graficamente.

O penetrógrafo utilizado foi da marca *Soil Control*, modelo SC-60, dotado de haste com 600 mm de comprimento, 9,53 mm de diâmetro, possuindo em sua extremidade inferior um cone de penetração conforme a norma *Standard ASAE S313-1* (ASAE, 1999), com as seguintes dimensões: área da base de 129,28 mm², diâmetro da base de 12,83 mm e ângulo sólido de 30° (Figura 8).



Figura 8. Determinação da resistência do solo à penetração com penetrógrafo *Soil Control*.

Os valores fornecidos pelo aparelho, em kgf.cm⁻², foram transformados em kPa, multiplicando-os pelo fator $f = 98,0057$. Foram realizadas leituras em treze profundidades predeterminadas: 0,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 7,5 cm; 10,0 cm; 12,5 cm; 15,0 cm; 17,5 cm; 20,0 cm; 22,5 cm; 25,0 cm; 27,5 cm e 30,0 cm, com cinco repetições por parcela experimental. Nos tratamentos com *harvester*, com e sem cobertura de galhada, não foi possível atingir a profundidade projetada de 30 cm. Em cada repetição foi avaliado o respectivo conteúdo de água do solo, determinado pelo método gravimétrico, em que todas as amostras de solo referentes a cada etapa da pesquisa foram coletadas no mesmo dia e horário, evitando-se diferenças decorrentes de teores de água do solo.

A resistência mecânica do solo à penetração foi efetuada em três momentos: tráfego anterior (testemunha), no percurso da máquina colhedora (*harvester*) e no percurso da máquina transportadora (*forwarder*).

Os tratamentos avaliados foram subdivididos da seguinte forma:

- a) trânsito anterior ao experimento: área de percurso do rebaixador de tocos, na linha do rebaixador de tocos e em um rastro antigo (de origem desconhecida);
- b) percurso da máquina colhedora: *harvester* com e sem galhada;
- c) percurso da máquina transportadora: *forwarder* com e sem galhada.

5.2.3.2 Resistência mecânica do solo ao cisalhamento

A resistência mecânica do solo ao cisalhamento foi realizada *in situ*, sobre amostras indeformadas de solo na faixa entre 5 cm e 10 cm de profundidade, sob cobertura de galhada e com quinze repetições. A determinação desse parâmetro foi efetuada conforme Bailey & Weber (1965) e Cohron (1963), com emprego do método gráfico de cisalhamento, denominado *sheargraph* e determinação da coesão máxima, ângulo de atrito interno e da tensão de cisalhamento.

O *sheargraph* (Figura 9) é constituído por uma placa com palhetas que é inserida na massa de solo com estrutura indeformada. Uma mola de aço recebe a aplicação de uma força normal predeterminada, acionada pelo operador através do punho do aparelho, situado em sua parte superior. Um tambor cilíndrico intermediário, contendo internamente um mancal do tipo rolamento de esferas de aço, possibilita transmitir à amostra de solo *in situ* o esforço torsional produzido pelo operador, força essa que é continuamente assinalada em um papel que contém o gráfico registrador do aparelho, intercambiável.

O gráfico registrador apresenta três estágios de pressões, correspondentes à aplicação das forças normais de 5 psi, 10 psi e 15 psi, ou, respectivamente, 34,47 kPa; 68,95 kPa e 103,42 kPa. Traçando-se o segmento de reta que contém o mínimo de três pontos de ruptura do solo, correspondentes aos pontos de máxima resistência ao cisalhamento, segundo as respectivas forças normais aplicadas, determina-se graficamente a envoltória de Mohr-Coulomb. Fazendo-se a regressão linear entre os pontos correspondentes às tensões normais (x) e respectivas forças de resistência ao cisalhamento (y), obtém-se a equação da reta $y = ax + b$, em que o termo dependente a é o coeficiente angular da reta (tangente do ângulo de atrito interno) e b , o termo independente, é o coeficiente linear e representa a coesão do solo. Assim obtém-se, analiticamente, os valores de coesão e do ângulo de atrito interno da amostra de solo ensaiada.



Figura 9. Avaliação da resistência do solo ao cisalhamento com aparelho *sheargraph*.

O *sheargraph* é um aparelho projetado para ser capaz de efetuar rápidas determinações da resistência do solo ao cisalhamento, constituído por um gerador de rupturas do solo do tipo necessário para evidenciar acuradamente as propriedades de corte e facilmente portátil. Em operação, a cabeça de cisalhamento é completamente introduzida na massa de solo, a tensão normal é aplicada à superfície de cisalhamento por meio da flexão axial de uma mola e a tensão de cisalhamento é aplicada pela torção de um tambor cilíndrico registrador, até que o solo se rompa. Após ocorrer a fratura do solo por cisalhamento, a força normal é reduzida gradualmente. Desde que o solo sustentará apenas um dado somatório de tensões de cisalhamento, a pena registradora traçará a curva das tensões de cisalhamento em relação às forças normais aplicadas, até que a última é reduzida a zero (Cohron, 1963).

A resistência mecânica do solo ao cisalhamento é então representada pela equação:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \dots\dots\dots (9)$$

em que:

τ = resistência mecânica do solo ao cisalhamento, kPa;

c = coesão do solo, kPa;

σ = força normal, kPa;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo, graus.

5.2.3.3 Ensaio Proctor Normal

As amostras deformadas de solo foram coletadas entre 5 cm e 10 cm de profundidade antes do início da colheita e imediatamente após as fases de corte e de extração por baldeio, secas ao ar, em todas as áreas correspondentes aos tratamentos pesquisados: trânsito anterior, *harvester* com e sem galhada e *forwarder* com e sem galhada. Em seguida as amostras foram tamisadas em peneira de 2 mm, obtendo-se TFSA e colocadas em bandejas para serem submetidas ao ensaio Proctor Normal. O ensaio, padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e designado como Método Brasileiro n. 33 (MB-33), consiste em compactar amostras de solo no interior de um recipiente cilíndrico, com as dimensões externas de 10 cm de diâmetro e 13 cm de altura e aproximadamente 1000 cm³ de volume, em três camadas sucessivas e interligadas, sob a ação de 25 golpes de um soquete com massa de 24,5 N, em queda livre de uma altura de 30 cm, produzindo uma energia de compactação de aproximadamente 58,9 N.cm.cm⁻³ (Caputo, 1973). Com cada valor de densidade do solo correspondendo a um conteúdo de água, plota-se um gráfico com quatro a seis pontos, traçando-se uma curva, representada por polinômio de segundo grau, da forma $y = ax^2 + bx + c$, que, ajustada com emprego do *software Curve Expert 1.3*, obtém-se a curva de compactação da amostra do solo. A densidade máxima do solo é obtida por derivação da equação ajustada obtida e o teor de água ótimo ou crítico para compactação corresponde ao conteúdo de água no ponto de densidade máxima.

Foram efetuadas três repetições por tratamento, cada qual correspondendo a uma curva de compactação do Ensaio Proctor Normal, obtendo-se um total de quinze repetições.

Grau de compactação, ou compactação relativa, é definido como sendo a relação entre a densidade média e a densidade máxima de uma amostra de solo.

5.2.3.4 Formas de imposição de cargas ao solo

As formas de imposição de cargas ao solo determinadas pelas máquinas de corte e extração por baldeio se referem a condições freqüentes de ocorrência de

carregamentos estático e dinâmico, ou de ambos, sobre a massa de solo, que são objetos do presente estudo.

5.2.3.4.1 Sob condição estática

A imposição de cargas ao solo segundo uma condição estática significa um conjunto de pressões transmitidas através dos rodados das máquinas de corte e de extração por baldeio, nos momentos em que estas se encontram estacionadas sobre o talhão e com seus órgãos ativos imobilizados e posicionados sobre a máquina-base.

Sob essa condição de trabalho foram desenvolvidos os cálculos de que trata o capítulo *Pressão de rodados sobre o solo*, considerando-se a máquina para corte (*harvester*) em ordem de marcha (Caterpillar, s.d.; Duratex, 2000) e a de baldeio (*forwarder*) com carregamento de 210 kN, conforme Volvo (s.d.).

5.2.3.4.2 Sob condição dinâmica

5.2.3.4.2.1 Máquinas deslocando-se sobre o talhão

Considera-se, nesse caso, que as máquinas deslocam-se sobre o terreno, sem operar os seus órgãos ativos.

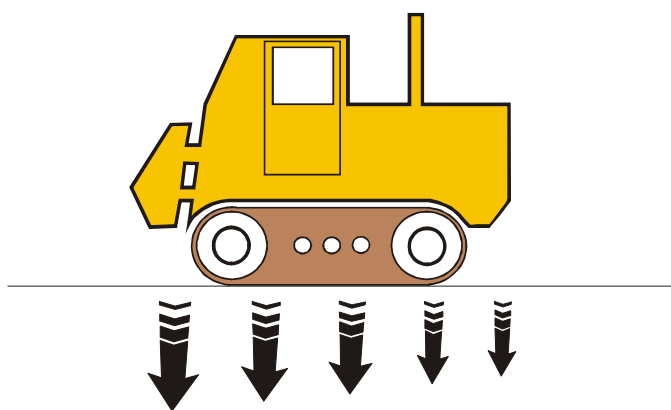


Figura 10. Esquema ilustrativo de distribuição de pressões ao solo por rodado de trator de esteiras (conforme Janzen, 1990).

Em se tratando da máquina sobre rodado de esteiras (*harvester*), ocorre a distribuição de cargas dinâmicas ao solo reportada por Janzen (1990). Nessa condição, durante o deslocamento da máquina, a aplicação de cargas dinâmicas é de maior magnitude sob a porção traseira da esteira (e vice-versa), o que é mostrado esquematicamente na Figura 10. No momento em que são acionados os freios e a máquina estaciona, a maior imposição de cargas é conferida pela porção dianteira da esteira.

No caso de rodado de pneumáticos, a aplicação de cargas ao solo é representada classicamente por isóbaras de pressões, denominadas bulbos de pressões, mostrados na Figura 11, conforme Soehne (1958).

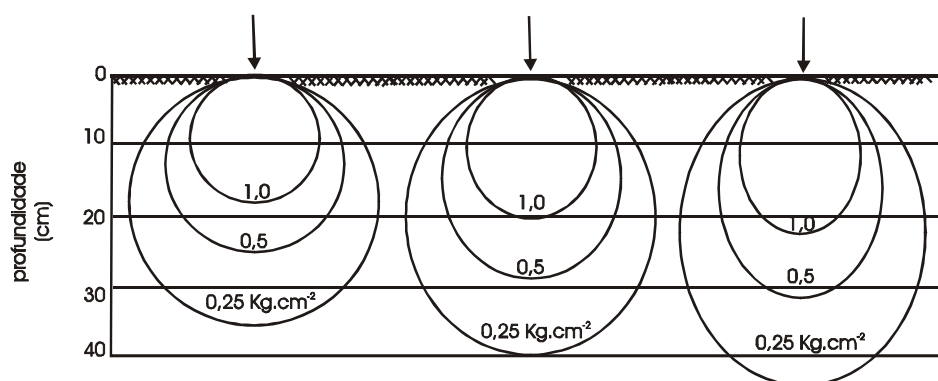


Figura 11. Isóbaras de pressões sob rodado de pneumáticos de tratores (Soehne, 1958).

Uma comparação entre isóbaras de pressões sob rodado de tratores de esteiras e de pneus, com a mesma massa, determinadas em tanque de solo de laboratório nos Estados Unidos, conforme Reaves & Cooper (1960), é apresentada na Figura 12.

5.2.3.4.2 Máquinas em operação

Ocorre quando as máquinas encontram-se em operação na área do talhão, porém paradas, realizando algumas atividades efetivas de trabalho.

No caso do *harvester*, as esteiras permanecem pousadas sobre o solo e as cargas dinâmicas nele aplicadas, além do próprio peso da máquina, são as oriundas dos movimentos do braço e da lança que suportam e proporcionam movimentos ao órgão ativo, o cabeçote derrubador-processador, segundo arcos de círculos de raios e direções variáveis. O

momento máximo de elevação de cargas de madeira da máquina, nessas condições, é de 223 kN.m, segundo informações do catálogo do fabricante referentes ao modelo pesquisado (Caterpillar, 2001).

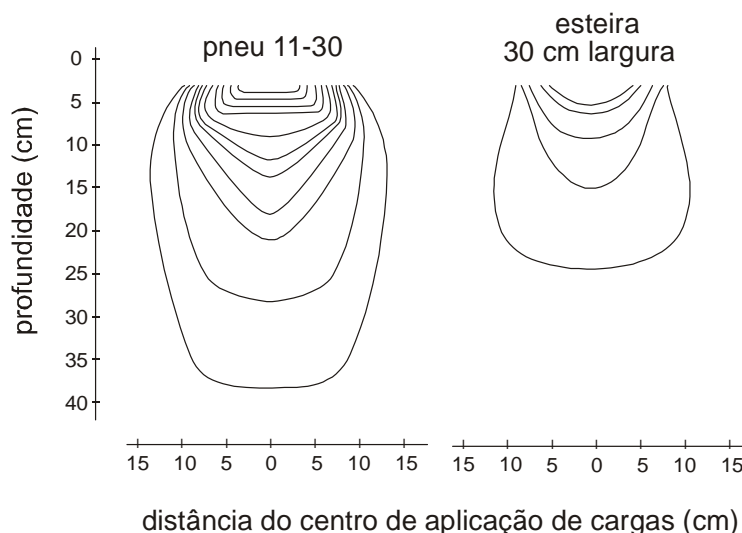


Figura 12. Comparação entre bulbos de pressões impostas ao solo por rodados de pneus e esteiras (Reaves & Cooper, 1960).

Sob essa condição de trabalho Costantini & Doley (2001) aduzem que são produzidas vibrações no solo que variam conforme o *harvester* avança e que forças de compactação manifestam-se maiores quando a máquina está estacionada e vibrando, efetuando operações de derrubada, processamento e condução de fustes, particularmente quando a lança está estendida.

No caso do *forwarder*, o trator florestal transportador encontra-se estacionando em um ponto do ramal de extração, estando aplicados os freios da máquina e efetuando a operação de carregamento de madeira, na forma de toras de seis metros de comprimento. O sistema de sustentação e propulsão encontra-se em condição estática e, afóra a carga exercida pelo próprio peso da máquina nesse estado, um acréscimo de cargas dinâmicas é resultante dos movimentos da grua, acionada hidraulicamente pelo conjunto da coluna, braço e lança telescópica, estando a garra de apreensão de madeira carregada, embora ocorra também os mesmos movimentos com a garra sem carga e, nesse caso, induzindo menores cargas dinâmicas. O momento máximo de elevação é de 154 kN.m, conforme Volvo

(s.d). O diagrama de momentos máximos de elevação de cargas de madeira é apresentado na Figura 13, segundo informações do fabricante da máquina (Volvo, s.d.).

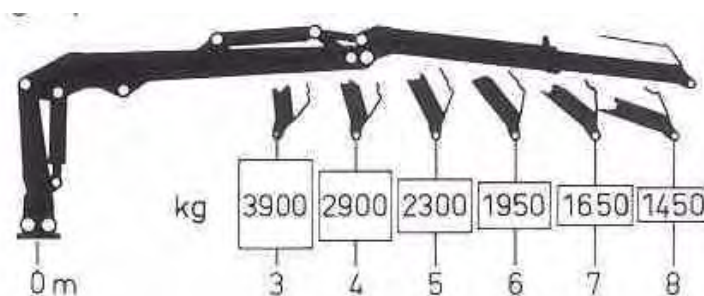


Figura 13. Esquema de momentos máximos de elevação de cargas permitidas no trabalho do *forwarder* (Volvo, s.d.).

As forças de compactação induzidas nessa condição pelo *forwarder* também não são uniformes ao longo do eito. As vibrações mostram-se maiores quando a máquina está parada e recolhendo toras. Ainda que exista o conceito de “uma passada de *forwarder*”, a máquina realmente move-se para trás e para frente em curtas distâncias no sentido de conseguir uma posição na qual as toras podem ser eficientemente coletadas, assim resultando efetivamente em passadas duplas, conforme Costantini & Doley (2001).

5.2.3.5 Pressão de rodados sobre o solo

Para avaliação da pressão unitária exercida pela massa das máquinas, transmitida ao solo por meio de seus respectivos rodados, foram determinadas as pressões unitárias rodado-solo da seguinte forma:

5.2.3.5.1 Colhedora de madeira (*harvester*)

A avaliação da carga estática no caso do *harvester* foi determinada pelo quociente da divisão entre a massa total da máquina na condição de repouso e a área de contato com o solo da esteira que a equipa.

A massa total do conjunto máquina-base e cabeçote derrubador-processador e a área de contato rodado-solo foram obtidas a partir de informações de catálogo

do fabricante, conforme Caterpillar (1997) e manual de treinamento de operadores (Duratex, 2000).

A área de contato rodado-solo foi determinada conforme Barger et al. (1966), em que:

$$S = l \times b \dots\dots\dots(10)$$

onde:

S = área de contato esteira-solo, cm²;

l = distância entre eixos das rodas motriz e guia das esteiras, cm;

b = largura das sapatas das esteiras, cm.

5.2.3.5.2 Trator florestal transportador (*forwarder*)

A avaliação da pressão unitária sobre o solo exercida pelo *forwarder* baseou-se no quociente da divisão entre a massa da máquina com e sem carga completa de madeira e a área de contato pneu-solo.

A massa total do trator transportador autocarregável (*forwarder*) em ordem de marcha, com e sem a carga útil especificada em projeto, foi determinada segundo informações do fabricante, conforme Volvo (1997, s.d.).

A área de contato rodado-solo foi avaliada através da determinação da medida da interseção pneu-solo por meio de inserção de papel cartolina clara sob as rodas do veículo, com e sem carregamento completo e delimitação do perímetro da seção por aplicação de jato de tinta escura, conforme metodologia descrita por Novak (1989). As áreas assim obtidas foram recuperadas por câmara fotográfica digital *Sony* modelo *Mavica MV-128*, transferidas para um microcomputador Pentium 700 MHz e analisadas por meio de um *software* denominado *Turbocad R4-0*, em que foram determinadas as áreas de contato pneu-solo, conforme ilustração à Figura 14. Foram efetuadas 18 repetições, sendo 3 para cada eixo de tração da máquina (dianteiro, intermediário e traseiro), com e sem o total de carga útil.

As características dos pneus que equipam o referido *forwarder* são apresentadas no Quadro 3, conforme Michelin (2002) e Duratex (2001).

A designação comercial do fabricante (750/65R25) para exprimir as dimensões do pneu do *forwarder* em estudo tem a seguinte significação:

750 = medida da largura do pneu sem carga, à altura do flanco, mm;

65 = medida do percentual da dimensão da largura do pneu correspondente à altura do flanco (487,5 mm);

R = identificação do pneu com estrutura radial;

25 = diâmetro interno do aro, polegadas (635 mm).

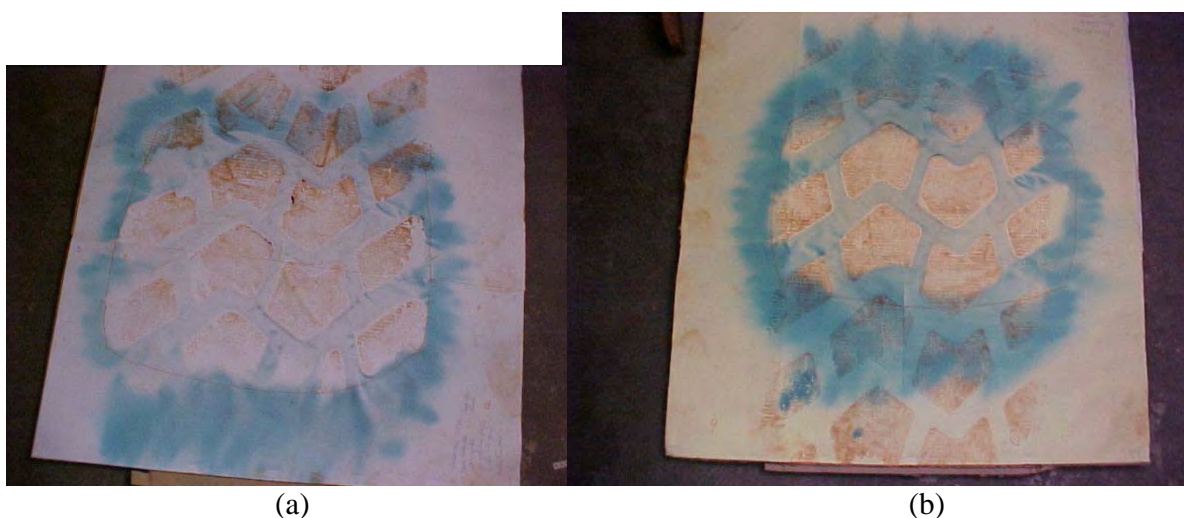


Figura 14. Áreas de contato rodado-solo para o *forwarder*, respectivamente com carga completa de madeira (a) e sem carregamento (b).

Quadro 3. Características dos pneumáticos que equipam o *forwarder*.

Marca	Michelin
Tipo	industrial
Classificação	radial sem câmara
Designação dimensional comercial	750/65R25
Dimensões (sem carregamento):	
Altura do flanco	487,5 mm
Diâmetro do aro	635 mm
Diâmetro total do pneu	1.610 mm
Pressão de inflagem	441 kPa
Carga máxima permitida	104 kN
Área de contato pneu/solo teórica (conforme Mialhe, 1980).	0,606769 m ²

Fonte: Michelin (2002)

A área de contato pneu-solo teórica foi determinada segundo Mialhe (1980) com base na seguinte expressão:

$$S = 1,005 R \cdot b \dots\dots\dots(11)$$

em que:

S = área de contato pneu-solo, cm²;

R = raio do pneu, considerando-se a condição de rolamento com carga, cm;

b = largura do pneu, considerando-se a deformação na área de contato, cm.

5.2.3.6 Cobertura de galhada

A quantidade de galhada depositada sobre o solo da área experimental (Figura 15) foi determinada por meio de coleta dos resíduos florestais de colheita, utilizando gabaritos com área de 0,5 m² (0,5 m x 1,0 m), separação do material em classes de diâmetro de ramos, secagem em estufa a 105^o-110^oC e pesagem até peso constante, conforme Fenner (2001).



Figura 15 – Aspecto da cobertura de galhada da área experimental.

As classes adotadas no estudo para diâmetros de ramos foram: menor que 0,5 cm; entre 0,5 cm - 2,5 cm e entre 2,5 cm - 7,5 cm. O volume de folhas foi incluído na primeira classe. Foram levantados dez pontos de determinação de quantidade de cobertura de galhada, efetuando-se, portanto, dez repetições desse parâmetro.

5.3 Análise de resultados

5.3.1 Tratamentos e subtratamentos

As variáveis dos parâmetros indicadores de alteração física e mecânica do solo foram obtidas segundo um delineamento experimental de blocos inteiramente casualizados, com cinco tratamentos, a saber:

- a) áreas sem corte e extração por baldeio, retratando o efeito de pressões sobre o solo ocorridas antes da colheita, referentes a julho de 2001 (tratamento trânsito anterior ou testemunha);
- b) áreas de corte do segundo ciclo florestal, realizado em agosto de 2001 e sem extração por baldeio (operação com *harvester* efetuada com e sem galhada);
- c) áreas de corte e extração por baldeio referentes ao segundo ciclo (operação com *forwarder* efetuada com e sem galhada, realizado em outubro de 2001, após o percurso do *harvester*).

No caso dos parâmetros estabilidade de agregados a seco e resistência mecânica ao cisalhamento foram avaliados apenas os tratamentos com cobertura de galhada.

5.3.2 Parâmetros de avaliação

São os seguintes os parâmetros de avaliação:

- a) Densidade do solo,
- b) Porosidade total,
- c) Macroporosidade,
- d) Microporosidade,
- e) Água disponível no solo,
- f) Taxa de infiltração de água no solo,
- g) Temperatura do solo,
- h) Estabilidade de agregados a seco,
- k) Matéria orgânica do solo,
- p) Resistência mecânica do solo à penetração,
- q) Resistência mecânica do solo ao cisalhamento,
- r) Densidade máxima do solo,
- s) Teor de água crítico para compactação,

- t) Grau de compactação,
- u) Área de contato rodado-solo,
- v) Pressão de rodados sobre o solo.

5.3.3 Delineamento experimental

O delineamento empregado foi o de blocos inteiramente casualizados, com quinze repetições por tratamento, com exceção do parâmetro resistência mecânica do solo à penetração, este com cinco repetições. Nessas condições, os números de graus de liberdade do resíduo, para todas as análises de variância, possibilitaram uma precisão aceitável para o experimento. As variáveis assim obtidas foram submetidas à análise de variância, por meio do pacote estatístico SAS (*Statistical Analysis System*), versão 6.12, com aplicação do teste de Tukey a 5% e a 10% de significância.

Para os parâmetros físicos do solo foram testadas as interações entre testemunha e outros tratamentos, corte versus extração por baldeio, galhada dentro de corte e galhada dentro de baldeio, pelo teste F, no nível de 95% de probabilidade.

Os intervalos de confiança das médias obtidas para os parâmetros avaliados foram determinados conforme Ferreira (1996).

5.3.4 Coleta de dados

Os dados foram coletados entre 5 cm e 10 cm de profundidade do solo, com exceção da avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. Esta camada situa-se no estrato de solo sob grande influência das cargas impostas pelo maquinário de corte e extração por baldeio e, conseqüentemente, onde se manifestam com clareza as reações do solo, segundo Costa (1990), Santos Filho e Reissmann (1988), Costa et al. (1984), Rosa Jr. (1984), Beltrame e Taylor (1980) e Bacchi (1976), dentre outros.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Parâmetros físicos do solo

6.1.1 Densidade do solo

O Quadro 4 apresenta as médias de valores de densidade do solo para os tratamentos avaliados. Os resultados obtidos são concordantes com observações de UFRGS (1978), segundo as quais os valores de densidade para solos argilosos situam-se dentro da amplitude de 1,0 a 1,6 g.cm⁻³.

Quadro 4. Valores médios de parâmetros físicos do solo e respectivas comparações entre os tratamentos pesquisados.

Parâmetro	Trânsito anterior	Harvester com galhada	Harvester sem galhada	Forwarder com galhada	Forwarder sem galhada
Densidade do solo (g.cm ⁻³)	1,41 ± 0,03 b	1,46 ± 0,04 b	1,38 ± 0,01 b	1,43 ± 0,04 b	1,59 ± 0,02 a
Porosidade total (%)	43,67 ± 0,74 bc	44,96 ± 1,04 ab	48,06 ± 0,70 a	41,44 ± 1,20 cd	38,38 ± 0,53 d
Macroporosidade (%)	10,48 ± 0,79 a	10,71 ± 1,16 a	12,91 ± 1,21 a	10,90 ± 1,45 a	6,06 ± 0,64 b
Microporosidade (%)	33,20 ± 0,52 ab	34,25 ± 0,62 a	35,14 ± 0,94 a	30,54 ± 0,54 b	32,32 ± 0,49 ab
Água disponível (%)	5,53 ± 0,38 a	7,80 ± 0,88 a	7,33 ± 0,88 a	6,25 ± 0,55 a	6,35 ± 0,39 a
Taxa infiltração (cm.h ⁻¹)	3,66 ± 0,94 a	1,57 ± 0,71 a	0,89 ± 0,40 a	2,33 ± 0,90 a	1,20 ± 0,31 a
DMG	1,065 ± 0,002 b	1,077 ± 0,001 a	-	1,051 ± 0,001 c	-

(*) Valores acompanhados de mesmas letras, nas mesmas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Análise de variância a 5% e 10% de significância dos valores médios obtidos demonstra que a densidade do solo no tratamento baldeio (*forwarder*) sem galhada foi maior que os demais tratamentos estudados, que não diferiram entre si.

Considerando-se as áreas de contato rodado-solo do *forwarder* com carregamento de madeira e que a densidade do solo foi maior em condições de solo desprovido desse revestimento de proteção, conclui-se que a camada de galhada do corte anterior contribuiu para reduzir a densidade do solo por intermédio do amortecimento de cargas impostas pelo rodado do *forwarder* na fase de baldeio de madeira.

Assim, a densidade do solo apresentou maiores valores absolutos médios nas áreas submetidas à extração de madeira sem o revestimento de galhada, condição em que ocorreu maior imposição de cargas ao solo e de forma direta. Dentre os tratamentos avaliados, esse resultado é concordante com Geist et al. (1989), ao postularem que o nível de compactação considerado prejudicial ocorre quando há um acréscimo na densidade do solo entre 15 a 20% do valor inicial da densidade, no caso do presente estudo representado pela testemunha, em que ocorreu o trânsito anterior ao experimento.

As conclusões advindas do experimento, segundo as quais ocorreu aumento da densidade do solo na extração de madeira sem cobertura de galhada em função de maior imposição de cargas ao solo do que nesse baldeio efetuado sobre galhada, bem como em relação aos demais tratamentos, nas devidas proporções concordam também com a teoria formulada por Hakansson et al. (1988), segundo a qual, a densidade do solo aumenta linearmente com o logaritmo da pressão aplicada, até um determinado valor dessa pressão.

Ainda assim, baseando-se em conceito formulado por Lira Filho (1994), a pesquisa experimental foi realizada sobre área que apresentava adensamento do solo, uma vez que todos os tratamentos, incluindo a testemunha, apresentavam valores médios de densidade superiores a $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ (Quadro 4).

No teste de interações (Quadro 5) foi significativo o contraste entre densidade do solo na fase de baldeio de madeira, comparando-se as condições com e sem revestimento de galhada, por ter sido maior a densidade do solo na segunda condição.

Esse resultado refletiu-se em outros atributos físicos, tais como porosidade total e macroporosidade do solo, em que o teste de interações entre tais condições

de recobrimento do solo demonstrou melhoramento desses atributos na extração de madeira efetuada sobre o recobrimento de galhada.

Outro contraste significativo no teste de interações ocorreu entre as fases de corte e baldeio de madeira. Isso significa que, considerando-se conjuntamente os valores médios de densidade do solo com e sem proteção de galhada nessas duas etapas, a fase de baldeio de madeira induziu maior densidade que a de corte.

Quadro 5. Valores médios dos parâmetros físicos do solo, por combinação de tratamentos, com indicação de diferenças significativas e não significativas (*).

Tratamento	Densidade do solo (g.cm ⁻³)	Porosidade total (%)	Macroporosidade (%)	Microporosidade (%)	Água disponível (%)	Taxa de infiltração (cm.h ⁻¹)
Testemunha	1,41 a	43,67 a	10,48 a	33,20 a	5,53 b	3,66 a
Outros	1,46 a	43,21 a	10,15 a	32,91 a	6,93 a	1,50 b
Corte	1,42 b	46,51 a	11,81 a	34,40 a	7,56 a	1,24 a
Baldeio	1,51 a	39,91 b	8,48 b	31,43 b	6,30 b	1,77 a
Corte c/ galhada	1,46 a	44,96 b	10,71 a	34,25 a	7,80 a	1,57 a
Corte s/ galhada	1,38 b	48,06 a	12,92 a	34,54 a	7,33 a	0,89 a
Baldeio c/ galhada	1,43 b	41,44 a	10,90 a	30,54 a	6,25 a	2,33 a
Baldeio s/ galhada	1,59 a	38,38 b	6,06 b	32,32 a	6,35 a	1,20 a
Média geral	1,45	43,30	10,21	32,97	6,65	1,93
C.V. (%)	7,43	7,82	41,41	8,93	38,03	140,35

(*) Valores seguidos de mesmas letras, dentro de compartimentos de colunas, não diferem entre si no nível de 5% de significância, pelo teste F.

Resultados idênticos e controversos sobre o comportamento da densidade do solo quando submetido ao tráfego de máquinas florestais de corte e baldeio de madeira foram obtidos por Fernandes (1996). Em Nitossolo Vermelho, textura argilosa, da região de Botucatu, a operação com um trator equipado com guincho arrastador TMO, com 51 kPa de pressão sobre o solo e com um *harvester* Valmet-Implementer 636H, com pressão de 107 kPa, determinaram maiores densidades do solo que um *forwarder* Valmet-Implementer 636, pressão de contato rodado-solo de 80 kPa, na faixa de profundidade entre 0-15 cm. Já em Latossolo Vermelho, textura argilosa, da região de Guanhães, avaliado na mesma faixa de profundidade, demonstrou que maior incremento na densidade do solo foi determinado pelo

conjunto trator-guincho arrastador (51 kPa), ao passo em que menores incrementos na densidade do solo foram obtidos com o trabalho de um *forwarder* Engesa 510, com 151 kPa de pressão sobre o solo e de um *harvester* constituído por uma escavadora de esteiras Fiat Allis S-90, induzindo 46 kPa de pressão sobre o solo, equipada com cabeçote processador Elof Hanson. Em contraponto aos resultados obtidos no presente experimento, as conclusões apontadas por Fernandes (1996) supostamente possam estar associadas às formas de imposição de cargas, sobretudo exercida por compressão contínua à superfície do solo, determinada pelo arraste de toras efetuado por trator com guincho.

Alterações na densidade do solo em função do tráfego de máquinas de corte e baldeio de madeira foram avaliadas por Lima (1998) em Latossolo Vermelho Amarelo, textura argilosa. Um trator florestal arrastador (*skidder*) Caterpillar 525, com pressão de contato rodado-solo de 74 kPa e pressão de inflagem de pneus 179 kPa determinou maior densidade do solo que um trator florestal derrubador-amontoador (*feller-buncher*) Hidro AX-411EX, pressão de contato de 97 kPa e pressão de inflagem de pneus de 193 kPa. Em relação aos resultados obtidos no presente estudo, como a operação com a primeira máquina citada sucedeu ao da segunda e ambas apresentaram densidade do solo maior que na condição antes do corte, pode-se supor que a maior densidade do solo ocorrida no arraste de madeira tenha sido devida a um efeito cumulativo de pressões sucessivas sobre o solo.

Jakobsen & Greacen (1985) mostraram acréscimos na densidade em solos arenosos em trilhas de operação de um *forwarder* Volvo de 26 t (255 kN), com pressão de inflagem de pneus de 320 kPa, operando em povoamentos de Pináceas, atingindo os mesmos valores para esse parâmetro sobre rastros antigos e em áreas sem trânsito, portanto confirmando as conclusões do presente estudo, para o caso de baldeio sobre galhada.

6.1.2 Porosidade total

O Quadro 4 apresenta os valores médios de porosidade total do solo para os vários tratamentos estudados. Em linhas gerais, o corte efetuado sem galhada proporcionou aumento na porosidade total do solo, em relação ao tratamento testemunha, ao tempo em que o baldeio sem galhada a reduziu. Tal resultado foi evidenciado a 5% e a 10% de significância. Por outro lado, o corte sobre galhada não diferiu do tratamento testemunha, do

mesmo modo que a fase de baldeio sobre galhada, em função do fator amortecimento de pressões do maquinário sobre o solo.

Ocorreu interação entre a porosidade total do solo considerando-se isoladamente as fases de corte e baldeio de madeira (Quadro 5), o que significa que esse atributo físico do solo aumentou em função de etapa de derrubada e processamento de madeira e decresceu durante a extração, supostamente pelo *modus operandi* de imposição de cargas ao solo. Assim, conclui-se que a fase de corte, em relação à testemunha, representou uma influência melhoradora da porosidade total do solo, ao passo em que na fase de baldeio foi observado um comportamento controverso em relação ao observado no corte, em razão de decréscimo desse importante atributo físico do solo.

Também ocorreu interação entre presença e ausência de galhada e a porosidade total do solo, em relação tanto ao corte como ao baldeio de madeira, nas condições do experimento. Esse resultado indica ter ocorrido influência da camada de galhada sobre o comportamento do solo quanto ao parâmetro porosidade total. Durante o corte, o tráfego do *harvester* na ausência de galhada contribuiu para aumentar a porosidade total, ao passo em que, na fase de baldeio, a passagem do *forwarder* resultou em sua redução. Supõe-se que esse comportamento do solo possa estar relacionado à magnitude e condições de imposição de cargas ao solo.

Os diferentes valores de porosidade total testados na interação na fase de corte com e sem a camada de galhada foram inversamente proporcionais aos valores de densidade do solo, resultados esses considerados compatíveis entre si e atribuídos a benefícios advindos de uma compactação moderada.

Conclusões discordantes são apresentadas por Lima (1998), ao observar reduções progressivas de valores médios de porosidade total em Latossolo Amarelo, com 720 g.kg⁻¹ de argila e 210 g.kg⁻¹ de areia, avaliados da superfície até 10 cm de profundidade, em função de operações de corte de eucalipto efetuado por *feller-buncher* Blount Hidro AX-411EX e arraste com *skidder* Caterpillar 525, ambos sobre rodados de pneus. Antes do tráfego florestal, a porosidade total do solo era de 66,03%, reduzindo-se para 62,62% após a passagem do *feller-buncher* e atingindo o valor de 59,58% depois do arraste de toras com o *skidder*. O autor aduz que o estrato de profundidade entre 0-10 cm apresentou maior diminuição dos espaços porosos na operação de corte, em função da compressão

exercida sobre o solo pelos rodados das máquinas. À luz dos resultados obtidos no presente estudo, supõe-se que as conclusões do autor possam ter sido devidas à formas de distribuição de cargas pelas máquinas utilizadas, ambas sobre rodados de pneumáticos de dois eixos.

Também Onofiok (1988) encontrou redução na porosidade total em áreas de tráfego ao longo das trilhas de um trator agrícola de pneus empregado na implantação da cultura do milho, em relação às linhas de cultura e áreas não trafegadas. O solo, classificado internacionalmente como Oxic Paleustult, com 712 g.kg^{-1} de areia e 148 g.kg^{-1} de argila em subsuperfície, foi avaliado desde a superfície até 10 cm de profundidade.

Secco et al. (1997) obtiveram valores para porosidade total, avaliada em diferentes sistemas de manejo de um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, utilizados para produção agrícola de grãos, entre 53% e 57%, portanto inseridos na classificação para esse parâmetro para solos argilosos, segundo Prevedello (1996). O confronto entre tais resultados, considerando-se a interdependência entre o decréscimo da porosidade total e o processo de compactação do solo, conforme Mantovani (1987), pode sugerir que a imposição de cargas em solos argilosos determinada por atividades florestais seja, de um modo geral, de maior magnitude que em atividades agrícolas. E ainda que foi crítico o valor médio determinado para o parâmetro porosidade total no tratamento *forwarder* sem galhada, uma vez que resultou em valor absoluto médio inferior ao mínimo esperado para solos argilosos, conforme Prevedello (1996).

6.1.3 Macroporosidade

Os valores médios de macroporosidade do solo dos tratamentos em estudo são apresentados no Quadro 4.

Análises de variância efetuadas a 5% e 10% de significância evidenciaram que, de um modo geral, a imposição de cargas ao solo não alterou a macroporosidade do solo nos tratamentos pesquisados, com exceção para o baldeio de madeira na ausência cobertura de galhada, supostamente por esta peculiaridade ter representado uma condição mais severa de imposição de cargas ao solo, nas condições do experimento.

Análise de interações entre tratamentos demonstrou que ocorreu interação significativa entre os valores médios de macroporosidade do solo para as fases de corte e baldeio de madeira (Quadro 5). Assim, pode-se concluir que, de uma forma global, o

baldeio de madeira resultou em redução na macroporosidade do solo em relação à fase de corte, em razão de condições rígidas de transferência de cargas ao solo ocorridas na fase de baldeio, resultado esse concordante com Roth et al. (1988), ao aduzirem que a compactação promove redução na macroporosidade do solo.

A permeabilidade ao ar avaliada na operação de baldeio de madeira, por sua vez, foi influenciada pelo fator presença ou ausência de recobrimento do solo por galhada. O resultado indicado pela interação significativa a 5% entre essas duas condições de campo demonstra isso. Assim, a operação de baldeio de madeira efetuada pelo *forwarder* sobre recobrimento de galhada resultou que a macroporosidade do solo apresentasse valores médios mais altos que no mesmo baldeio efetuada sem esse revestimento de proteção do solo.

Decréscimo de macroporosidade do solo em 6% foi também diagnosticada na Bélgica por Herbauts et al. (1996) em solos de textura média submetidos a tráfego florestal de colheita.

Por outro lado, os resultados mostram que a macroporosidade obtida no tratamento baldeio sem galhada não atinge o índice de 10% em volume, alcançado em todos os demais, não perfazendo, portanto, o mínimo necessário para o desenvolvimento de raízes, segundo preconizado por UFRGS (1978). McNabb & Startsev (1995) postulam que, quando o solo torna-se visivelmente deformado por sulcos produzidos por rodados de veículos, a macroporosidade atinge menos de 10% e, para Baver et al. (1973), valores críticos de macroporosidade estão abaixo dos compreendidos entre 10% e 16%. Para Herbauts et al. (1996), a macroporosidade menor que 10% significa o valor limite para a atividade microbiana aeróbica e a viabilidade de raízes.

A influência da galhada resultante da colheita de um povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden foi avaliada por Seixas et al. (1998). Os autores avaliaram alterações em algumas características físicas de um solo constituído por 900 g.kg⁻¹ de areia total e 50 g.kg⁻¹ de argila e silte e encontraram redução na macroporosidade na camada entre 5-10 cm de profundidade, após corte efetuado por motosserras e baldeio de madeira por trator agrícola Valmet 885S, tracionando carreta com eixos geminados e cargas de 65 kN. Foram registrados nas áreas sem galhada, antes e após corte e extração, os valores médios respectivos de 24% e 4%, para macroporosidade. Nas áreas com galhada mais folhas, a macroporosidade

passou de 18% para 3% e, com inclusão de cascas, os valores obtidos foram 19% e 2%. Assim, as conclusões resultantes dessa pesquisa são concordantes com as do presente estudo.

6.1.4 Microporosidade

A avaliação da microporosidade do solo revelou diferenças significativas entre tratamentos, embora todos não tenham diferido da testemunha (Quadro 4).

O baldeio de madeira, efetuado por trator florestal autocarregável em áreas sobre galhada, resultou em microporosidade do solo inferior às duas condições (com e sem galhada) de corte de madeira efetuado por *harvester*, resultado esse atribuído à aplicação mais equânime e uniforme de cargas ao solo na fase de corte mecanizado de madeira. Esses resultados referem-se à análise de variância à 5% e 10% de significância, com aplicação do teste de Tukey.

Esse comportamento do solo é justificado por Hakansson et al. (1988), ao ponderar que pequenos aumentos na proporção de poros menores que 30 μm podem ser encontrados como resultado do adensamento do solo, presumivelmente em consequência do colapso de poros maiores. Volumetricamente, eles podem proporcionar um aumento na capacidade de água disponível, mas pequena alteração no total de água disponível, uma vez que o volume de solo foi reduzido.

Esse resultado é confirmado no teste de interações, em que a única interação significativa foi a existente entre as fases de corte e baldeio de madeira (Quadro 5), onde, considerando-se todas as condições do estudo, a microporosidade na fase de corte revelou ter sido maior que na fase de baldeio, considerando-se ambas as condições de recobrimento do solo.

Com base nesse resultado, associado aos obtidos nos outros parâmetros físicos e mecânicos do solo estudados, infere-se a conclusão de que o corte mecanizado de madeira, na forma e condições em que foi realizado no presente experimento, produziu um efeito benéfico sobre tais características físicas e mecânicas do solo, ao passo em que o baldeio de madeira resultou em um resultado controverso.

Martins et al. (1998), ao estudar o comportamento de alguns atributos físicos do solo resultante da exploração de madeira em florestas nativas, referem-se a

aumentos na microporosidade do solo em áreas trafegadas por um *skidder* Caterpillar 518 e que as maiores alterações ocorreram entre 0 e 10 cm de profundidade, citando que o fato foi também observado por Cassel et al. (1978) e Boone et al. (1986). Acrescentam que os maiores valores de microporosidade (e também de densidade) poderiam ser explicados pela ação de pneumáticos de baixa pressão sobre o solo, cujos efeitos concentram-se na superfície, como igualmente constatado por outros autores, como Medina (1985), Hendrison (1989) e Chauvel et al. (1991).

Trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico com teores médios de argila de 582 g.kg⁻¹ e de areia de 184 g.kg⁻¹, Beutler et al. (2001) obtiveram maiores valores para microporosidade do solo (entre 34% e 42%) em relação aos obtidos no presente estudo, na faixa de profundidade entre 0 cm e 20 cm, para todas as formas de manejo do solo pesquisadas. Em confronto aos resultados do presente estudo, tal resultado supostamente possa ser atribuído ao maior conteúdo de argila do Latossolo Vermelho encontrado no estado de Minas Gerais.

6.1.5 Água disponível no solo

Não ocorreram diferenças estatísticas significativas para o parâmetro água disponível no solo dentre todos os tratamentos estudados, a 5% e a 10% de significância, cujas médias são apresentadas no Quadro 4.

Esses resultados são concordantes com as conclusões de Lima (1998), ao pesquisar o comportamento de água disponível em Latossolo Amarelo, textura argilosa, após a passagem sucessiva de um *feller-buncher* Blount Hidro AX-611EX, empregado no corte de madeira e de um *skidder* Caterpillar 525, utilizado no baldeio.

Já Sheptukhov et al. (1982), pesquisando em um solo Podzólico nátrico, com 334 g.kg⁻¹ de argila na camada entre 0-20 cm de profundidade, na União Soviética, verificaram diminuição na porcentagem de água disponível em áreas submetidas ao tráfego de tratores agrícolas pesados, que decresceu de forma inversamente proporcional à densidade do solo, em função de decréscimo do volume de solo considerado.

Esses resultados controversos são explicados por Keilen (1992), ao justificar que os níveis de compactação do solo dependem de cargas aplicadas durante as operações de tráfego florestal, bem como a classe de solo e seu conteúdo de água por ocasião

do trânsito de máquinas, resultando em deformações elásticas reversíveis ou consolidadas e irreversíveis, determinadas por compressão vertical e outros fatores.

Embora não tenham sido significativas as diferenças entre os tratamentos avaliados, o mesmo não ocorreu para algumas das interações testadas (Quadro 5). O parâmetro água disponível avaliado para o conjunto dos tratamentos mostrou ter sido maior que a testemunha, que se refere ao trânsito anterior ao experimento. Isso significa que, de um modo geral, as operações subsequentes de corte e baldeio de madeira determinaram acréscimo no total em água disponível no solo.

Esse resultado está mais relacionado à água disponível no solo avaliada na fase de corte de madeira, devido ao aumento da microporosidade, observado com ou sem o revestimento de galhada. Tendo a fase de corte apresentado maiores valores absolutos água disponível e, por outro lado, o melhoramento de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, resultou em ter sido classificada como *compactação moderada*, de acordo com Camargo et al. (2000).

Sobre esse aspecto, Johnson et al. (1990) avaliaram a compactação em duas classes de solo exercida pelo tráfego de máquinas agrícolas, concluindo que a produção de soja de um modo geral respondeu favoravelmente à compactação superficial (definida pelos autores como a ocorrida até a 30 cm de profundidade), produzidas por cargas por eixo de até 44,2 kN em um ano relativamente seco, com teor de água de 160 g.kg^{-1} e negativamente em um ano úmido, apresentando conteúdo de água de 230 g.kg^{-1} . E também que cargas por eixo de 88,3 kN foram freqüentemente benéficas.

A análise de variância entre os valores obtidos, efetuada no nível de 5% de significância, demonstrou não terem sido significativas as interações entre presença e ausência de cobertura de galhada tanto na fase de corte como no baldeio de madeira, nas condições do experimento.

Confirmando as assertivas formuladas, a interação significativa entre as fases de corte e baldeio indica que a magnitude de cargas transmitidas ao solo por ocasião do corte refletiu-se em acréscimo em água disponível em relação à fase de baldeio, independentemente se na presença ou ausência de cobertura de galhada.

6.1.6 Taxa de infiltração de água no solo

Para o atributo taxa de infiltração de água no solo (Quadro 4) não ocorreram diferenças entre os tratamentos avaliados no nível de 5% de significância. Assim, todas as formas pesquisadas de transferência de cargas ao solo através de rodados não influíram no comportamento desse parâmetro, neste nível de significância.

No nível de 10% de significância, entretanto, a taxa de infiltração de água determinada no tratamento testemunha (tráfego anterior) mostrou-se maior que na fase de corte sem galhada, embora não tenha diferido dos demais tratamentos. Esse resultado indica uma tendência para redução da taxa de infiltração de água no solo na fase de corte com *harvester*, quando desprovido de cobertura de proteção, nas condições do experimento.

Todos os valores médios para esse parâmetro obtidos no presente estudo encontram-se inseridos na classificação *drenagem boa*, segundo Costa Nunes (1956), com base em Casagrande e Fadum, para a qual os valores do coeficiente de permeabilidade K variam na amplitude compreendida entre 10^{-4} cm.s⁻¹ a 10^2 cm.s⁻¹.

As médias de taxa de infiltração de água no solo obtidas nos tratamentos trânsito anterior e *forwarder* com galhada encontram-se enquadrados na classificação *condutividade moderada* de O'Neal (1952) apud Klute (1965), segundo padrões estabelecidos na Universidade de Illinois, ao passo em que os demais (*harvester* com e sem galhada e *forwarder* sem galhada), como de *condutividade moderadamente lenta*, embora todos os tratamentos não tenham diferido entre si no nível de 5% de significância.

A única interação significativa, dentre todas as possíveis de serem testadas, para ambos os níveis de significância pesquisados, foi a do tratamento testemunha em relação aos demais. Esse resultado indica que a taxa de infiltração de água no solo avaliada no tratamento trânsito anterior foi maior que a média das mesmas taxas medidas nas demais condições experimentais pesquisadas. Isso significa que o conjunto de todas formas de imposições de cargas ao solo efetuadas por máquinas de corte e baldeio de madeira, resultaram em decréscimo na taxa de infiltração de água no solo, considerando-se as condições de solo revestido por cobertura de galhada ou não. De acordo com Dalla Rosa (1981), esse resultado revela indícios de um processo de degradação física do solo.

Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (1981), ao estudarem o comportamento de parâmetros físicos e mecânicos de um Argissolo Vermelho, de

Ibirubá, em função de desmatamento efetuado por trator de esteiras, concluindo que a taxa de infiltração de água foi reduzida em função do aumento na densidade do solo, da resistência à penetração e da redução da macroporosidade e aeração.

Também Onofiok (1988), determinando a variabilidade nas propriedades físicas de um Nitossolo na Nigéria, com 712 g.kg^{-1} de areia e 148 g.kg^{-1} de argila na camada entre 0-10 cm de profundidade, sob sistemas de cultivo, constatou que a condutividade hidráulica saturada, a porosidade total e a macroporosidade foram menores ao longo da trilha de pneus de tratores agrícolas do que nas fileiras da cultura e nas entrelinhas.

Lindstrom et al. (1981), avaliando tipos de preparo do solo em Minnesota, Estados Unidos, obtiveram resultados idênticos, concluindo que áreas submetidas ao tráfego de tratores tiveram capacidades de infiltração menores do que as sem tráfego.

A influência da camada de resíduos sobre o solo na taxa de infiltração foi avaliada por Roth & Meyer (1983). Encontraram taxa de infiltração básica de $5,9 \text{ cm.h}^{-1}$ trabalhando com chuva simulada sobre Latossolo Vermelho distroférico e, após retirar a cobertura do solo, a taxa de infiltração reduziu-se para $1,7 \text{ cm.h}^{-1}$, valor esse inserido na faixa de variação observada no presente estudo. Sobre esse tema, Roth et al. (1988) ressaltaram que o principal fator que influencia a taxa de infiltração é a formação de uma camada selante na superfície, que depende do grau de cobertura do solo por mulch, independentemente do manejo do solo adotado. Contudo, quanto a esse particular, os resultados do presente estudo não concordam com o enunciado por Roth et al. (1988), uma vez que, pelos resultados obtidos a 5% ou 10% de significância, não há qualquer indicação que possa ter sido formada uma capa selante sobre a superfície do solo em quaisquer dos tratamentos avaliados, embora os valores absolutos de taxa de infiltração de água no solo nas fases de corte e baldeio sem cobertura de galhada tenham sido menores do que com cobertura, considerando-se inclusive que não diferiram entre si a 5% e 10% de significância.

6.1.7 Temperatura do solo

6.1.7.1 Temperatura do solo em agosto de 2001

Os valores de temperatura do solo, segundo a avaliação da oscilação térmica diária efetuada no inverno de 2001 entre algumas condições da floresta pesquisada, constam graficamente na Figura 16.

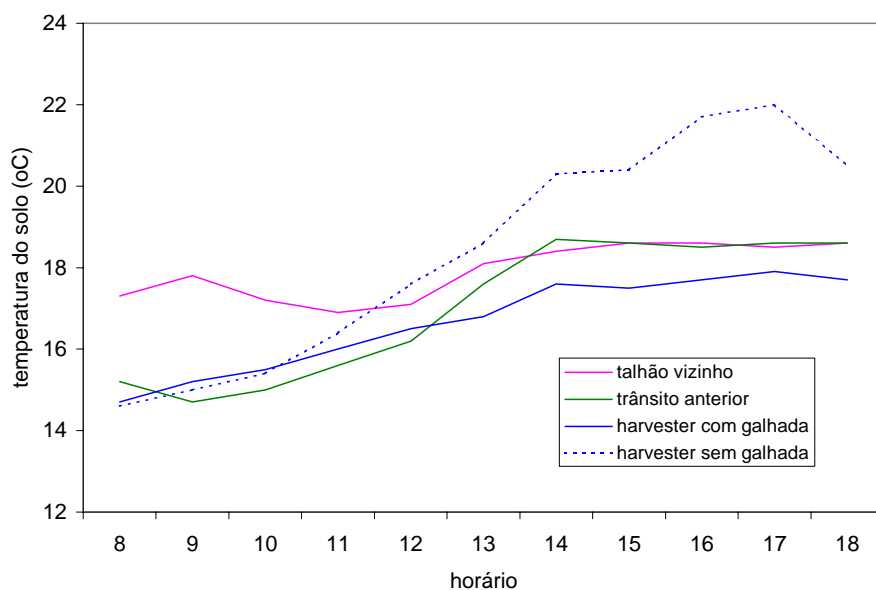


Figura 16. Temperatura do solo em 17 de agosto de 2001.

Os resultados demonstram que não ocorreram diferenças significativas no nível de 5% de significância entre os valores de temperatura do solo para os tratamentos avaliados.

A 10% de significância, contudo, a temperatura do solo na fase de corte sem galhada mostrou-se superior ao corte com galhada, na camada entre 5 cm e 10 cm de profundidade, indicando que a transferência de cargas ao solo sem o revestimento de proteção resultou em maior aproximação entre partículas do solo, ao ser submetido a pressões do rodado de esteiras da máquina de corte, proporcionando assim condições para melhor condução de calor, em comparação à passagem da mesma máquina sobre o revestimento de galhada, devido ao fato da energia calorífica ser conduzida de partícula a partícula, no interior da massa de solo.

Assim, a temperatura do solo na fase de corte de madeira mostrou-se maior nas condições em que as partículas do solo encontravam-se mais próximas entre si, a

10% de significância, o que correspondeu ao percurso do *harvester* sem cobertura de proteção representada pela galhada, em relação à mesma passagem com cobertura de galhada, embora essa diferença não tenha resultado em aumento na densidade do solo.

Esse resultado é confirmado pelo teste de interações (Quadro 6), em que o único contraste significativo a 5% de significância entre médias de temperatura do solo foi o existente entre corte efetuado com e sem cobertura de galhada, o que indica que a ausência de galhada foi decisiva na reação do comportamento do solo quanto à temperatura avaliada na camada entre 5-10 cm de profundidade, reafirmando que a aplicação de cargas diretamente sobre a massa de solo resulta em maior aproximação entre partículas e, conseqüentemente, em maior temperatura em subsuperfície, embora não tenha ocorrido aumento na densidade do solo.

Assim, a temperatura do solo na fase de corte de madeira foi maior nas áreas sem cobertura de galhada, em função de maior aproximação entre partículas de solo e das formas de propagação da energia calorífica no interior da massa de solo.

6.1.7.2 Temperatura do solo em outubro de 2001

Na avaliação efetuada na primavera de 2001, cujos resultados são mostrados graficamente à Figura 17, a fase de baldeio sem a cobertura de galhada apresentou temperatura do solo maior que nas demais condições pesquisadas.

Tais resultados, evidenciados a 5% e a 10% de significância, confirmam conclusões anteriores, segundo as quais, em condições de maior imposição de cargas ao solo, no caso representado pela operação do *forwarder* em área destituída de amortecimento de pressões conferido pela cobertura de proteção, em que a aplicação de cargas foi efetuada de forma direta sobre a massa de solo, ocorreu maior aproximação entre partículas do que quando esse mesmo esforço foi exercido sobre manto de galhada, resultando conseqüentemente que a temperatura do solo tenha sido maior. Tal conclusão é confirmada pelos resultados obtidos no ensaio de densidade do solo (Quadro 4), em que o tratamento *forwarder* sem galhada apresentou valores maiores para esse parâmetro que todas as demais condições de aplicação de cargas ao solo ensaiadas.

Assim, a temperatura do solo foi maior nas áreas sem cobertura de galhada também na fase de extração de madeira, em função de maior aproximação entre partículas e das formas de propagação da energia calorífica na massa de solo.

Quadro 6. Valores médios de temperatura do solo, em °C, por combinação de tratamentos, com indicação de diferenças significativas e não significativas (*).

Temperatura do solo em 17 de agosto de 2001	
Trânsito anterior	17,03 ± 0,51 a
Talhão vizinho	17,92 ± 0,21 a
Corte	17,53 ± 0,48 a
Corte com galhada	16,65 ± 0,35 b
Corte sem galhada	18,41 ± 0,83 a
Média geral	17,50
C.V. (%)	9,96
Temperatura do solo em 25 de outubro de 2001	
Trânsito anterior	20,31 ± 0,38 b
Outros	22,14 ± 0,53 a
Corte	21,87 ± 0,61 a
Baldeio	22,28 ± 0,74 a
Baldeio com galhada	19,76 ± 0,37 b
Baldeio sem galhada	24,79 ± 1,01 a
Média geral	21,68
C.V. (%)	10,35
Temperatura do solo em 29 de janeiro de 2002	
Trânsito anterior	25,91 ± 0,57 a
Outros	23,43 ± 0,14 b
Corte	23,29 ± 0,12 a
Baldeio	23,50 ± 0,20 a
Baldeio com galhada	23,27 ± 0,22 a
Baldeio sem galhada	23,74 ± 0,33 a
Média geral	24,05
C.V. (%)	5,11

(*) Valores seguidos de mesmas letras, dentro de compartimentos de colunas, não diferem entre si no nível de 5% significância, pelo teste F.

Por outro lado, a cobertura favorece a manutenção do teor de água do solo, dando condições para que o solo úmido tenha maior capacidade térmica, de acordo com Pritchett & Fisher (1987), resultando que a oscilação térmica seja menor em solos sob cobertura, conforme Amado et al. (1990). Por esta razão, Costa & Godoy (1962), pesquisando variações na oscilação térmica ao longo do perfil de um Nitossolo Vermelho, verificaram que

as amplitudes de temperatura foram menores para um solo com cobertura morta de gramíneas do que para áreas sem vegetação e que esses efeitos estenderam-se até 20 cm de profundidade.

Na avaliação citada, o teste de interações (Quadro 6) demonstrou que o tratamento testemunha apresentou temperatura do solo mais baixa que os demais, em função de ausência de imposição recente de pressões ao solo. Por outro lado, o aspecto do tratamento baldeio sem galhada ter induzido maior temperatura do solo do que com galhada, considerando-se a transferência de mesmas cargas ao solo é concordante com Balastreire (1990), ao postular que a compactação causa aumento na densidade do solo, com elevação da condutividade térmica e um provável crescimento na difusibilidade térmica do solo.

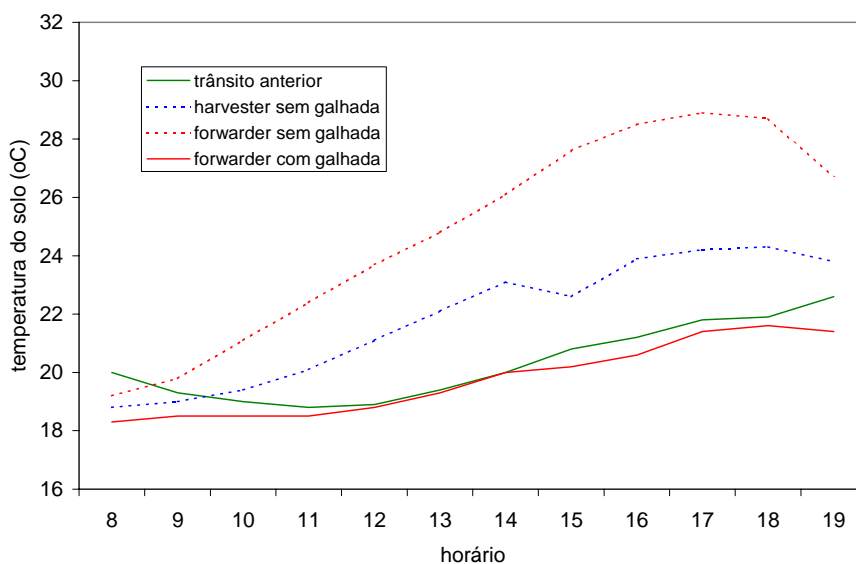


Figura 17. Temperatura do solo em 25 de outubro de 2001.

6.1.7.3 Temperatura do solo em janeiro de 2002

Os valores de temperatura do solo, avaliados no verão de 2002 para algumas das condições estudadas, são apresentados graficamente na Figura 18.

O tratamento trânsito anterior (testemunha) apresentou maiores valores de temperatura do solo que as demais condições experimentais avaliadas, supostamente em razão do ensaio ter sido realizado após longo período chuvas e, segundo Pritchett & Fisher (1987), nessa circunstância possa ter sido mantido maior teor de água em relação aos

tratamentos que sofreram imposição recente de cargas, considerando-se ser a água um bom condutor de calor.

Os valores médios de temperatura do solo nas demais condições experimentais avaliadas não diferiram significativamente entre si. Tal resultado foi observado a 5% e 10% de significância.

O fato da temperatura do solo no tratamento baldeio sem galhada não ter diferido nessa análise do baldeio com galhada é também atribuído aos teores mais elevados de água do solo, nesse caso admitindo-se que a condutividade térmica determinada pelo maior conteúdo de água atuou em ambas as condições de recobrimento do solo, considerando-se inclusive que a porosidade total e a microporosidade, avaliadas nas duas condições, não apresentaram diferenças entre si.

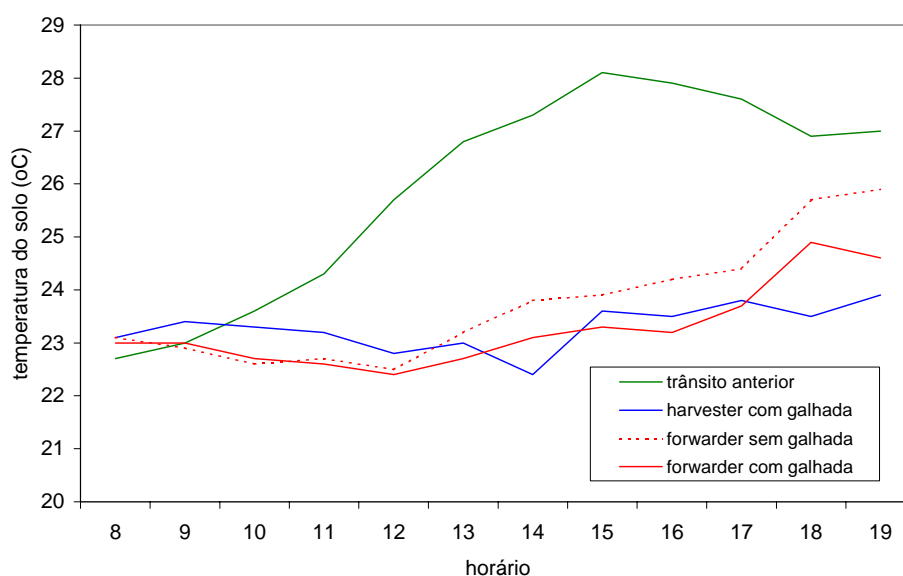


Figura 18. Temperatura do solo em 29 de janeiro de 2002.

Sobre esse tema, Chang (1968) aponta que a condutividade térmica do solo é determinada principalmente por sua porosidade, teor de água e conteúdo de matéria orgânica. Acrescenta que, em campos naturais, solos de textura fina têm maior conteúdo de água, o que determina grandes aumentos na condutividade térmica do solo. Considerando-se que o tratamento testemunha não diferiu da maioria dos tratamentos que foram submetidos à aplicação recente de cargas no que se refere aos parâmetros de porosidade do solo e os seus baixos teores de matéria orgânica, depreende-se que possa ter ocorrido maior condutividade

térmica nesse tratamento e, conseqüentemente, ter apresentado maior temperatura do solo, inclusive considerando-se que baixos teores de matéria orgânica no solo inibem menos os processos de transferência de calor do que em solos com altos teores.

Análise dos contrastes possíveis (Quadro 6) demonstra que ocorreu interação significativa entre a testemunha (trânsito anterior) em relação aos demais tratamentos que sofreram imposição de cargas em período recente, em função de maior conteúdo de água no solo. Nessa avaliação não foi significativa a interação entre corte e baldeio de madeira, bem como entre o baldeio efetuado com e sem a cobertura de galhada, resultado atribuído aos maiores conteúdos de água do solo.

6.1.8 Estabilidade de agregados a seco

O Quadro 4 apresenta os valores médios do índice DMG (diâmetro médio geométrico) de agregados do solo para as três condições de trânsito florestal estudadas: tráfego anterior ao experimento, corte e baldeio de madeira.

Seguindo a tendência geral de comportamento dos parâmetros físicos do solo avaliados no estudo, a fase de corte de madeira resultou em ganho quanto à estabilidade de agregados a seco, consoante o emprego do índice utilizado nessa determinação, em função da distribuição de tamanhos de agregados, ao passo que, por seu turno, a fase subsequente de baldeio de madeira resultou em decréscimo da estabilidade de agregados obtida na fase de corte, a níveis inferiores aos anteriormente apresentados no tratamento testemunha (trânsito anterior). Tal resultado foi evidenciado a 5% e a 10% de significância.

Esses resultados são atribuídos à ocorrência de uma *compactação moderada* do solo determinada pelo rodado de esteiras que equipa a máquina de corte (*harvester*) que, sob alguns aspectos, mostrou-se benéfica ao comportamento do solo no que respeita a algumas de suas características físicas e mecânicas. Por outro lado, as formas de imposição de cargas ao solo produzidas pelo rodado de pneus, nas condições em que foram efetuadas, determinaram alterações em algumas dessas mesmas propriedades e produziram uma *compactação* do solo que pode ser adjetivada como *severa*.

Com base nessas flutuações significativas no índice fundamentado na distribuição de tamanhos médios de diâmetro de agregados, infere-se que a fase de corte de madeira determinou um melhoramento da estrutura do Latossolo Vermelho Amarelo

pesquisado, nas condições do experimento, melhoramento esse que foi neutralizado na operação subsequente de baldeio, que resultou em valores ainda menores nesse índice do que o solo apresentava anteriormente.

Tais resultados são concordantes com conclusão de Gupta & Allmaras (1987), ao mencionarem que o incremento da compactação do solo resulta em decréscimo da resistência de seus agregados.

Por outro lado, os resultados obtidos no presente estudo encontram-se em desacordo ao enunciado por Rahimi et al. (2000), ao afirmarem que solos com maiores teores de matéria orgânica apresentam maior resistência à ruptura de agregados, embora de um modo geral esse axioma seja verdadeiro. Considerando-se ter ocorrido o oposto à esta afirmativa no presente estudo, uma vez que na fase baldeio de madeira foi evidenciado maior teor de matéria orgânica (Quadro 10), tal fato se deve a que esse fator atuou na estabilidade da estrutura do solo com menor relevância do que a imposição de pressões induzidas pelo rodado do *forwarder*.

Comparativamente aos resultados obtidos no presente estudo, Assis (2002) encontrou uma amplitude de variação mais larga para o índice DMG, entre os valores médios de 0,96 e 4,34, pesquisando em Nitossolo Vermelho com 717 g.kg⁻¹ de argila e 148 g.kg⁻¹ de areia na camada entre 10-15cm de profundidade, por ter trabalhado com o mesmo solo submetido a diferentes estágios de cultivo conservacionista e mata natural, em confronto ao sistema de cultivo convencional, empregando grade aradora e grade niveladora, em que este último tratamento apresentou os valores mais baixos para esse parâmetro.

Também Miranda (1986), pesquisando o comportamento do índice DMG em duas classes de solos, encontrou faixas de variação desse parâmetro maiores que as obtidas no presente estudo. Para um solo Podzólico Vermelho Amarelo, o índice variou entre os valores médios de 7,60 e 13,42, para a camada de profundidade entre 5-10 cm, em função de doze diferentes combinações de emprego de máquinas de preparo reduzido do solo. Para um Latossolo Vermelho Escuro, essa amplitude esteve compreendida entre valores de 6,90 e 12,11, para as mesmas condições de trabalho. Tais resultados, em confronto aos obtidos no presente estudo, supostamente possam ser devidos a que todos os tipos de preparo reduzido pesquisados possuem características de manejo conservacionista do solo, o que não ocorreu no presente estudo.

Pesquisa experimental realizada na Turquia por Yavuzcan (2000), em Cambissolo imperfeitamente drenado, textura média, com 210 g.kg⁻¹ de argila e areia e 580 g.kg⁻¹ de silte, indicou que o tráfego induzido de tratores e o sistema de preparo do solo também promoveram diferenças no tamanho médio de agregados, especialmente quando o solo foi trabalhado com arado de aivecas.

6.2 Parâmetros mecânicos do solo

6.2.1 Resistência mecânica do solo à penetração

6.2.1.1 Tráfego Anterior

A resistência mecânica do solo à penetração avaliada para as condições de tráfego anterior ao experimento, compreendendo as linhas do rebaixador de tocos, o rastro antigo e a área do rebaixador de tocos, é apresentada respectivamente nas Figuras 19, 20 e 21. O conteúdo de água no solo apresentou os teores médios respectivos de 140 g.kg⁻¹, 142 g.kg⁻¹ e 145 g.kg⁻¹, que não diferiram entre si a 5% de significância.

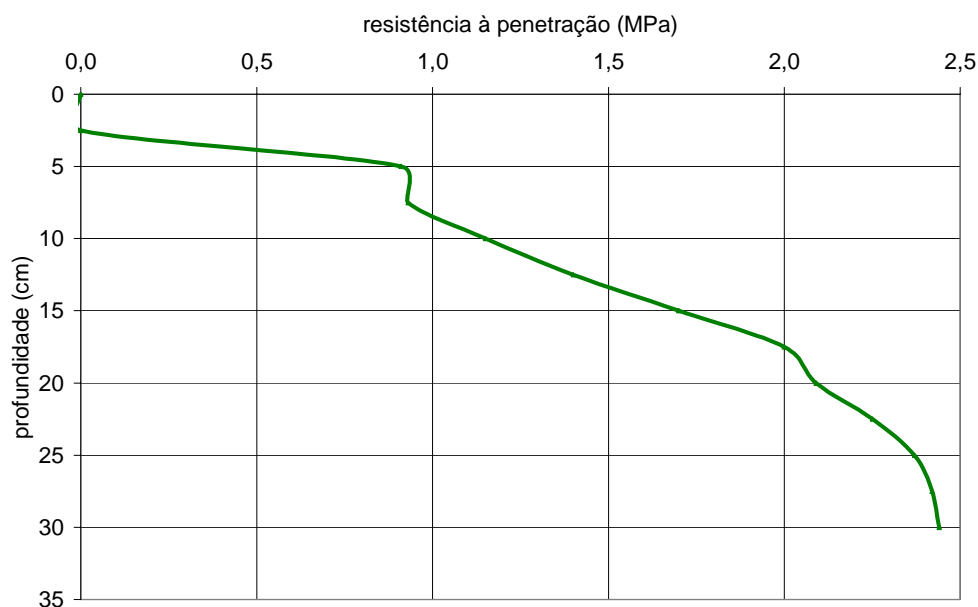


Figura 19. Resistência do solo à penetração no tratamento trânsito anterior (linhas do rebaixador de tocos).

A resistência à penetração avaliada para as condições de tráfego anterior ao experimento, compreendendo os subtratamentos linhas do rebaixador de tocos, rastro antigo e área do rebaixador de tocos não apresentaram diferenças entre si, a 5% e a 10% de significância. Tal resultado indica que o tráfego de máquinas na área experimental nas rotações anteriores e o atribuído à manutenção da floresta e preparação para nova colheita, ocorrido no período anterior ao experimento, não influenciou de forma significativa na resistência do solo à penetração.

Esse resultado pode estar ligado à imposição de pressões ao solo de menores magnitudes induzidas por tratores agrícolas médios, com tração no rodado traseiro, utilizados em operações de manutenção da floresta, incluindo fertilização mineral e rebaixamento de tocos, na preparação da nova rotação, associado a alguma forma de regeneração do adensamento do solo antes ocorrido.

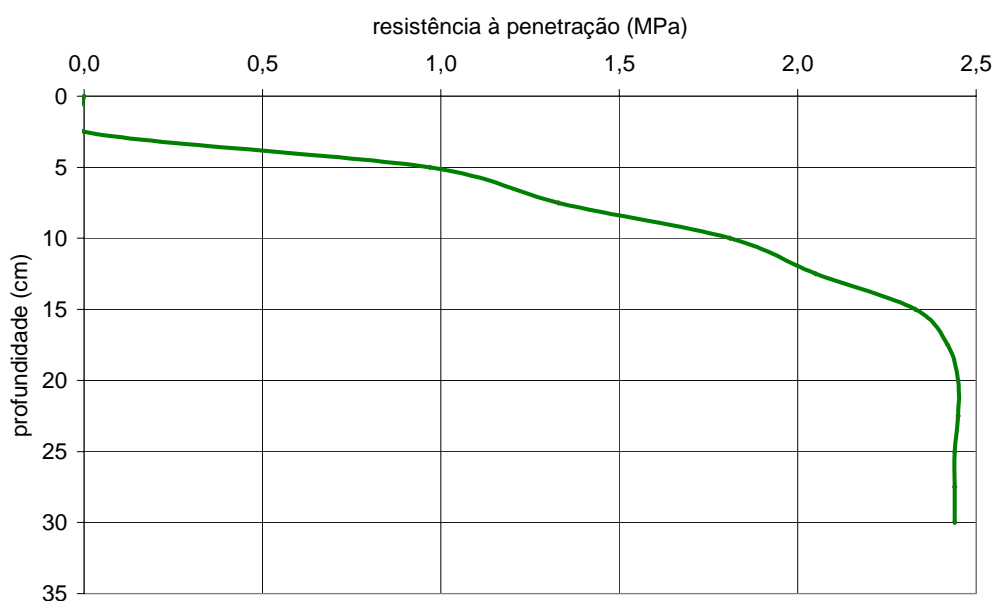


Figura 20. Resistência do solo à penetração no tratamento tráfego anterior (rastro antigo).

Contudo, as profundidades avaliadas, a partir das quais possam ter ocorrido restrições ao desenvolvimento de raízes, por ter sido atingido o limite crítico de 2 MPa de resistência mecânica do solo à penetração, foram entre 17,5 cm e 30,0 cm para as linhas do rebaixador de tocos, entre 12,5 cm e 30,0 cm para as áreas de um rastro antigo e para a faixa entre 7,5 cm e 22,5 cm para a área do rebaixador de tocos, conforme Camargo et al.

(2000), Silva et al. (2000b), Arshad et al. (1996), Pereira (1996), Nesmith (1987) e Taylor et al. (1966).

Baseando-se nos autores citados, pode-se considerar que o tratamento trânsito anterior (testemunha) apresentou formas de adensamento do solo, que variaram segundo diferentes estratos de profundidade, demonstrada no conjunto dos três sub-tratamentos avaliados, resultante de trânsito florestal ocorrido em rotações anteriores e/ou em trabalhos mecanizados de manutenção da floresta. Essa assertiva é confirmada pelos valores de densidade do solo na fase trânsito anterior que, segundo Lira Filho (1994), o nível de compactação é considerado alto quando a densidade do solo supera o valor de $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$, levando-se em conta que no presente estudo esse tratamento atingiu a média de $1,41 \text{ g.cm}^{-3}$, com desvio padrão da média igual a $0,03 \text{ g.cm}^{-3}$.

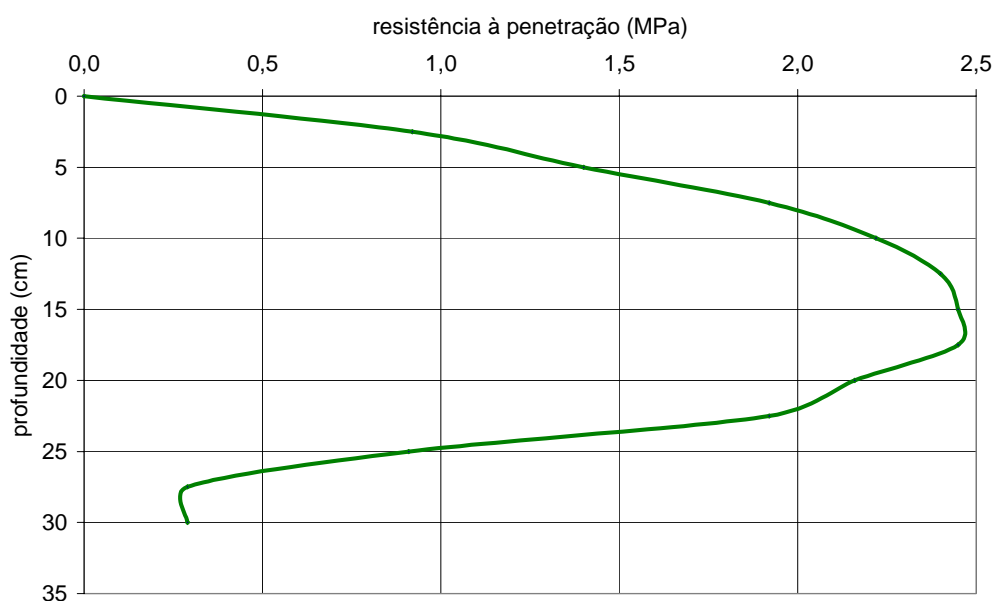


Figura 21. Resistência do solo à penetração no tratamento trânsito anterior (área do rebaixador de tocos).

Em Latossolo Vermelho, textura média, Fenner (1999) encontrou diferenças entre valores de resistência mecânica do solo à penetração a 5 cm de profundidade, entre áreas sem trânsito e um ou mais percursos de um trator agrícola com tração dianteira auxiliar, simulando uma carga de 74,56 N, com pressão de inflagem de pneus de 110 kPa. Além de 10 cm de profundidade, a diferença entre valores de resistência à penetração foi evidenciada a partir de três percursos do trator agrícola.

Comparativamente, os resultados obtidos por Fenner (1999) não são concordantes com os do presente estudo, por este apresentar, para essas condições, menor imposição de cargas ao solo, além de se restringir a menores percursos de máquinas.

6.2.1.2 Corte de madeira (*harvester*)

As Figuras 22 e 23 apresentam graficamente os valores médios de resistência mecânica do solo à penetração imediatamente após o corte de madeira, efetuado pela colhedora (*harvester*).

Os teores médios de água no solo foram de 300 g.kg^{-1} para o corte efetuado com cobertura de galhada e de 312 g.kg^{-1} sem esta cobertura.

Análises de variância a 5% e 10% de significância indicam que não ocorreram diferenças para o parâmetro resistência mecânica do solo à penetração entre as condições de corte com e sem revestimento de galhada, ambos efetuados com emprego de *harvester* com rodado de esteiras.

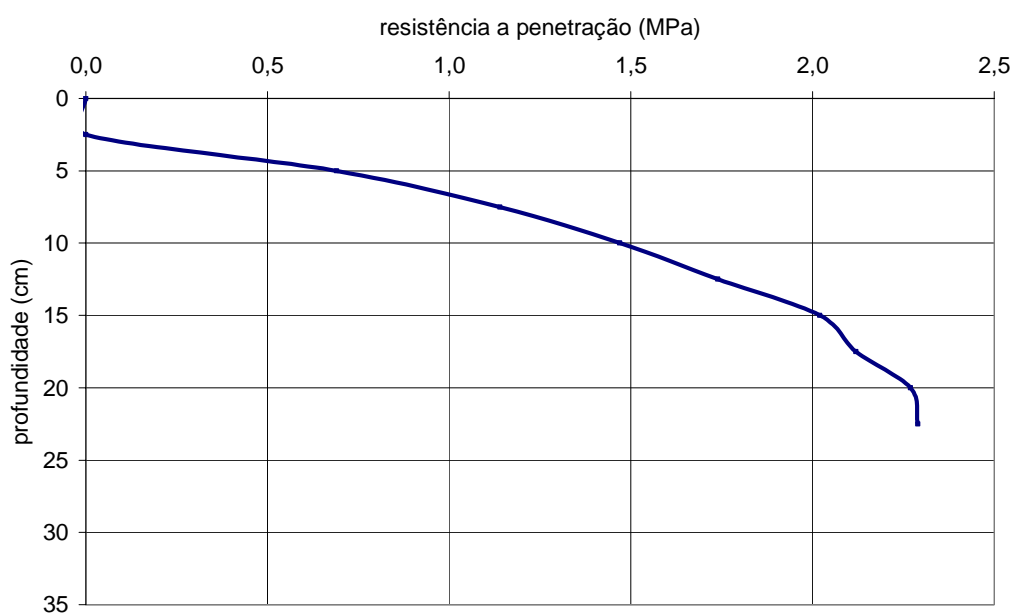


Figura 22. Resistência do solo à penetração no tratamento *harvester* com galhada.

Na fase de corte de madeira, a camada de solo definida por Camargo et al. (2000) como de *compactação moderada* esteve compreendida entre os limites de 7,0 cm e 15,0 cm quando efetuada sobre galhada, a partir do qual ocorreu *compactação severa*. No caso

de ausência desse recobrimento protetor, a camada de *compactação moderada* alcançou a faixa entre 5,0 cm e 12,5 cm e a *compactação severa*, a partir desse limite, de acordo com os autores citados, embora não tenham sido observadas diferenças para esse parâmetro nos mesmos níveis de profundidade.

Silva et al. (2000a) também não encontraram diferenças entre áreas no interior do povoamento (floresta sem trânsito), em ramais de corte e baldeio e em áreas sob influência de obras de construção do gasoduto Bolívia-Brasil, ao avaliarem a resistência mecânica à penetração em um Alissolo Hipocrômico distrófico sob floresta de *Pinus elliotti* Eng. var. *elliotti*, com 790 g.kg^{-1} de areia e 110 g.kg^{-1} de argila, em função de sua alta compacidade, conferida pela textura francoarenosa, resultado esse concordante com o enunciado por Balastreire (1990) e Vargas (1981).

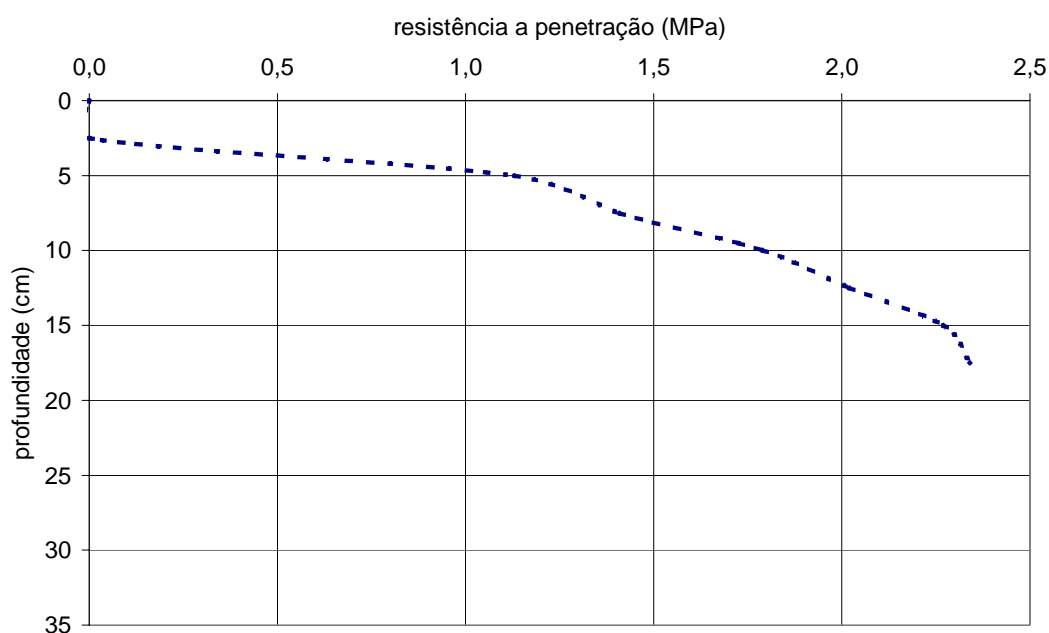


Figura 23. Resistência do solo à penetração no tratamento *harvester* sem galhada.

O mesmo parâmetro avaliado em áreas trafegadas e não trafegadas por uma colhedora de grãos autopropelida, com uma pressão de contato pneu-solo de 88 kPa, em dois sistemas de manejo do solo e duas condições de teor de água em um Latossolo Vermelho distrófico, não produziu diferenças entre tratamentos nas profundidades entre 6 cm e 10 cm, segundo Silva et al. (2000b). Em relação ao presente estudo, cujos resultados foram idênticos

aos apresentados pela colhedora de grãos, estes podem ser atribuídos a níveis de pressões de contato rodado-solo considerados de magnitudes admissíveis para as respectivas condições de trabalho.

6.2.1.3 Baldeio de madeira (*forwarder*)

Os valores médios de resistência mecânica do solo à penetração após o baldeio de toras de seis metros de comprimento, efetuado por trator transportador autocarregável (*forwarder*) sobre rodado de pneus, em solo com revestimento de galhada e sem, são apresentados respectivamente nas Figuras 24 e 25.

A Figura 24 retrata o comportamento desse parâmetro sob a condição do baldeio de madeira efetuado sobre galhada, em que o teor médio de água no solo era de 204 g.kg^{-1} , ao passo em que a Figura 25 reflete o mesmo baldeio ocorrido sem o concurso da cobertura de galhada, onde o conteúdo médio de água no solo foi 206 g.kg^{-1} . Não ocorreram diferenças quanto à resistência mecânica do solo à penetração na fase de baldeio de madeira, efetuado com e sem o recobrimento do solo pela proteção de galhada, a 5% e a 10% de significância.

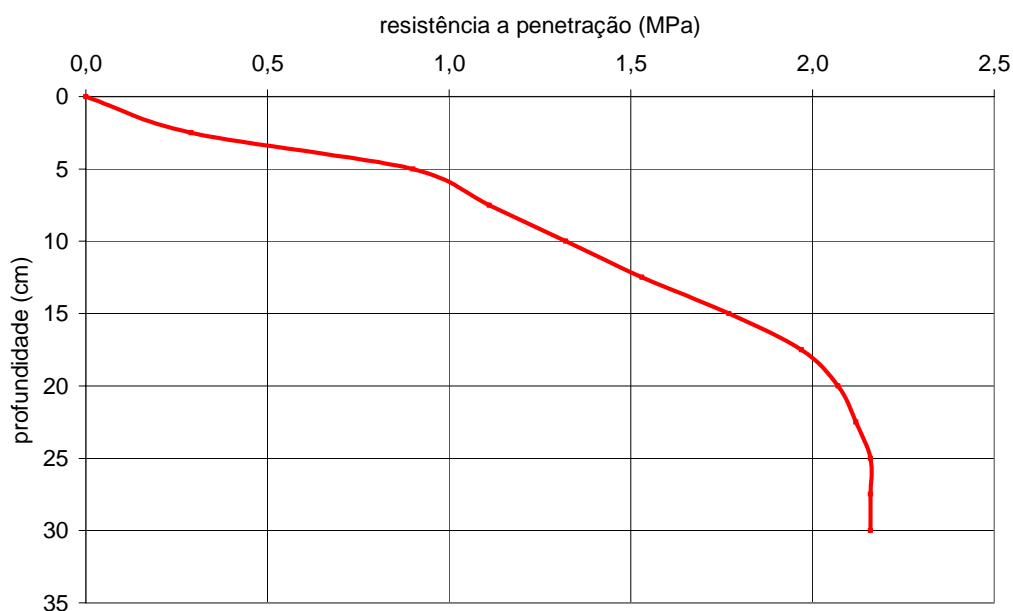


Figura 24. Resistência do solo à penetração no tratamento *forwarder* com galhada.

Esse resultado é concordante com os obtidos por McDonald & Seixas (1997), em pesquisa realizada nos Estados Unidos, em condições de solo seco e úmido, em solo desnudo, sob duas densidades de resíduos de *Pinus taeda* e *Pinus palustris*, submetidos a um e cinco percursos de um *forwarder* Franklin com cargas de 17 t (166,77 kN) e pneus inflados a 210 kPa. Embora a densidade do solo tenha evidenciado diferenças em todos os tratamentos até a 5 cm de profundidade, o parâmetro resistência do solo à penetração não mostrou-se adequado para identificar tais ocorrências, como também observado no presente estudo, supostamente em função de limitação do aparelho avaliador e das condições intrínsecas a essa avaliação.

Com referência a esses resultados, Mantovani (1987) postula que esse parâmetro é freqüentemente utilizado como uma indicação comparativa de compactação, por causa da facilidade e rapidez na qual numerosas determinações podem ser efetuadas, ressaltando, contudo, tratar-se de um indicador secundário de compactação.

Seixas et al. (1998) também apontam restrições ao uso de penetrômetro, em função da presença de raízes e minerais no perfil do solo e os efeitos dos teores de água durante as leituras do aparelho.

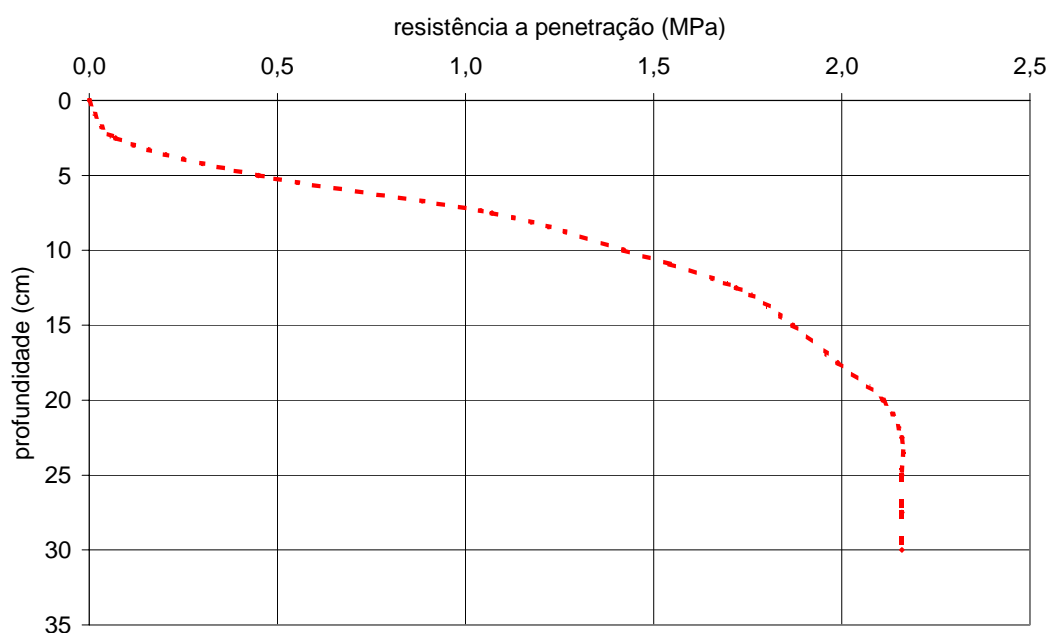


Figura 25. Resistência do solo à penetração no tratamento *forwarder* sem galhada.

Também não apresentaram diferenças significativas quanto à resistência mecânica à penetração, em solo francoarenoso com 900 g.kg^{-1} de areia e 50 g.kg^{-1} de argila e silte, sob três graus de cobertura de galhada em operação de transporte primário de madeira de um povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden, no sistema de corte raso aos sete anos de idade, efetuado por trator agrícola equipado com grua e tracionando carreta com carga total de 84,37 kN, segundo Seixas et al. (1998). Os tratamentos eram constituídos de solo desnudo e coberturas de 5 kg.m^{-2} de ramos e folhas e de 16 kg.m^{-2} de cascas, ramos e folhas.

Jakobsen & Greacen (1985) avaliaram a compactação do solo determinada por percursos repetidos de um *forwarder* Volvo TC-860, com massa de 26 t (255,06 kN), no baldeio de madeira de *Pinus* sobre solos arenoso e de textura média, ambos classificados como areias podzolizadas de dunas, no sul da Austrália, em condições de solo úmido. Os autores concluem que a compressão do solo cresceu linearmente com o logaritmo do número de percursos da máquina. A resistência do solo à penetração aumentou em duas a três vezes nas áreas sem trânsito e decresceu nas áreas em que ocorreram operações de desbastes, em que a resistência à penetração antes excedia a 5 MPa. Alterações em propriedades físicas do solo ocorreram a uma profundidade de até 70 cm. As conclusões formuladas nessa pesquisa discordam das do presente estudo, considerando-se que as condições ambientais divergiram no que se refere à textura dos solos, teores de água e repetição de cargas, embora a máquina de extração de madeira e a pressão unitária exercida sobre o solo tenham sido análogas.

Por outro lado, em ambas as condições de recobrimento do solo, no estrato de profundidade entre 17,5 cm e 30,0 cm ocorreu o nível de compactação que excede o limite crítico para o desenvolvimento de raízes, denominado de *compactação severa*, de acordo com Camargo et al. (2000).

Todos os resultados obtidos para o parâmetro resistência mecânica do solo à penetração são concordantes com McKyes (1985), ao anunciar que, para solos argilosos com densidades entre $0,84 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,89 \text{ g.cm}^{-3}$, a resistência do solo à penetração oscila entre os limites de 0 MPa a 8,25 MPa.

6.2.2 Resistência mecânica do solo ao cisalhamento

Valores representativos de coesão do solo e ângulo de atrito interno para as condições experimentais avaliadas são mostrados nas repetições constantes das Figuras 26, 27 e 28, resultados esses apresentados em sua totalidade no Anexo (Quadros 7, 8 e 9). Os teores gravimétricos médios de água do solo foram de 173 g.kg^{-1} para a etapa do trânsito anterior, 169 g.kg^{-1} para a fase de corte e 175 g.kg^{-1} para a de baldeio. Os valores médios para coesão do solo foram de $26,29 \text{ kPa}$ para o tratamento trânsito anterior, de $36,24 \text{ kPa}$ para a fase *harvester* e de $72,63 \text{ kPa}$ para a fase *forwarder*.

Os resultados obtidos quanto à coesão do solo, consoante análise de variância a 5% de significância, revelam que na fase de baldeio de madeira o solo apresentou maior coesão que na fase de corte e, esta, por sua vez, não diferiu estatisticamente das áreas de trânsito anterior, resultado esse verificado também a 10% de significância, indicando uma tendência de equilíbrio quanto a esse parâmetro entre as fases testemunha (trânsito anterior) e corte, em comparação à alteração nesse parâmetro mecânico do solo promovida durante o baldeio de madeira.

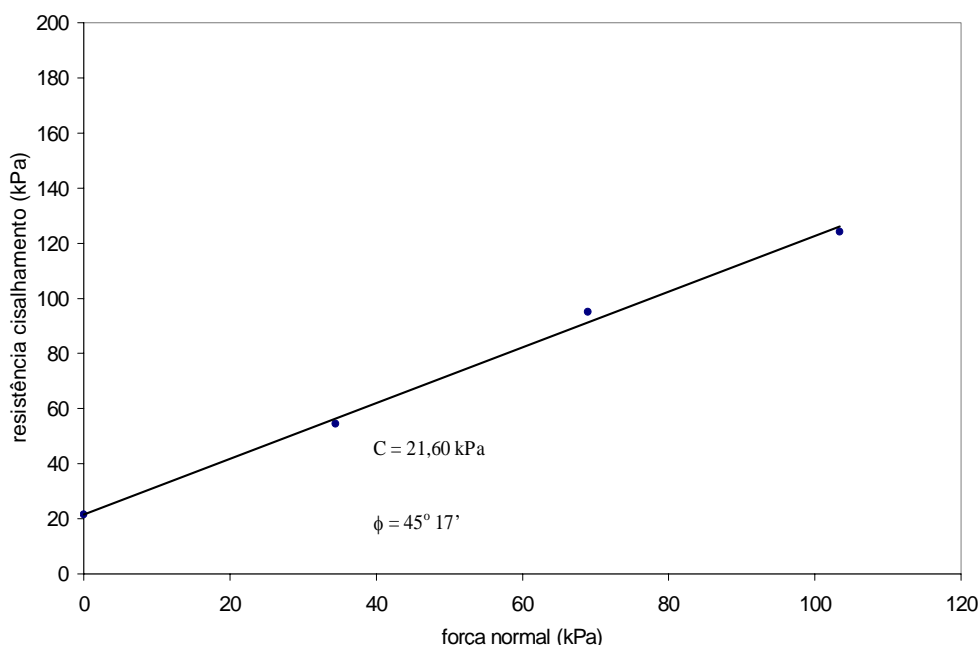


Figura 26. Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento no tratamento trânsito anterior.

Os resultados obtidos quanto à coesão do solo, consoante análise de variância a 5% de significância, revelam que na fase de baldeio de madeira o solo apresentou maior coesão que na fase de corte e, esta, por sua vez, não diferiu estatisticamente das áreas de trânsito anterior, resultado esse verificado também a 10% de significância, indicando uma tendência de equilíbrio quanto a esse parâmetro entre as fases testemunha (trânsito anterior) e corte, em comparação à alteração nesse parâmetro mecânico do solo promovida durante o baldeio de madeira.

Esses resultados são concordantes com Stafford & Tanner (1983), ao pesquisarem a influência do grau de deformação do solo sobre a resistência mecânica ao cisalhamento em solo argiloso com 600 g.kg^{-1} de argila e em solo arenoso, com 600 g.kg^{-1} de areia.

Para o parâmetro ângulo de atrito interno, as médias obtidas no experimento foram de $41^{\circ} 35'$ para o tratamento trânsito anterior, de $44^{\circ} 10'$ para a fase de corte de madeira e $40^{\circ} 01'$ para a de baldeio. Análises de variância efetuadas a 5% e a 10% de significância não indicaram diferenças entre tratamentos, em razão do ensaio ter sido realizado com o mesmo material e, portanto, com a mesma granulometria, embora tenham ocorrido diferenças entre condições de aplicação de cargas ao solo.

Ao concluírem que o ângulo de atrito interno comportou-se de forma independente ao grau de deformação do solo, em estudo realizado no Instituto Nacional de Engenharia Agrícola da Inglaterra, tais resultados de Stafford & Tanner (1983) mostram-se compatíveis com os obtidos no presente estudo.

O valor médio para coesão do solo determinado no tratamento trânsito anterior enquadra-se na faixa de valores de coesão inseridos na classificação *silte* de Costa Nunes (1956), compreendendo a amplitude entre 9,80 kPa e 29,40 kPa. Considerando-se essa mesma classificação, concebida no ponto de vista da Geotécnica e bastante utilizada em engenharia de fundações, a faixa de variação de valores para ângulo de atrito interno situa-se entre 30° e 35° e, assim, pode-se considerar que o valor para esse parâmetro obtido no Latossolo Vermelho Amarelo ensaiado ($41^{\circ} 35'$) avizinha-se da faixa preconizada por Costa Nunes (1956), concluindo-se que, do ponto de vista geotécnico, a resistência mecânica do solo ao cisalhamento no tratamento trânsito anterior aproxima-se da classificação *silte* de Costa Nunes (1956).

Aluko & Seig (2000), trabalhando com solo contendo 640 g.kg^{-1} de areia, 170 g.kg^{-1} de argila e 17 g.kg^{-1} de matéria orgânica, densidade do solo de $1,33 \text{ g.cm}^{-3}$, encontraram valores semelhantes para os parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento ($C=16 \text{ kPa}$, $\phi=35^\circ$) aos apresentados no tratamento trânsito anterior, com 176 g.kg^{-1} de conteúdo de água, igualmente idêntico ao obtido no presente estudo. A seu turno, os valores dos parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento obtidos por Aluko & Seig (2000) enquadram-se perfeitamente na classificação *silte* de Costa Nunes (1956), embora o conteúdo dessa fração granulométrica no solo ensaiado contenha apenas 19% do total.

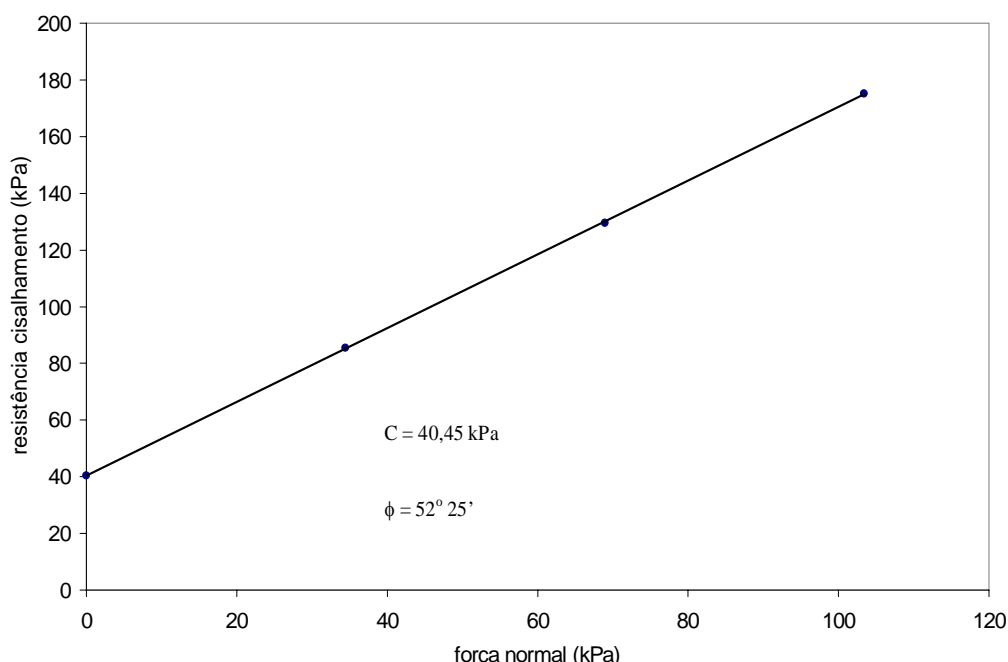


Figura 27. Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento na fase de corte.

Quanto ao tratamento *harvester*, a coesão do solo determinada *in situ* no ensaio de cisalhamento direto, apresentando o valor médio de $36,24 \text{ kPa}$, enquadra-se na faixa classificada como *argila arenosa*, conforme Costa Nunes (1956), uma vez que o citado autor identifica a amplitude de valores de coesão entre $19,60 \text{ kPa}$ e $49,00 \text{ kPa}$ como característica dessa classe de solo na engenharia geotécnica. Por outro lado, os valores mais baixos (26° a 30°) para ângulo de atrito interno preconizados na classificação de Costa Nunes

(1956), que os obtidos experimentalmente no Latossolo Vermelho Amarelo pesquisado ($44^{\circ}10'$) são atribuídos ao fato do citado pesquisador ter trabalhado com amostras de solo em condições naturais, avaliando suas possibilidades como fundação de obras de grande porte, como de barragens, por exemplo, ou de estabilização de taludes, ao passo em que no presente estudo o material foi ensaiado após sofrer algum tipo de carregamento.

Tais resultados, contudo, são concordantes com o enunciado por Caputo (1973), ao relacionar a resistência mecânica do solo ao cisalhamento ao seu estado de adensamento, de um modo geral.

Entretanto, quanto ao tratamento *forwarder*, os valores obtidos para coesão do solo e ângulo de atrito interno não encontram paralelos nas classificações de Costa Nunes (1956) e de Barger et al. (1966), em virtude do solo das áreas trafegadas pelo trator florestal transportador terem sofrido imposição de cargas de maior magnitude que nos demais tratamentos (Quadros 14 e 15), resultando em valores mais elevados em ambos os parâmetros indicativos da resistência mecânica do solo ao cisalhamento, principalmente a coesão, com a média de 72,63 kPa, ao passo em que o ângulo de atrito interno registrou $40^{\circ}01'$.

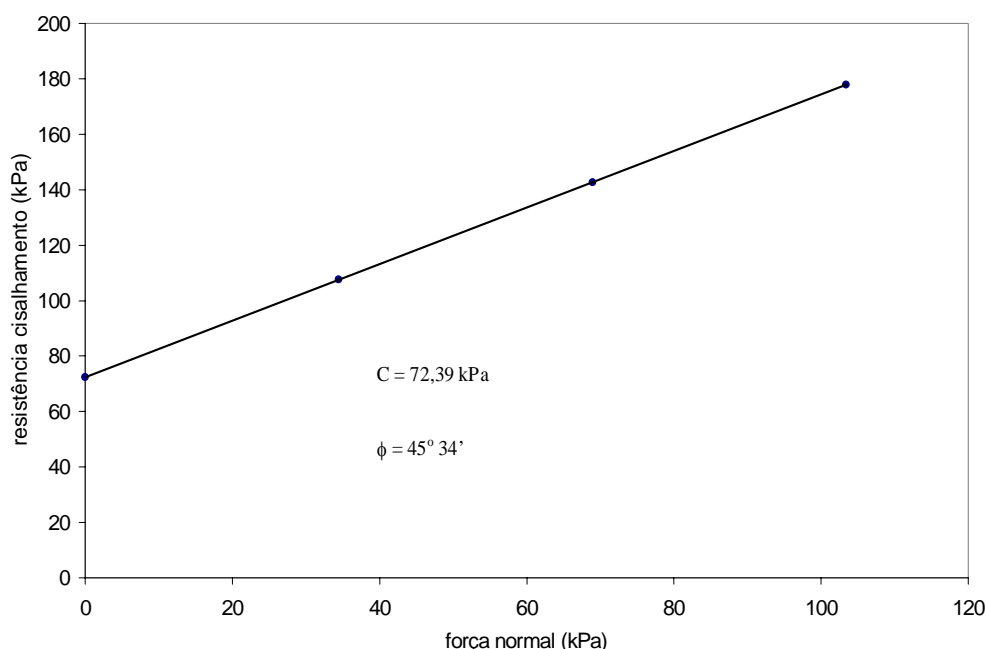


Figura 28. Envoltória típica de resistência do solo ao cisalhamento na fase de baldeio.

Tais resultados são concordantes com Rocha et al. (2002), ao concluírem que solos com maiores densidades apresentam maior resistência mecânica ao cisalhamento. Entretanto, discordam desses autores quando se referem que tais condições estão associadas a menores teores de matéria orgânica, de forma controversa ao que ocorreu no presente experimento. Assim, tal resultado pode ser atribuído ao fato dos citados autores terem trabalhado com amostras de solo saturadas, oriundas de florestas nativas e não submetidas a pressões de cargas de rodados produzidas em trabalhos mecanizados de corte e baldeio de madeira.

Owen (1988) pesquisou a tensão de cisalhamento em solo argiloso compactado, com 308 g.kg^{-1} de argila e 260 g.kg^{-1} de areia na camada entre 0-22 cm de profundidade, apresentando altos valores para o ângulo de atrito interno e coesão, em comparação a um outro solo, francoarenoso, segundo o autor. O ângulo de atrito interno básico ou fundamental registrou $43^{\circ} 48'$, em perfeita concordância com os valores médios para esse parâmetro obtidos nas condições do presente estudo, para os três tratamentos avaliados, uma vez que o conteúdo de argila, em todos os casos, encontraram-se próximos. Quanto à coesão básica ou fundamental, em que o referido pesquisador encontrou o valor médio de 5,1 kPa, em solo argilososiltoso, esse valor discorda dos resultados alcançados no presente estudo, o qual, apresentando o dobro do teor de areia, justificaria apresentar menores valores para coesão em relação ao estudo de Owen (1988), o que não foi evidenciado em função da diferença entre teores de argila, bem como por ter ocorrido uma severa imposição de cargas ao solo na fase de baldeio de madeira.

Todos os valores obtidos para coesão do solo no presente estudo enquadraram-se na proposição de McKyes (1985), em que os autores aduzem que, para solos argilosos com densidades entre $0,84 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,89 \text{ g.cm}^{-3}$, a coesão varia dentro dos limites de 0 kPa e 282 kPa. Para o ângulo de atrito interno, contudo, nas mesmas condições de textura e densidade do solo, em que citados pesquisadores propõem o limite entre 0° e 37° , as médias obtidas no presente estudo foram maiores, embora próximas (entre 40° e 44°), em consonância ao preconizado por Caputo (1973), ao relacionar a resistência do solo ao cisalhamento a seu estado de adensamento.

O descompasso relatado no presente estudo entre valores de coesão do solo em relação a seus respectivos pares para ângulo de atrito interno, com referência a pares

desses parâmetros citados nas classificações mencionadas, também ocorreu em estudos de Santos Filho (1998), ao pesquisar a resistência ao cisalhamento em solo siltoso *Yolo* e argiloso *Capay*, em condições seca e úmida e preparado e não preparado. Tais resultados conduzem à conclusão de que essas classificações podem carecer de revisão, mesmo porque, no dizer de Costa Nunes (1956), tais valores são sujeitos a críticas.

Em resumo, os resultados do presente estudo permitem afirmar que a resistência mecânica do solo ao cisalhamento pode também ser usada como indicador de compactação, uma vez que solos compactados têm menores distâncias entre partículas, o que lhes confere, conseqüentemente, menor índice de vazios e maior resistência ao cisalhamento, de acordo com Rocha et al. (2002), Ekwue & Stone (1995), bem como com Ellies et al. (1991), ao relacionarem a resistência do solo ao cisalhamento à capacidade de enraizamento das plantas.

6.2.3 Ensaio Proctor Normal

6.2.3.1 Densidade máxima do solo

Os valores médios de densidade máxima do solo dos tratamentos pesquisados são apresentados no Quadro 10. As curvas de compactação obtidas no ensaio Proctor Normal são apresentadas nas Figuras 29 a 33.

Quadro 10. Valores de densidade máxima do solo, g.cm^{-3} , teores de água crítico para compactação, g.kg^{-1} e de matéria orgânica, g.dm^{-3} , nos tratamentos avaliados (*).

Tratamento	Densidade máxima do solo (g.cm^{-3})	Teor de água crítico para compactação (g.kg^{-1})	Teor de matéria orgânica (g.dm^{-3})
Trânsito anterior	$1,533 \pm 0,012$ a	222 ± 2 ab	$26,267 \pm 0,483$ c
<i>Harvester</i> com galhada	$1,497 \pm 0,010$ a	227 ± 2 a	$32,267 \pm 0,836$ b
<i>Harvester</i> sem galhada	$1,568 \pm 0,008$ a	215 ± 2 ab	
<i>Forwarder</i> com galhada	$1,557 \pm 0,034$ a	215 ± 4 ab	$47,333 \pm 2,772$ a
<i>Forwarder</i> sem galhada	$1,572 \pm 0,018$ a	210 ± 4 b	

(*) Valores seguidos das mesmas letras, nas mesmas colunas, não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Os resultados indicam que não ocorreram diferenças significativas entre os cinco tratamentos pesquisados quanto à densidade máxima do solo, nos níveis de 5% e 10% de significância, pelo teste de Tukey. Esse resultado é atribuído ao fato de todas as amostras ensaiadas serem oriundas da mesma profundidade, área e classe de solo (Latosolo Vermelho-Amarelo) e, conseqüentemente, terem a mesma granulometria, além de terem sido submetidos ao mesmo tipo de manejo, embora com diferentes conteúdos de matéria orgânica.

As diferenças entre teores de matéria orgânica (Quadro 10) observadas são atribuídas ao lançamento e parcial incorporação ao solo, de ramos, folhas e ponteiros nas etapas de desrama e desponte, na fase de corte. Supõe-se que a decomposição microbiana desses finos florestais, ocorrida em final de primavera, tenha sido responsável pelo maior teor de matéria orgânica na última fase avaliada, de baldeio de madeira. Apesar disso, os diferentes teores de matéria orgânica entre tratamentos não resultaram em diferenças nos valores médios de densidade máxima do solo. Resultados discordantes são enunciados por Ekwue & Stone (1995) e Stone & Ekwue (1993), ao concluírem que o acréscimo de matéria orgânica contribui para reduzir a densidade máxima do solo, certamente por representarem teores maiores que os observados no presente estudo.

Trabalhando com cinco sistemas mecanizados de preparo do solo, com diferentes graus de revolvimento, desde sem preparo (semeadura direta) até revolvimento com inversão de camadas (arado de aivecas), em Latossolo Vermelho distroférico (antes designado Latossolo Roxo), com teores de argila na camada entre 0-7 cm de profundidade variando entre 590 g.kg⁻¹ e 690 g.kg⁻¹ e teores de matéria orgânica entre 25 g.kg⁻¹ e 31 g.kg⁻¹, Figueiredo et al. (2000) também não encontraram diferenças para densidade máxima do solo, dentro dos limites pesquisados, concluindo que a densidade máxima do solo não foi influenciada pelos teores de argila e matéria orgânica, tal como observado no presente estudo.

Assim, os resultados e conclusões formulados no presente estudo concordam com observações de Figueiredo et al. (2000) e discordam de Ekwue & Stone (1995) e Stone & Ekwue (1993), supostamente pelo fato de terem sido mantidos os mesmos teores de argila e areia do solo pesquisado.

De fato, Seixas et al. (1998), obtiveram o valor médio de 1,85 g.cm⁻³ para densidade máxima do solo, a um teor de água de 108 g.kg⁻¹. Esse resultado pode ser

atribuído ao alto conteúdo de areia do solo ensaiado, de 900 g.kg^{-1} , frente às conclusões inferidas no presente estudo.

6.2.3.2 Teor de água crítico para compactação

Embora não tenham sido observadas diferenças entre tratamentos quanto à densidade máxima do solo, o mesmo não ocorreu para com o parâmetro teor de água crítico para compactação, a 5% de significância (Quadro 10). Deve-se considerar que todos os tratamentos têm os mesmos teores de argila e areia, por serem englobados na mesma classe de solo, amostrados à mesma profundidade e submetidos ao mesmo tipo de manejo, embora o manejo reconhecidamente não tenha influência sobre a granulometria do solo.

De um modo geral, os tratamentos não diferiram entre si, com exceção para *forwarder* sem galhada, que apresentou teor de água crítico para compactação menor que *harvester* com galhada. Considerando-se que o tratamento corte com galhada não diferiu dos demais tratamentos ensaiados, assim como baldeio sem galhada, esse resultado é atribuído às densidades máximas do solo nessas duas condições, embora não tenham sido diferentes entre si. Isso indica a imposição direta e mais rigorosa de pressões conferida ao solo na fase de baldeio de madeira, quando desprovido do revestimento de proteção proporcionado pela galhada.

Sem embargo, com maiores pressões sobre o solo, este tende a ter um comportamento idêntico ao verificado com adição de areia, uma vez que Pacheco & Dias Junior (1990) e Figueiredo (1998), observaram que o teor de água crítico para compactação diminuiu e a densidade máxima do solo aumentou na medida em que o conteúdo de areia cresceu.

Por outro lado, a fase de baldeio de madeira, de um modo geral, apresentou maior teor de matéria orgânica que a fase de corte, em função de ter ocorrido um maior período de contato dos resíduos florestais com o solo na etapa de baldeio em relação à de corte e, ao mesmo tempo, devido ao maior tempo necessário à decomposição microbiana dos finos de colheita. Desse modo, esse resultado está em desacordo com observações de Figueiredo et al. (2000), Silva et al. (1986), Stone & Ekwue (1993), Ekwue & Stone (1995, 1997), que aduzem que maiores teores de argila e de matéria orgânica determinam redução na

amplitude das curvas de compactação, diminuindo, conseqüentemente, a densidade máxima do solo e aumentando o teor de água crítico para compactação.

Ekwue & Stone (1995) e Stone & Ekwue (1993) constataram aumento no teor de água crítico para compactação com o acréscimo do conteúdo de matéria orgânica no solo, atribuindo esse comportamento ao aumento do teor de água promovido pela adição de matéria orgânica. Entretanto, no presente estudo, os resultados demonstram ter ocorrido o contrário, uma vez que o tratamento *harvester* com galhada apresentou conteúdo de matéria orgânica menor e de teor de água crítico para compactação, maior, em relação ao *baldeio* sem galhada, em que esses índices apresentaram um comportamento inverso.

No presente estudo, a área de baldeio de madeira sem galhada apresentou maior densidade e maior coesão do solo que a área de corte com galhada, em conseqüência de maior adensamento. Por outro lado, o tratamento baldeio sem galhada revelou menor porosidade total e macroporosidade que o corte com galhada, pela mesma razão. Com base nesse quadro, depreende-se que, embora o conteúdo de matéria orgânica tenha sido maior, o espaço poroso na área de baldeio sem galhada era menor, em relação ao tratamento corte com galhada, portanto resultando em redução no seu conteúdo de água.

Assim, como a densidade máxima do solo não diferiu entre tratamentos, essa propriedade física ocorreu na área de baldeio sem galhada consoante um conteúdo de água inferior à da área de corte com galhada. Esse resultado é atribuído à maior magnitude de cargas sobre o solo observada na fase de baldeio sem galhada que, em função disso, possa ter sido submetido a uma tensão de pré-consolidação próxima ou no limite de uma deformação plástica e, nesse caso, o seu maior conteúdo de matéria orgânica apresenta-se como um fator de menor relevância.

A 10% de significância, o teor de água crítico para compactação no tratamento corte com galhada foi maior que os demais, com exceção apenas da testemunha, da qual não diferiu estatisticamente. Esse resultado pode ser atribuído à imposição menos severa de cargas ao solo nesse tratamento, o que se reflete nos maiores valores de porosidade total e macroporosidade, em relação aos demais tratamentos.

6.2.3.3 Grau de compactação

O Quadro 11 apresenta os valores de densidade média do solo, de densidade máxima, os graus de compactação (relação entre densidades médias e máximas) obtidos através do ensaio Proctor Normal e a comparação estatística entre as médias de graus de compactação obtidas nos tratamentos pesquisados, a 5% de significância, que refletem os diversos níveis e condições de imposição de cargas ao solo nas alternativas de trânsito florestal anterior ao experimento e nas operações mecanizadas de corte e baldeio de madeira.

Quadro 11. Valores de densidade média e máxima do solo, g.cm^{-3} , graus de compactação e médias, %, nos tratamentos avaliados (*).

Tratamento	Densidade média (g.cm^{-3})	Densidade máxima (g.cm^{-3})	Grau de compactação (%)	Média de graus de compactação (%)
Trânsito anterior	1,407 ± 0,025 b	1,550	90,774	91,792 ± 0,718 c
		1,510	93,179	
		1,539	91,423	
<i>Harvester</i> com galhada	1,457 ± 0,035 b	1,505	96,810	97,317 ± 0,742 ab
		1,512	96,362	
		1,475	98,780	
<i>Harvester</i> sem galhada	1,379 ± 0,012 b	1,553	88,796	87,950 ± 0,430 c
		1,573	87,667	
		1,578	87,389	
<i>Forwarder</i> com galhada	1,434 ± 0,038 b	1,512	94,841	92,165 ± 1,956 bc
		1,537	93,299	
		1,623	88,355	
<i>Forwarder</i> sem galhada	1,585 ± 0,020 a	1,564	101,343	100,830 ± 1,117 a
		1,547	102,456	
		1,606	98,692	

(*) Valores acompanhados de mesmas letras, nas mesmas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O Quadro 11 mostra que as médias de graus de compactação em todos os tratamentos avaliados se aproximam de rígidas especificações de terraplenagem para compactação de camadas de solos para construção de aterros destinados a implantações de rodovias, conforme se depreende do texto das normas do DNER (1971b).

Como termo comparativo a esses valores, destacamos o grau de compactação de 83,42% inferido em solo da região de Bauru, com densidade média de 1,61

g.cm^{-3} e máxima, de $1,93 \text{ g.cm}^{-3}$ e teor ótimo de água para compactação de 114 g.kg^{-1} . Esse solo contém 740 g.kg^{-1} de areia total, 150 g.kg^{-1} de argila e 110 g.kg^{-1} de silte, apresentando coesão de 14 kPa e ângulo de atrito interno de 30° , segundo dados de Lobo et al. (1997), valores esses menores que os obtidos no presente estudo e perfeitamente inseridos na classificação *silte* de Costa Nunes (1956), embora não se enquadrem na classificação de Barger et al. (1966), que se refere a solos arenosos. Conquanto os valores de densidade máxima do solo e teor de água crítico para compactação, apresentados por Lobo et al. (1997), estejam concordes com os dados de literatura, conforme Silva et al. (1986), Pacheco & Dias Junior (1990), Stone & Ekwue (1993) e Dias Junior & Miranda (2000), menores valores para grau de compactação, coesão e ângulo de atrito interno fazem supor que o estado de adensamento do solo oriundo do arenito de Bauru seja de menor magnitude que todos os tratamentos avaliados no presente estudo.

Comparativamente aos resultados obtidos no presente estudo, Lindstrom & Voohrees (1994) estabeleceram em 86% o limite aceitável para o grau de compactação do solo, acima do qual são produzidos efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e produtividade de culturas. Graus de compactação entre 84% e 87% são relatados por Torres & Saraiva (1999) como condicionantes que afetaram negativamente a produtividade de soja em anos mais secos.

A compactação do solo no tratamento *harvester* com galhada superou esses limites citados e ainda atenderia perfeitamente as especificações para construção de corpos de aterros para obras rodoviárias, uma vez que foi obtido, por meio do ensaio Proctor Normal, o grau de compactação de $97,317 \pm 0,742$ %, que ultrapassa os 95% de compactação do solo exigidos nas normas do DNER (1971b).

O tratamento *forwarder* sem galhada, por sua vez, apresentou grau médio de compactação de $100,80 \pm 1,117$ %. O nível de compactação levantado nesse tratamento superou os valores limites apontados por Lindstrom & Voohrees (1994) e Torres & Saraiva (1999) e ainda atenderia perfeitamente ao item mais rígido da referida especificação do órgão rodoviário, uma vez que, nessa condição, poderia ser destinado para as camadas finais do aterro, ou seja, as mais próximas da superfície, denominadas de crista do aterro, sobre as quais seria edificada a base ou sub-base do pavimento.

Os demais tratamentos (*harvester* sem galhada e *forwarder* com galhada) não diferiram do grau de compactação avaliado para a testemunha (trânsito anterior), o que faz supor que a severa imposição de cargas transmitidas pelo rodado do *forwarder* poderia ser suportada pelo solo, desde que o recobrimento fornecido pela camada de galhada fosse inteiramente contínuo nos eitos de baldeio de madeira. Por tais razões não é prudente indicar o emprego do trator florestal transportador pesquisado (*forwarder*) para extração de madeira sem a proteção do solo conferida pela camada de galhada, nas condições do experimento.

A 10% de significância, os tratamentos *harvester* com galhada e *forwarder* sem galhada não diferiram entre si e superaram os graus de compactação de todos os demais tratamentos, os quais, por sua vez, também não diferiram entre si.

6.2.4 Pressão dos rodados sobre o solo

6.2.4.1 Colhedora de madeira (*harvester*)

A massa do *harvester*, acrescida do cabeçote derrubador-processador, registrou em ordem de marcha o valor de 203,067 kN.

A distancia (a) entre os eixos das rodas guia e motriz da esteira acusou o valor de 3650 mm que, segundo Mialhe (1980), este valor corresponde ao comprimento da esteira em contato com o solo. A largura da esteira (b) do modelo empregado no estudo revelou o valor de 600 mm. Portanto, a área total teórica da esteira (S) em contato com o solo corresponde ao dobro do retângulo cujos lados são a e b. Assim, a área teórica total da esteira do *harvester* em estudo, em contato com o solo e em condição estática, foi 4.380.000 mm², ou 4,380 m².

A pressão unitária teórica (P) sobre o solo exercida pelo rodado de esteiras do *harvester*, também em condição estática, é representada pelo quociente da divisão entre a massa total (M) da máquina (203,067 kN) e a área de contato (S) rodado-solo (4,380 m²), perfazendo, portanto, o valor médio de 46,362 kPa.

Assim, o valor médio da pressão unitária (P) sobre o solo, transmitida pelo rodado do *harvester* empregado no corte de madeira, em condição estática foi de 46 kPa, de acordo com Mialhe (1980).

6.2.4.2 Trator florestal transportador (*forwarder*)

A massa do *forwarder*, computada com e sem o carregamento básico de madeira, é apresentada no Quadro 12.

Quadro 12. Cargas sobre os eixos dianteiro, traseiro e total do *forwarder*, kN, segundo Volvo (1997) e Duratex (2001).

Cargas	Eixo dianteiro	Eixo traseiro	Carga total
Veículo padrão utilizado em transporte de minério ⁽¹⁾			
Veículo	88,682	85,641	174,324
Carga útil	24,133	196,592	220,735
Total	112,815	282,233	395,059
Veículo equipado com grua e carroceria florestal ^(1,2)			
Veículo	111,932	93,587	205,519
Carga útil	21,190	188,646	209,836
Total	133,122	282,233	415,355

Fontes: ⁽¹⁾ Volvo (1997)

⁽²⁾ Duratex (2001)

Os valores médios de área de contato pneu-solo avaliados para o *forwarder* nas condições de baldeio de madeira pesquisadas, são apresentados no Quadro 13.

Quadro 13. Valores médios de área de contato pneu-solo, mm², por localização, tipo de eixo e condições de carregamento para o *forwarder* pesquisado (*).

Pneumático	Tipo de eixo	Condição de trabalho	
		com carregamento	sem carregamento
Dianteiro	simples	556090 a	338432 b
Intermediário	geminado	702541 a	515859 a
Traseiro	geminado	701548 a	400418 ab
Pneus sob cargas-padrão		Área de contato	
Com carregamento		653356 a	
Sem carregamento		418189 b	
Pneus com e sem cargas		Área de contato	
Dianteiro	simples	447217 a	
Intermediário	geminado	609167 a	
Traseiro	geminado	550933 a	

(*) Valores acompanhados de mesmas letras, nas mesmas seções de colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% e a 10% de significância.

Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre áreas de contato pneu-solo considerando-se as diferentes localizações de eixos motrizes,

simples ou geminados, quando submetidos ao carregamento padrão de madeira. Assim, pneus dos eixos dianteiro, intermediário e traseiro não diferiram entre si quanto à área de contato com o solo (Quadro 13).

Esse resultado indica que, mesmo com diferentes cargas, não ocorreu uma deformação sensível dos pneus, o que não constitui prática habitual no tráfego florestal ou agrícola de máquinas de grande porte, quando submetidas a carregamento. Tal observação conduz à conclusão de que os pneumáticos estavam inflados demasiadamente ou que possuem os flancos com estrutura resistente à deformação. Na verdade, as duas hipóteses são verdadeiras, considerando-se que operam com pressões de inflagem da ordem de 441 kPa e possuem estrutura com capacidade para suportar cargas de até 104 kN, conforme mostrado no Quadro 3.

Entretanto, ocorreram diferenças significativas quanto à áreas de contato pneu-solo para os eixos dianteiro, intermediário e traseiro no caso do *forwarder* operando sem carregamento (Quadro 13), em função de distribuição de pressões ao solo inferidas nessa condição de trabalho, com menores cargas induzidas pelo eixo dianteiro da máquina.

Também ocorreram diferenças significativas entre valores médios de área de contato pneu-solo para veículos operando com e sem o carregamento padrão de madeira, sendo maiores as áreas de contato pneu-solo no caso de *forwarders* portando cargas de madeira.

Sobre esse tema, Silversides & Sundberg (1989) aduzem que, independentemente das características do solo, 90% da carga dinâmica do veículo sobre o pneu é aplicada verticalmente sobre a superfície do solo e 10% desloca-se para as laterais. Afirmam também que, em solos de florestas, a pressão aplicada é igual a 1,1 vezes a pressão interna de inflagem do pneu. Em uma análise sobre a compactação de solos sob florestas, postulam que a área de contato pneu/solo sofre acréscimo quando a carga sobre o rodado é aumentada, o que está confirmado no presente estudo (Quadro 13).

As pressões teóricas (kPa) sobre o solo determinadas em função de cargas por pneu do *forwarder*, em condições estática, determinadas na unidade de produção florestal avaliada, são apresentadas no Quadro 14.

Amplitude de variação de valores de pressão sobre o solo entre 70 kPa e 160 kPa, determinados por pneumáticos empregados em trabalhos agrícolas e florestais são apresentados por Trelleborg (s.d.), baseados em dados do *The Swedish Institute, The Swedish University* e da empresa *Imag-Dlo*, da Holanda, também são concordantes com os resultados do presente estudo.

Contudo, tais resultados são discordantes de observações de Sever (1987), baseadas em valores obtidos por Staaf & Wiksten (1984), que limitam entre 66 kPa e 105 kPa as pressões sobre o solo determinadas por eixos dianteiros de *forwarders* com rodados de pneus e com potência bruta no motor compreendida entre 20 kW a 120 kW. No caso de rodados traseiros geminados (designados como em *tandem* ou *bogie*) de *forwarders* de mesma faixa de potência, citados autores aduzem que a pressão sobre o solo está compreendida entre 105 kPa e 180 kPa, nesse caso concordantes com os valores levantados no presente estudo (Quadro 14).

Quadro 14. Valores de pressões sobre o solo indicadas^(1,2) e determinada⁽³⁾ para o *forwarder* pesquisado, kPa, em função de carga por pneu.

Pneumático	Tipo de eixo	Pressão estática por pneu (kPa)		
		Volvo (s.d.) ⁽¹⁾	Duratex (2001) ⁽²⁾	Presente estudo ⁽³⁾
Dianteiro	simples	70	94	123 ± 16
Intermediário	geminado	---	---	101 ± 6
Traseiro	geminado	120	117	101 ± 5

Por sua vez, Grisso et al. (1991) mencionam Robotham (1984), que ensaiou desempenho de tração simples conferida por pneumáticos de tratores agrícolas, de dimensões 18.4-38, em polegadas e pressão de inflagem de 160 kPa e duplados, dimensões 18.4-30 e pressão de inflagem do pneu interno de 100 kPa e do externo de 84 kPa e de outro pneu simples 24.5-32, com pressão de 84 kPa. Esses valores demonstram que pressões de inflagem de pneumáticos entre 84 kPa e 160 kPa são factíveis em operações agrícolas.

Pressões sobre o solo maiores que as obtidas no presente estudo foram mencionadas por Reaves & Cooper (1960), segundo gráficos de isóbaras de pressões determinadas para tratores de pneus e de esteiras, em um solo de textura média. Apontaram

que as pressões exercidas na superfície do solo sob as rodas de um trator de pneus foram de 175 kPa, ao passo em que, para um trator de esteiras com o mesmo peso total do trator de pneus, a pressão unitária foi de 85 kPa, justificando o fato pela maior área de contato da esteira com o solo, em relação ao pneu.

Sobre os resultados do presente estudo, dando conta de que o eixo dianteiro do *forwarder* pesquisado imprime individualmente maior carregamento ao solo que cada eixo do rodado traseiro, este na forma eixos geminados (*bogie*, em *tandem*), Sever (1987) se refere a esse fato aduzindo que uma das principais características dos *forwarders* convencionais é que as pressões sobre a superfície do solo sob os pneus do eixo dianteiro são altas, em consonância com conclusões do presente estudo. Acrescenta que recentemente um novo tipo de *forwarder* tem sido introduzido no mercado, cuja característica principal é que tanto o eixo traseiro como o dianteiro são geminados, resultando em menor pressão sobre a superfície do solo, menor que 50 kPa. Dentre os fabricantes brasileiros e estrangeiros, várias empresas produzem modelos de *forwarders* com tal característica de projeto apontada por Sever (1987), quanto à distribuição de cargas ao solo, como por exemplo os modelos Randon RK-612H e 812H, Valmet Partek 820, 840, 860 e 890, Tigercat F700, F14 e 1018, Timberjack 810D, 1110D, 1410D e 1710D, Caterpillar 554 e 574. Portanto, conclui-se que também o eixo dianteiro do *forwarder* em estudo deve ser reprojetoado na forma de eixos geminados, objetivando a sustentabilidade da cultura florestal ao longo dos próximos anos.

Sobre este tema, Hakansson et al. (1988) destacaram que, para um dado veículo, mais e/ou maiores pneus flexíveis facilitam obter-se pressões de inflagem mais baixas e menores pressões de contato com o solo e, conseqüentemente, menor compactação, segundo autores citados. Acrescentam que, dependendo sobretudo da situação, soluções praticáveis são utilizar pneus extralargos, rodas duplas ou triplas ou acrescentar eixos.

Por outro lado, considerando-se que, segundo Soehne (1952, 1958), a pressão interna de inflagem de um pneu de trator agrícola corresponde à pressão aplicada a um solo firme, por conseguinte a pressão estática teórica aplicada ao solo, nas condições do experimento, representou o valor médio de 441 kPa, conforme Duratex (2001) e Michelin (2002). Nesse caso, esta seria a carga unitária teórica aplicada pelos pneumáticos dos eixos dianteiro, intermediário e traseiro, sendo estes dois últimos geminados entre si, também designados como em forma de *tandem*.

Comparativamente, ao abordar a experiência brasileira em compactação de solos, obtida na construção de barragens com núcleo de terra no Brasil e em Portugal, Cruz & Bezerra (1971) aduzem que os equipamentos de compactação utilizados, embora de variados tipos, trabalham com pressão de pneus de 345 kPa a 552 kPa, faixa em que se enquadra a pressão de inflagem (441 kPa) utilizada no presente estudo.

Para Koolen (1994), o nível de pressão máxima próximo à superfície de contato pneu-solo está em torno de duas vezes a pressão de inflagem do pneu.

VandenBerg & Gill (1962) determinaram a magnitude e distribuição de forças aplicadas ao solo por pneus de eixos dinamicamente carregados, por meio da instalação de transdutores de pressão na carcaça de um pneumático com banda de rodagem lisa e constataram que a pressão aplicada ao solo pelo pneu é, no mínimo, três vezes maior que sua pressão de inflagem. Acrescentaram que provavelmente a localização do pico de pressões ao solo seja um aspecto mais importante que a magnitude das forças aplicadas.

Outro trabalho nessa linha foi realizado por Trabbic et al. (1959), medindo a pressão na área de contato pneu-solo em vários pontos da superfície de rolamento (banda de rodagem) e na lateral das garras, cujos resultados indicam ser de duas a cinco vezes maiores que a pressão de inflagem, o que, de certa forma, confirma as conclusões de Koolen (1994) e VandenBerg & Gill (1962).

Então, com base nos resultados de alguns pesquisadores e grupos de pesquisadores, como Soehne (1952, 1958); Mialhe (1980, 1993); Silversides & Sundberg (1989); Koolen (1994); VandenBerg & Gill (1962); Trabbic, Lask e Buchelle (1959); Mantovani (1987) e Yoder (1959b), as pressões sobre o solo determinadas pelos pneumáticos do trator florestal transportador (*forwarder*), segundo as condições do experimento, são as apresentadas no Quadro 15.

Quanto à pressão sobre o solo determinada pelo rodado do *harvester*, Matthies (1995) ressalta que o impacto produzido por uma pressão específica menor que 50 kPa pode ser negligenciada sob uma moderada condição de conteúdo de água do solo, independentemente de sua textura. Por outro lado, Raghavan et al. (1977) postulam que a estrutura do solo tem sido reportada como significativamente danificada quando solos argilosos adensáveis recebem pressão de 94 kPa.

Assim, o patamar de pressões impostas ao solo, determinado pelo rodado de esteiras do *harvester*, da ordem de 46 kPa, indica uma adequada distribuição de cargas da máquina, tendo sido o principal responsável pela manutenção e/ou melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo avaliadas. Por outro lado, as pressões induzidas pelo rodado de pneumáticos do *forwarder*, representadas pelas cargas repetidas e subsequentes ao percurso do *harvester*, mencionadas nos Quadros 14 e 15, resultaram em redução das mesmas características físicas e mecânicas.

Assim, os resultados apresentados nos Quadro 14 e 15 nos conduzem à conclusão de que as pressões de contato pneu-solo e o pneumático radial do tipo industrial que equipa a máquina de extração por baldeio e a sua respectiva pressão de inflagem não se encontram tecnicamente adequados para o serviço de extração de madeira que executam, efetuado no interior de talhões florestais. As formas de imposição de cargas ao solo sob tais condições do rodado do *forwarder* supostamente foram responsáveis pelas alterações apontadas em algumas das características físicas e mecânicas do Latossolo Vermelho Amarelo estudado.

Quadro 15. Pressões aplicadas ao solo por rodados, em condição estática, de acordo com os autores mencionados, em kPa.

Máquina	Roda do	Tipo	Mialhe (1980, 1993)	Soehne (1952, 1958)	Silversides & Sundberg (1989)	Trabbic et al. (1959)	Vanden Berg & Gill (1962)	Mantovani (1987) Yoder (1959b)	Koolen (1994)
<i>Harvester</i>	Esteiras	garra tripla	46	-	-	-	-	-	-
<i>Forwarder</i>	Pneus	dian	882-2205	441	485	882-2205	1323	441	882
		interme diário	882-2205	441	485	882-2205	1323	441	882
		traseiro	882-2205	441	485	882-2205	1323	441	882

Tais modificações em propriedades físicas e mecânicas do solo supostamente estejam associadas também ao efeito de carga repetida, em sucessão ao percurso do *harvester*, determinadas pela passagem em seqüência de pneumáticos do *forwarder* com carregamentos de madeira, transmitidas pelos eixos dianteiro, intermediário e traseiro, impondo respectivamente pressões ao solo sucessivas de 123 ± 16 kPa, 101 ± 6 kPa e 101 ± 5 kPa,

conforme o Quadro 14, ou de três pressões máximas concomitantes avaliadas entre 441 kPa e 2.205 kPa, de acordo com os autores mencionados no Quadro 15.

Sobre o comportamento do solo ao sofrer a imposição de cargas repetidas, Senço (1979) postula que para solos granulares (arenosos) a velocidade de aplicação de cargas pode significar muito pouco e, para solos finos (argilosos) verifica-se que a breve aplicação de carga seguida de imediata descarga não dá tempo para a água movimentar-se, além do que a água absorve parte da carga, resultando em pequenos recalques. E, no caso de carga aplicada prolongadamente, a água poderá ser expulsa, provocando recalque mais ou menos pronunciado, resultando em perda de capacidade de suporte.

Rodas (1967) apresenta diversos ábacos semilogarítmicos sobre dimensionamento de deformação do solo permanente (segmento plástico da curva de recalque) e total (segmentos elástico e plástico), em função do número de aplicações de determinadas cargas repetidas. Em um desses ábacos, em que é aplicada uma pressão sobre o solo de 479 kPa, passível de ter ocorrido em cada trajeto percorrido por pneus do *forwarder*, de acordo com autores citados no Quadro 15, o ábaco indica uma deformação permanente ao redor de 0,7112 mm para o percurso de um pneu e de 1,7272 mm para três percursos do mesmo pneu, portanto produzindo um recalque maior que 1 mm pelo efeito de carga repetida. Se considerarmos a *dupla passagem* de pneu do *forwarder* conforme preconizado por Costantini & Doley (2001), nesse caso a deformação permanente, de acordo com o mesmo ábaco, seria de 2,4384 mm e apenas ao efeito de carga repetida seria atribuído o recalque no solo de 1,7272 mm.

O efeito de carga repetida determinado por rodados de máquinas trafegando em áreas de produção florestal ou agrícola sobre modificações de propriedades físicas ou mecânicas do solo foram também avaliadas por Fenner (1999), McDonald & Seixas (1997), Alakukku (1996), Horvat (1994), Petelkau & Dannowski (1990), Hakansson et al. (1988), Jakobsen & Greacen (1985), Koger et al. (1985), Wronski (1984) e Raghavan et al. (1977). O carregamento repetido de curta duração foi avaliado na deformação de pavimentos flexíveis por Pinto & Preusler (2002), Queiroz (1979), Aratangy et al. (1965) e Yoder (1959b) e, na deformação de pavimentos rígidos, por Pitta & Carvalho (1978).

Conclui-se que, para reduzir os efeitos de uma imposição severa de cargas ao solo, trazendo como conseqüência graus de alteração em algumas de suas

propriedades físicas e mecânicas, a substituição dos pneumáticos do tipo industrial, constituídos de carcaças rígidas e que operam com elevadas pressões de inflagem, por outros adequados ao trabalho florestal, de baixa pressão e alta flutuação, determinando menores pressões sobre o solo. Tal conclusão está de acordo com estudos de Carpenter et al. (1985) e Seixas et al. (1998). Por outro lado, propõe-se também que o eixo dianteiro de propulsão e sustentação do *forwarder* seja também geminado, com o objetivo de distribuir melhor as pressões sobre o solo determinadas por esse segmento do rodado.

6.2.5 Cobertura de galhada

A quantificação de resíduos florestais de colheita no povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden estudado é apresentada no Quadro 16.

Quadro 16. Quantificação de galhada seca, por classe de diâmetro e total, kg.m^{-2} , após corte de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

Classe de diâmetro (cm)	Massa de galhada (kg.m^{-2})
< 0,5	$3,397 \pm 0,496$
0,5 – 2,5	$1,798 \pm 0,221$
2,5 – 7,5	$1,225 \pm 0,324$
Total	6,420

Esse resultado demonstra que o revestimento do solo formado por galhada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, colhido mecanicamente aos 91 meses de idade, revelou um percentual em peso de 53% de folhas verdes e em diferentes estágios de decomposição, associados a ramos finos, com diâmetro inferior a 0,5 cm. Outro estrato, formado por ramos verdes e secos, com diâmetro compreendido entre 0,5 cm e 2,5 cm, representou 28% da cobertura da galhada, em peso. Um terceiro estrato, constituído por ramos grossos, com diâmetro compreendido entre 2,5 cm e 7,5 cm, significou 19% da massa de galhada. A espessura da camada de resíduos florestais oscilava ao redor de 16 cm.

A presença ou ausência dessa cobertura física, caracterizando-se por constituir composição de uniformidade relativa, influenciou o comportamento do solo quanto à resposta frente à aplicação de cargas, consoante algumas das propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Quanto aos parâmetros físicos, a ausência desse revestimento de proteção do solo determinou aumento na densidade do solo e redução na macroporosidade, ao

passo em que a temperatura aumentou, considerando-se a fase de baldeio de madeira, tal como evidenciado em trabalhos de pesquisa de autores citados, como por exemplo, Costa & Godoy (1962), no caso da temperatura do solo.

Quanto aos parâmetros mecânicos, o grau de compactação do solo indicado pelo ensaio Proctor Normal no tratamento *harvester* com galhada foi maior que sem galhada, em função da densidade do solo ter sido maior no primeiro caso, resultado que não temos a que atribuir. Há que se considerar também que o teor de água do tratamento *harvester* com galhada esteve mais próximo do ponto crítico para compactação do que o sem galhada, embora não tenham diferido estatisticamente (Quadro 10). No caso do baldeio de madeira, o grau de compactação mostrou-se maior quando o *forwarder* trafegou sem a manta de proteção do solo. Por outro lado, quanto à resistência mecânica do solo à penetração, a presença ou ausência de galhada não influíram de forma significativa no comportamento desse parâmetro.

McMahon & Evanson (1994) apud Oliveira Jr. (1998) estudaram o efeito de diferentes quantidades de galhada de *Pinus* na redução da compactação produzida por um *forwarder* em solo arenosiltoso. Concluíram ter ocorrido redução nos incrementos de densidade do solo à proporção que aumentava a quantidade de resíduos.

Densidades experimentais de 0, 10 e 20 kg.m⁻² de cobertura de galhada de *Pinus taeda* e *Pinus palustris* foram pesquisadas por McDonald & Seixas (1997) sobre solos de textura média, em condição úmida e seca, em dois graus de intensidade de tráfego florestal, consistindo de um e cinco percursos de um *forwarder* Franklin 170, com um carregamento de 167 kN, equipado com pneus inflados a 210 kPa. A cobertura de 10 kg.m⁻² de galhada, maior que a avaliada no presente estudo, não decresceu a compactação, avaliada pela densidade do solo e resistência à penetração, em condição de solo seco, observada após uma passagem do *forwarder* (como também ocorrido no presente estudo), em relação ao solo desnudo. Esse resultado pode ser atribuído à menor resistência à compressão e flexão dos finos de colheita do *Pinus taeda* e *Pinus palustris* em relação aos de *Eucalyptus grandis*, conforme Mainieri & Pereira (1965). McDonald & Seixas (1997) aduzem que tais resultados discordam de outros obtidos em pesquisas realizadas na Austrália, Nova Zelândia e Estados Unidos, em que benefícios atribuídos à presença de galhada foram observados no primeiro percurso da máquina, após o que a habilidade da cobertura em absorver a carga imposta pela máquina tende a decrescer. Contudo, para a mesma densidade de galhada, o acréscimo na

densidade do solo após cinco passagens do *forwarder* foi menor que no solo desnudo, embora não tenha deste diferido significativamente. Os autores concluem também que a cobertura de galhada tem efeito mais significativo sobre solos com menor capacidade de suporte.

Extração de madeira por *skidders* de esteiras rígidas e flexíveis sobre uma camada de galhada de 18 kg.m^{-2} de *Eucalyptus regnans* foi reportada por Jakobsen & Moore (1981). Os autores informam que as trilhas com cobertura mostraram menores decréscimos em porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica saturada após três percursos das máquinas, mas que esses efeitos desapareceram após sete percursos. Tais resultados são concordantes com os obtidos no presente experimento, com exceção para condutividade hidráulica saturada, que não diferiram entre si, embora em valores absolutos os tratamentos com galhada tenham sido superiores aos sem galhada.

Efeitos de uma cobertura de galhada sobre sítio argiloso também são relatados por Keilen (1992), em que a taxa de infiltração após cinco percursos de colheita efetuada por trego representava 60% em relação à testemunha. A área sem proteção de galhada apresentou apenas 5% da taxa de infiltração original, após três percursos da máquina de colheita. O autor afirma ainda que não foi possível constatar aumento na compactação abaixo da camada de galhos e, sem a galhada, a compactação foi aumentada após cada tráfego. Para as condições do presente estudo, a taxa de infiltração de água no solo foi reduzida a 24% em relação à testemunha após um percurso da máquina de corte e a 33% após a passagem subsequente da máquina de baldeio, em ambos os casos na ausência de cobertura de galhada.

Quanto à densidade de cobertura de galhada, Seixas et al. (1998) concluíram que resíduos de colheita de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden constituídos de ramos e folhas, com 5 kg.m^{-2} , não diferiu do mesmo resíduo acrescido de cascas, com taxa de 16 kg.m^{-2} , em relação à compactação avaliada através da densidade do solo, após 27 percursos de um trator tracionando carreta em baldeio de madeira. Dessa assertiva infere-se a conclusão de que uma cobertura de galhada de $6,4 \text{ kg.m}^{-2}$, obtida no presente estudo, teria condições de proporcionar proteção do solo com capacidade para efetuar o amortecimento de pressões impostas por cargas de rodados de veículos.

7 CONCLUSÕES

Nas condições em que o experimento foi desenvolvido os dados analisados permitem as seguintes conclusões:

Comparativamente, a densidade do solo, a resistência mecânica ao cisalhamento e a pressão de rodados sobre o solo foram maiores após o tráfego do trator transportador de madeira, com rodado de pneus, em relação ao da colhedora de madeira com rodado de esteiras. Por outro lado, os parâmetros porosidade total, macroporosidade, microporosidade, água disponível e estabilidade de agregados a seco foram maiores na fase de corte que na de extração por baldeio.

O trator transportador de madeira, quando trafegou sem o revestimento de galhada, resultou em maior densidade, temperatura do solo e grau de compactação e, ao mesmo tempo, menor porosidade total e macroporosidade do que quando trafegou sobre cobertura de galhada.

A cobertura de galhada não afetou significativamente a taxa de infiltração de água no solo, água disponível, resistência mecânica à penetração e densidade máxima do solo durante o tráfego da colhedora de madeira e do trator transportador autocarregável.

O conjunto de todas as formas de imposição de cargas ao solo induzidas por máquinas corte e baldeio de madeira resultaram em decréscimo na taxa de infiltração de água no solo.

A temperatura do solo foi maior nas áreas sem cobertura de galhada, tanto na fase de corte como na extração de madeira, em função de maior aproximação entre partículas de solo e das formas de propagação da energia calorífica.

Em todos os tratamentos foi atingido o índice de 2 Mpa, referido na literatura como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração para desenvolvimento de raízes.

De um modo geral, o teor de água crítico para compactação não diferiu entre os tratamentos estudados, com exceção para o baldeio de madeira efetuado sem cobertura de galhada, que foi inferior ao observado no corte sobre galhada, em função da densidade máxima do solo nessas duas condições.

O grau de compactação do solo determinado pelo tráfego do *forwarder* na ausência de cobertura de galhada foi maior que nas demais condições de trânsito avaliadas, devido à maior imposição e de forma direta de cargas ao solo, com exceção para o tráfego do *harvester* sobre galhada, do qual não diferiu significativamente em função de sua densidade em condições de campo.

Os resultados obtidos demonstraram a necessidade de monitoramento do conteúdo de água do solo como requisito para viabilizar a operação de máquinas de grande porte em trabalhos de colheita, visando um afastamento seguro de pontos críticos para compactação do solo.

As áreas de contato pneu-solo do *forwarder* foram maiores com cargas completas de madeira do que sem carregamento.

A pressão imposta ao solo pelo trator transportador de madeira foi superior à recomendada.

A distribuição de massa do trator transportador de madeira com carregamento completo, em condição estática, resultou em maior pressão sobre o solo no eixo dianteiro em relação a cada eixo do rodado traseiro da máquina.

Os resultados da pesquisa indicam que o percurso do *harvester*, com rodado de esteiras, na forma e condições em que foi realizado, manteve ou melhorou as propriedades físicas e mecânicas do solo avaliadas, devido a uma adequada distribuição de pressões ao solo, ao passo em que a passagem subsequente do *forwarder*, com rodado de pneus e caracterizando efeito de cargas repetidas, resultou em redução de tais características do solo.

8 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se a prosseguimento dessa linha de pesquisa em outras classes de solo, enfocando técnicas e máquinas alternativas de corte e extração florestal, em sistemas de toras curtas e longas.

Efetuar maiores investigações sobre o comportamento da temperatura do solo em função do emprego alternativo de máquinas de corte e baldeio de povoamentos florestais.

Recomenda-se substituir os pneumáticos do tipo industrial, constituídos de carcaças rígidas, operando com elevada pressão de inflagem, que equipam o trator transportador pesquisado, por pneumáticos adequados ao trabalho florestal, de baixa pressão e alta flutuação, com o objetivo de reduzir as pressões impostas aos solos.

Propõe-se a revisão do projeto estrutural de construção do trator transportador empregado, com a inclusão de um eixo motriz no rodado dianteiro, de modo análogo à concepção de eixos geminados e independentes adotados para o rodado traseiro, visando alcançar melhor distribuição do conjunto de cargas aplicadas ao solo, bem como possibilitar melhor trafegabilidade da máquina ao efetuar operação comercial de baldeio de madeira.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAKUKKU, L. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic: II – long term effects on the properties of fine-textured and organic soils. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 37, n. 4, 1996, p.223-238.
- ALUKO, O.B.; SEIG, D.A. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 57, n. 3, 2000, p.143-157.
- AMADO, T.J.C.; MATOS, A.T.; TORRES, L. Flutuação de temperatura e umidade do solo sob preparo convencional e em faixas na cultura da cebola. Brasília: *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 25, n. 4, 1990, p.625-631.
- ARATANGY, N.J.; FONSECA, J.P.; ANDREATINI, L.P.V. Influência do excesso de carga por eixo nos pavimentos. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 1, 1965. *Anais ...* Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1965.
- ARSHAD, M.A.; LOVERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.T. (Eds.), *Methods of assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996, p.123-141.
- ARVIDSSON, J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. Perth: *Plant and Soil*, v. 208, n. 1, 1999, p.9-19.

- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Soil cone penetrometer. In: *ASAE Standards 1999: standards engineering practices data*. Saint Joseph: ASAE, 1999, p.834-835. (Standard ASAE S313-1)
- ASSIS, R.L. *Avaliação dos atributos físicos e da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa*. Botucatu, 2002. 128 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista.
- BACCHI, O.O.S. *Efeito da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp.)*. Piracicaba, 1976. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.
- BAILEY, A.C.; WEBER, J. Comparison of methods of measuring shear strength using artificial soils. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 8, n. 2, 1965, p.153-156, 160.
- BALASTREIRE, L.A. (Autor). Dinâmica do solo. In: *Máquinas Agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990, p.1-29.
- BARGER, E.L.; LILJEDAHN, J.B.; CARLETON, W.M.; MC KIBBEN, E.G. Tratores e seus motores. São Paulo: Edgard Bluncher, 1966. 398 p.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Física de suelos. [Soil Physics]. Ciudad de Mexico: UTEHA, 1973. 529 p.
- BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. Porto Alegre: *Lavoura Arrozeira*, v. 33, n. 318, 1980, p.59-62.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico

típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. Viçosa: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 1, 2001, p.167-177.

BODEN, D.I.; HERBERT, M.A. Study tour of Australia and New Zealand. In: 1988 ANNUAL REPORT. Pietermaritzburg: Institute for Commercial Forestry Research, 1988, p.68-72.

CAMARGO, C.M.S.; MALINOVSKI, J.R.; ROLOFF, G. A sustentabilidade de um Cambissolo após a colheita de Pinus no sistema fuste. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMA DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 11, 2000. *Anais...* Curitiba: UFPR, 2000, vol. único, p.274-290.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1973. 215 p.

CARPENTER, T.G.; FAUSEY, N.R.; REEDER, R.C. Theoretical effect of wheel loads on subsoil stresses. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 6, n. 2, 1985, p. 179-192.

CATERPILLAR. Excavadora Caterpillar 320B. Moline: Caterpillar Co., 1997. 27 p.

CATERPILLAR. Partners in forestry: a guide to productivity. Moline: Caterpillar Co., 2001. 36 p.

CHANG, J.H. (Author). Soil temperature. In: *Climate and agriculture – an ecological survey*. Chicago: Aldine Publishing, 1968, p.87-99.

COHRON, G.T. Soil sheargraph. Saint Joseph: *Agricultural Engineering*, v. 44, n. 10, 1963, p.554-556.

COSTA, L.M. Manejo de solos em áreas reflorestadas. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Editores) *Relação solo-eucalipto*. Viçosa: UFV, 1990, p.237-264.

- COSTA, A.O.L.; GODOY, H. Contribuição para o conhecimento do clima do solo de Ribeirão Preto. Campinas: *Bragantia*, v. 21, 1962, p.689-742.
- COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; BRUNELLI JR., H.C.; ALBERTON, O.C.; SILVA, M. Conservação do solo. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE A CULTURA DE SOJA, 1984, Ponta Porã. Viçosa: UFV, 1984, p.111-112.
- COSTA NUNES, A.J. Propriedades dos solos e sua determinação. In: CURSO DE MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES. Rio de Janeiro: Globo, 1956, p.17-85.
- COSTANTINI, A.; DOLEY, D. Management of compaction during harvest of *Pinus* plantations in Queensland: III- preliminary investigation of the potential for selected soil parameters to predict rut compaction. Yarralumla: *Australian Forestry*, v. 64, n. 3, 2001, p.193–198.
- CRUZ, P.T.; BEZERRA, D.M. Alguns dados sobre a experiência brasileira na compactação de solos. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 7, 1971. **Anais ...** Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1971. 22 p. (Publicação IPR, 30).
- DALLA ROSA, A. *Práticas mecânicas e culturais na recuperação das características físicas de solos degradados pelo cultivo – solo Santo Ângelo (Latosolo Roxo distrófico)*. Porto Alegre, 1981. 136 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DIAS JUNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos na região de Lavras (MG). Lavras: *Ciência e Agrotecnologia*, v. 24, n. 2, 2000. p.337-346.
- DNER (Autor). Aterros. In: *Especificações gerais para obras rodoviárias*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1971b, p.1-5. (Especificação DNER-EST 05/70).

- DNER (Autor). Base de solo-cimento. In: *Especificações gerais para obras rodoviárias*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1971a, p.1-9. (Especificação DNER-ES-P 12/71).
- DURATEX. Manual de operação: Harvester Cat 320. Agudos: Duratex Florestal, 2000. 41 p.
- DURATEX. Manual de operação: Forwarder A-25C Volvo 6x6. Agudos: Duratex Florestal, 2001. 57 p.
- EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 3, n. 3, 1983, p.261-275.
- EKWUE, E.I.; STONE, R.J. Organic matter on the strength properties on compacted agricultural soils. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 38, n. 2, 1995. p.357-365.
- EKWUE, E.I.; STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 40, n. 2, 1997. p.317-323.
- ELLIES, A.; MAC DONALD, R.; RAMIREZ, C. Efecto de las propiedades mecánicas sobre suelos rojo-arcillosos del centro-sur del Chile. San José: *Turrialba*, v. 41, n. 4, 1991, p.493-499.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise do solo. 2ª Edição. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.
- FENNER, P.T. *Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita de madeira*. Botucatu, 1999, 135 p. Tese (Livre-Docência). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

- FENNER, P.T. Inventário de material combustível florestal. Notas de aula. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, 2001. 14 p.
- FENNER, P.T. Compactação do solo. In: MACHADO, C.C. (Editor), *Colheita florestal*. Viçosa: UFV, 2002, p.375-396.
- FERNANDES, H.C. *Máquinas de exploração florestal: compactação das trilhas e dias potencialmente úteis para o trabalho*. Botucatu, 1996. 145 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agronômicas.
- FERNANDES, H.C.; LEITE, A.M.P. Proposta de uma metodologia para ensaio de máquinas colhedoras de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5, 2001. Viçosa: SIF, 2001. **Anais...** UFV. p.227-239.
- FERREIRA, P.V. Estatística experimental aplicada à agronomia. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 1996. 604 p.
- FIEDLER, N.C.; SILVA, G.F.; PINHO, G.S.C.; KUTSCHENSKI JR., F.E.; VENTUROLI, F. A exploração florestal de florestas naturais e seus aspectos legais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5, 2001. **Anais...** Viçosa: SIF, 2001. p.302-308.
- FIGUEIREDO, L.H.A. Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo. Lavras, 1998. 68 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras.
- FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. Viçosa: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 3, 2000, p.487-493.

FIGUEIREDO, P.R.A. O uso de um aparelho de cisalhamento do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2, 1996. **Anais...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. 1 CD-ROM.

GEIST, J.M.; HAZARD, J.W.; SEIDEL, K.W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. Madison: *Soil Science Society of American Journal*, v. 53, 1989, p.946-950.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. Glen Osmond: *Australian Journal of Soil Research*, v. 18, n. 2, 1980, p.163-189.

GRISSE, R.D.; TAYLOR, R.K.; WAY, T.R.; BASHFORD, L.L. Tractive performance of 18.4R46 e 18.4R42 radial tractor tires. In: ASAE INTERNATIONAL WINTER MEETING. Chicago: ASAE, 1991. **Proceedings...** ASAE. 15 p.(Paper n. 91-1589).

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. In: STEWART, B.A. (Ed.), *Advances in soil science*. Volume 6. New York: Springer-Verlag, 1987, p.65-98.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 11, n. 3-4, 1988, p.239-282.

HEINRICH, R. State of the art in timber harvesting at the international level. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, 1993. **Anais...** Curitiba: SBS, 1993. p.323-328.

HERBAUTS, J.; BAYARD, J.E.; GRUBER, W. Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. New York: *Forest Ecology and Management*, v. 87, n. 1-3, 1996, p.193-207.

- HORVAT, D. An exponential correlation model for penetration characteristics of soil and wheel slip curve. In: INTERACTIVE WORKSHOP AND SEMINAR FORSITRISK: SOIL, TREE, MACHINE INTERACTIONS. Feldafing: IUFRO, 1994. 8 p.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Mapa geológico do Estado de São Paulo, na escala 1:500.000. São Paulo: IPT, vol. 1, 1981, 126 p.
- JAKOBSEN, B.F.; GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 5, n. 1, 1985, p.55-71.
- JAKOBSEN, B.F.; MOORE, G.A. Effects of two types of skidders and of a slash cover on soil compaction by logging of mountain ash. Melbourne: *Australian Journal of Forest Research*, 1981, v. 33, p.247-255.
- JANZEN, D.C. An industry response to compaction concerns in agriculture. In: ASAE INTERNATIONAL SUMMER MEETING. Columbus: ASAE, 1990. 14 p. (Paper n. 90-1074).
- JOHNSON, C.E.; GRISSO, R.D.; NICHOLS, T.A.; BAILEY, A.C. Shear measurement for agricultural soils: a review. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 30, n. 46, 1987. p.935-938.
- JOHNSON, J.F.; VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. Madison: *Agronomy Journal*, v. 82, 1990. p.973-979.
- KEILEN, K. Estudos da alteração do solo pelo trânsito intensivo. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7, 1992. **Anais ...** Curitiba: UFPR, 1992. p.217-220.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.

- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part I. Madison: American Society of Agronomy, 1965, p.210-221.
- KOEHLER, J.H.; SOARES, R.V.; BATISTA, A.C.; SANQUETTA, C.R. Quantificação de resíduos de exploração em povoamentos de *Pinus taeda* Lineu através do método de interseção. In: PESQUISA FLORESTAL ON LINE, 2000. **Anais ...** Curitiba: UFPR, 2000. p.98.
- KOGER, J.L.; BURT, E.C.; TROUSE JR., A.C. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 28, n. 2, 1985. p.11-16.
- KOHNKE, H. Soil physics. New York: McGraw-Hill, 1968. 224p.
- KOOLEN, A.J. Soil-machine relations. In: INTERACTIVE WORKSHOP AND SEMINAR FORSITRISK: SOIL, TREE, MACHINE INTERACTIONS. Feldafing: IUFRO, 1994. 11p.
- KRAMER, P.J. Plant and soil water relationships: a modern synthesis. New York: McGraw-Hill, 1969. 482p.
- LIMA, A.S.; SANT'ANNA, C.M. Estimativa do custo operacional da colheita de Eucalyptus sp. em sistema de árvore inteira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5, 2001. **Anais...** Viçosa: SIF, 2001, UFV. p.309-322.
- LIMA, J.S.S. *Avaliação da força de arraste, compactação do solo e fatores ergonômicos num sistema de colheita de madeira utilizando os tratores "feller-buncher" e "skidder"*. Viçosa, 1998. 132 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa.

- LIMA, J.S.S.; SOUZA, A.P.; MACHADO, C.C.; OLIVEIRA, P.C.; MARTINS FILHO, S. Estudo do comportamento da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego na colheita de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5, 2001. **Anais...** Viçosa: SIF, 2001. p.281-289.
- LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. (Eds.), *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994, p. 265-286.
- LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B.; RANDALL, G.W. Long term tillage effects on interrow runoff and infiltration. Madison: *Soil Science Society of American Journal*, v. 45, 1981, p.945-948.
- LIRA FILHO, J.A. *Impactos ambientais da exploração de madeira numa área de floresta plantada em região acidentada, Vale do Rio Doce, MG*. Viçosa, 1994. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa.
- LOBO, A.S.; FERREIRA, C.V.; ALBIERO, J.H. Problemas de fundações em solo colapsível: estudo de casos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3, 1997. **Anais ...** Rio de Janeiro, 1997, p.77-89.
- LOUW, J.H. A site-growth study of *Eucalyptus grandis* in the Mpumalanga escarpment area. Pretoria: *Southern African Forestry Journal*, n. 180, 1997, p.1-14.
- LUTZ, H.J.; CHANDLER JR., R.F. *Forest soils*. 9th Edition. New York: John Wiley and Sons, 1961. 514 p.
- MAINIERI, C.; PEREIRA, J.A. Madeiras do Brasil: sua caracterização macroscópica, usos comuns e índices qualitativos físicos e mecânicos. São Paulo: IPT, 1965. 282 p.

- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. Belo Horizonte: *Informe Agropecuário*, v. 13, n. 147, 1987, p.52-55.
- MARCONI. Agitador de peneiras com batidas intermitentes modelo MA-750. Instruções para uso. Piracicaba: Marconi Equipamentos para Laboratórios, s.d. 3p.
- MARTINS, D. Classificação climática de Botucatu – SP. Botucatu: UNESP, 2001. 1p.
- MARTINS, S.S. *Efeitos da exploração madeireira no solo, na florística e na estrutura de uma floresta estacional semidecidual no sudeste do Paraná*. Viçosa, 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa.
- MARTINS, S.S.; COUTO, L.; TORMENA, C.A.; MACHADO, C.C. Impactos da exploração madeireira em florestas nativas sobre alguns atributos físicos do solo. Viçosa: *Revista Árvore*, v. 22, n. 1, 1998, p.69-76.
- MATOS, A.T. Manejo e conservação do solo. Campos: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1997. 41p. (Apostila didática).
- MATTHIES, D. Investigations on soil structural changes caused by a wide variety of forest management systems. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH MEETING, 20, 1995, Tampere. **Abstracts...** Corvallis: Oregon State University, 1995, vol. unique, p.261.
- MC DONALD, T.P.; SEIXAS, F. Effect of slash on forwarder soil compaction. Fredericton: *Journal of Forest Engineering*, v. 8, n. 2, 1997, p.15-26.
- MC KEE JR., W.R.; HASELTON, R.D. Impact of soil compaction on the long term productivity of Piedmont and Atlantic coastal plain forest soils. Asheville: USDA, Forest Service, South Carolina National Forest. s.d. 26p.

MC KYES, E. Soil cutting and tillage. Amsterdam: Elsevier, 1985. 217 p.

MC NABB, D.H.; STARTSEV, A. Changes in soil physical properties resulting from mechanized forest harvesting. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH MEETING, 20, 1995, Tampere. **Abstracts...** Corvallis: Oregon State University, 1995, vol. unique, p.257.

MELLO, V.F.B.; TEIXEIRA, A.H. (Autores). Resistência ao cisalhamento das areias. In: *Mecânica dos solos*. Volume 1. São Paulo: USP, Escola de Engenharia de São Carlos, s.d., p.151-193.

MIALHE, L.G. Rodado e sistema de direção. In: MIALHE, L.G. (Autor), *Máquinas motoras na agricultura*. Volume 2. São Paulo: EDUSP, 1980, p.140-222.

MIALHE, L.G. O estado da arte e perspectivas de utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: ENCONTRO SOBRE PNEUS DE ALTA FLUTUAÇÃO E BAIXA PRESSÃO NAS ÁREAS AGRÍCOLA E FLORESTAL, 1993. Piracicaba: USP, 1993. 17 p.

MICHELIN. Pneus Michelin 750/65 R25 para forwarder Volvo A-25C. Resende: Grupo Michelin, 2002, 2 p.

MINETTI, L.J.; SOUZA, A.P.; FIEDLER, N.C. Carregamento e descarregamento. In: MACHADO, C.C. (Editor), *Colheita florestal*. Viçosa: UFV, 2002, p.129-144.

MIRANDA, N.O. *Alterações físicas nos solos Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Escuro submetidos a diferentes condições de preparo reduzido*. Santa Maria, 1986. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria.

- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultisol. Madison: *Soil Science of American Journal*, v. 51, 1987, p.183-186.
- NOVAK, L.R. *Efeito do tráfego do trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico em dois níveis de umidade*. Viçosa, 1989. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.
- OLIVEIRA JR., E.D. *Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a diferentes pressões*. Piracicaba, 1998. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G.; PAULA, M.B. Compactação do solo devida à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. Belo Horizonte: *Informe Agropecuário*, v. 19, n. 191, 1998, p.46-48.
- ONOFIOK, O.E. Spatial and temporal variability of some soil physical properties following tillage of a Nigerian Paleustult. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 12, n. 3, 1988, p.285-298.
- OWEN, G.T. Soil disturbance associated with deep subsoiling in compacted soils. Fredericton: *Canadian Agricultural Engineering*, v. 30, 1988, p.33-37.
- PACHECO, A.A.R.C.; DIAS JUNIOR, M.S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos de adobe. Lavras: *Ciência Prática*, v. 14, 1990, p.176-190.
- PEREIRA, J.O. *Efeito do tamanho de agregados, do teor de água e da intensidade de carga aplicada na compactação e resistência de uma terra roxa estruturada*. Botucatu, 1996. 111 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agronômicas.

- PEREIRA, J.O.; BENEZ, S.H.; SILVA, S.L.; RICIERI, R.P. Efeito do teor de água e da pressão aplicada na compactação do solo. Jaboticabal: *Engenharia Agrícola*, v. 22, n. 2, 2002, p.220-228.
- PESSOTTI, J.E.S. Levantamento semidetalhado dos solos da Fazenda Morro do Ouro (escala 1:10.000). Mapa. Botucatu: Duratex Florestal S.A., s.d. 1 p.
- PETELKAU, H.; DANNOWSKI, M.. Effect of repeated vehicle traffic in traffic lanes on soil physical properties, nutrient uptake and yield of oats. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 15, n. 3, 1990, p.217-225.
- PINTO, S.; PREUSLER, E.S. (Editores). Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2002. 259 p.
- PITTA, M.R.; CARVALHO, M.D. Um processo simplificado para o cálculo da espessura de pavimentos de concreto simples submetidos a cargas uniformemente distribuídas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 1978. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1978. 20 p.
- PREVEDELLO, C.L. Física do solo: com problemas resolvidos. Curitiba: Rural, 1996. 446 p.
- PRITCHETT, W.L.; FISHER, R.F. Properties and management of forest soils. New York: Wiley and Sons, 1987. 493 p.
- QUEIROZ, C.A.V. Efeito dos veículos pesados sobre os pavimentos rodoviários. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA, 4, 1979. São Paulo: Instituto de Engenharia, 1979.
- RAGHAVAN, G.S.V.; MC KYES, E.; STEMSHORN, E.; GRAY, A.; BEALIEU, B. Vehicle compaction patterns in clay soils. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 20, n. 2, 1977. p.218-220, 225.

- RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 54, n. 3-4, 2000, p.145-153.
- RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise do solo para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 31 p.
- REAVES, C.A.; COOPER, A.W. Stress distribution in soils under tractor loads. Saint Joseph: *Agricultural Engineering*, v. 41, 1960, p.20-21, 31.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. London: *Plant and Soil*, v. 58, 1981, p.327-338.
- ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). Viçosa: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, n. 2, 2002. p.297-303.
- RODAS, R.V. Métodos basados en pruebas directas de carga sobre el terreno. In: *Carreteras, calles y aeropistas: principios generales de la mecánica de suelos aplicados a pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles*. Caracas: El Ateneu, 1967, p.238-281.
- ROSA JR., E.J. *Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos no município de Ponta Porã, M.S.* Viçosa, 1984. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa.
- ROTH, C.H.; MEYER, B. Infiltrabilidade de um Latossolo Roxo distrófico durante o período vegetativo da soja sob preparo convencional, escarificação e plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 19, 1983. **Resumos...** Curitiba: SBCS, 1983, p.101-102.

ROTH, C.H.; MEYER, B.; FREDE, H.G.; DERPSCH, R. Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an Oxisol in Parana, Brazil. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 11, n. 1, 1988, p.81-91.

SALMONI, R. (Autor). Modalidades da passagem de calor entre corpos. In: *Transmissão do calor*. São Paulo: Mestre Jou, 1966, p. 9-11.

SANTOS FILHO, A.G. *Caracterização física do solo para avaliação do desempenho de rodados pneumáticos de tratores agrícolas*. Botucatu, 1998. 149 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista.

SANTOS FILHO, A.; REISSMANN, C.B. Soil properties causing root deformations in a *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* at the Canguiri Experimental Farm. In: SIMPÓSIO BILATERAL BRASIL-FINLÂNDIA SOBRE ATUALIDADES FLORESTAIS, 1988. *Anais...* Curitiba: UFPR, 1988, vol. único, p.118-124.

SAUDER, E.A.; KRAG, R.K.; WELLBURN, G.V. Logging and mass wasting in the Pacific Northwest with application to the Queen Charlotte Islands, B.C.: a literature review. Vancouver: Forest Engineering Research Institute of Canada, 1987. 26 p. (Special Report, SR-45).

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Mão de obra empregada na atividade florestal em 2001. São Paulo: SBS, 2002. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/segmento_celulose.htm>. Acesso em 26 maio 2003.

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Área plantada com Pinus e Eucalyptus no Brasil (ha) em 2000. São Paulo: SBS, 2001a. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/area_plantada.htm>. Acesso em 26 maio 2003.

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Consumo de madeira industrial em toras – Brasil/2000. São Paulo: SBS, 2001b. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/consumo_madeira.htm>. Acesso em 26 maio 2003.

SCHALLER, F.W.; STOCKINGER, K.R. A comparison of five methods for expressing aggregation data. Madison: Soil Science Society of America Procedures, v. 17, 1953, p.310-313.

SCHJONNING, P.; THOMSEN, I.K.; MOBERG, J.P.; JONGE, H.; KRISTENSEN, K.; CHRISTENSEN, B.T. Turnover of organic matter in differently textured soils: 1. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. Amsterdam: *Geoderma*, v. 89, 1999, p.177-198.

SCOPEL, I.; ROCHA, H.O.; MALINOVSKI, J.R.; KOBAYAMA, M. Riscos de compactação do solo na produção florestal. In: SEMINARIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7, 1992. *Anais ...* Curitiba: UFPR, 1992. p.172-193.

SECCO, D.; DA ROS, C.O.; FIORIN, J.E.; PAUTZ, C.V.; PASA, L. Efeitos de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. Santa Maria: *Ciência Rural*, v. 27, 1997, p.57-60.

SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C.C. (Editor), *Colheita florestal*. Viçosa: UFV, 2002, p.89-128.

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

- SENÇO, W. (Autor). Dimensionamento. In: *Pavimentação*. São Paulo: USP, Grêmio Politécnico, 1979, p.85-164.
- SEVER, S. Productivity and performance of forwarders in hauling operations. In: SIMPÓSIO SOBRE EXPLORAÇÃO, TRANSPORTE, ERGONOMIA E SEGURANÇA EM REFLORESTAMENTOS, 1, 1987. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1987. p.163-186.
- SHEPTUKHOV, V.N.; VORONIN, A.I.; SHIPILOV, V.V. Bulk density of the soil and its productivity. Silver Spring: *Soviet Soil Science*, v. 14, n. 5, 1982, p.97-107.
- SILVA, J.R. *Comparação entre sistemas de preparo do solo para implantação de floresta industrial*. Santa Maria, 1994. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria.
- SILVA, J.R.; JORGE, J.A. Compactação do solo devida à exploração e ao transporte florestal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2, 1996. **Anais...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. 1 CD-ROM.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. Campinas: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 10, 1986. p.91-95.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. Santa Maria: *Ciência Rural*, v. 30, n. 5, 2000b, p.795-801.
- SILVA, J.R.; OLIVEIRA, R.F.; SEBASTIANI, C.E.G.; LUNARDI, A.L. Compactação do solo devida ao tráfego florestal e obra de engenharia. Jaboticabal: *Engenharia Agrícola*, v. 20, n. 3, 2000a, p.243-249.

SILVA, I.F.; KLANT, E.; SCHNEIDER, P.; SCOPEL, I. Efeitos de sistemas de manejo e tempo de cultivo sobre propriedades físicas de um Latossolo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3, 1981. **Anais...** Recife: UFPE, 1981. p.322-342.

SILVERSIDES, C.R.; SUNDBERG, U. Operational efficiency in forestry. Vol. 2. Practive: Kluwer Academic Publishers, 1989. 169p.

SOEHNE, W.H. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. East Leasing: *Agricultural Engineering*, v. 39, n. 5, 1958, p.276-281, 290.

SOEHNE, W.H. Stress transmission between tractor tires and arable soils. *Grundlagen der Landtechnik*, v. 3, 1952, p.75-87.

SOUZA, M.D. *Infiltração de água em Latossolo Roxo distrófico submetido a diferentes manejos*. Porto Alegre, 1985. 133 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STAFFORD, J.V.; TANNER, D.W. Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction: I-shear strength. Amsterdam: *Soil & Tillage Research*, v. 3, n. 3, 1983, p.245-260.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 6, 1993. p.1713-1719.

SUZANO. Autocarregáveis: instruções para uso. Suzano: Companhia Suzano de Papel e Celulose, s.d. 30 p.

TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. New York: *Soil Science*, v. 102, 1966, p.18-22.

- TESTO. Minitermómetro de immersion / penetración: manual de instrucciones. s.d. 1 p.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: EMBRAPA, CNPSo, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23).
- TRABBIC, G.W.; LASK, K.V.; BUCHELLE, W.F. Measurement of soil-tyre interface pressures. Saint Joseph: *Agricultural Engineering*, v. 40, n. 11, 1959, p.678-681.
- TRELLEBORG. Trelleborg twin: low-pressure tyres. Trelleborg: Trelleborg Industri AB, Tyre Division. (s.d.). 16 p.
- UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Propriedades físicas do solo. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Porto Alegre: UFRGS, 1978. 119 p. (Apostila didática).
- USDA. **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd Edition. Washington: USDA, 1999. 1 CD-ROM.
- VANDEN BERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 5, n. 2, 1962. p.105-107.
- VARGAS, M. (Autor). Os solos do ponto de vista da engenharia. In: *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1981, p.3-46.
- VIDAL, E.; VIANA, V.M.; BATISTA, J.L.F. Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo florestal na Amazônia Oriental. Piracicaba: *Scientia Forestalis*, n. 61, 2002, p.133-143.
- VIEIRA, L.S. Manual da ciência do solo: com ênfase aos solos tropicais. São Paulo: Ceres, 1988. 464 p.

- VOLVO. Caminhão articulado Volvo A-25C: especificações. Campinas: Volvo Equipamentos Construções Ltda, s.d. 6 p.
- VOLVO. Performance manual: articulated haulers. 6th Edition. Gothenburg: Volvo Constructions Equipment. 1997. 841 p.
- VOMOCIL, J.A. Porosity. In: BLACK, C.A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part I. Madison: American Society of Agronomy, 1965, p.299-314.
- WAGNER, L.E.; AMBE, N.M.; DING, D. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. Saint Joseph: *Transactions of the ASAE*, v. 37, n. 4, 1994. p.1121-1125.
- WRONSKI, E.B. Impact of tractor thinning operations on soils and tree roots in a Karri Forest, Western Australia. Melbourne: *Australian Forestry Research*, v. 14, 1984, p.319-332.
- YANG, X.M.; WANDER, M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. Charlottetown: *Soil & Tillage Research*, v. 49, n. 1-2, 1998, p.173-183.
- YAVUZCAN, H.G. Wheel traffic impact in soil conditions as influenced by tillage system in Central Anatolia. Charlottetown: *Soil & Tillage Research*, v. 54, n. 3-4, 2000, p.129-138.
- YODER, E.J. (Author). Stresses in flexible pavements. In: *Principles of pavement design*. New York: John Wiley and Sons, 1959a, p.20-51.
- YODER, E.J. (Author). Pavement types and wheel loads. In: *Principles of pavement design*. New York: John Wiley and Sons, 1959b, p.3-19.

ZINN, Y.L. *Caracterização de propriedades físicas, químicas e da matéria orgânica de solos nos cerrados sob plantações de Eucalyptus e Pinus*. Brasília, 1998. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade de Brasília.

ZYCH, G.L. A mecanização na colheita florestal. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, 1993. **Anais...** Curitiba: SBS, 1993, p.350-354.

ANEXO

Quadro 1. Valores médios de parâmetros químicos de fertilidade do solo do talhão florestal pesquisado, Botucatu, SP

Tratamento	pH	Mat.	P	H + Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	Valor V
	CaCl ₂	org. g.dm ⁻³	mg.dm ⁻³	mmol c.dm ⁻³						
Anterior	3,8	26	4	99	0,5	3	1	4,5	103,5	4,4
Corte	3,8	32	4	89	0,5	3	3	6,5	95,5	6,8
Baldeio	4,3	47	16	108	1,6	28	24	53,6	161,6	33,2

Quadro 2. Rotações por minuto utilizadas no aparelho centrifugador, respectivas tensões de retenção de água e limites inferiores de retenção.

Rotação da centrífuga (rpm)	Tensão matricial			Limite
	atmosferas	cm coluna d'água	KPa	
300				
600				
800	-0,06	60	-6	macroporosidade/ microporosidade
1.100				
1.900				
3.300	-1,00	1033	-100	água disponível
5.500				

Fonte: Manual da centrífuga Kokusan Enshinki modelo H-1400 pF.

Quadro 7. Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento trânsito anterior.

tg ϕ	ϕ	ϕ	C (psi)	C (kPa)	Tensão de cisalhamento (kPa)	Teor de água (g.kg ⁻¹)
0,65	33,02	33° 01'	4,56	31,44	$\tau = 0,65 \sigma + 4,56$	179
0,74	36,50	36° 30'	4,30	29,65	$\tau = 0,74 \sigma + 4,30$	179
0,95	43,53	43° 31'	2,73	18,82	$\tau = 0,95 \sigma + 2,73$	179
0,89	41,67	41° 40'	5,33	36,75	$\tau = 0,89 \sigma + 5,33$	160
1,11	47,98	47° 59'	1,96	13,51	$\tau = 1,11 \sigma + 1,96$	160
0,86	40,69	40° 41'	2,76	19,03	$\tau = 0,86 \sigma + 2,76$	160
1,13	48,49	48° 29'	1,90	13,10	$\tau = 1,13 \sigma + 1,90$	170
1,00	45,00	45°	1,30	8,96	$\tau = \sigma + 1,30$	170
1,11	47,98	47° 59'	0,80	5,52	$\tau = 1,11 \sigma + 0,80$	170
1,11	47,98	47° 59'	4,70	32,41	$\tau = 1,11 \sigma + 4,70$	162
0,72	35,75	35° 45'	4,66	32,13	$\tau = 0,72 \sigma + 4,66$	162
0,55	28,81	28° 48'	6,06	41,78	$\tau = 0,55 \sigma + 6,06$	162
0,76	37,23	37° 14'	4,86	33,51	$\tau = 0,76 \sigma + 4,86$	194
1,13	48,49	48° 29'	6,23	42,95	$\tau = 1,13 \sigma + 6,23$	194
1,01	45,28	45° 17'	3,13	21,58	$\tau = 1,01 \sigma + 3,13$	194

Quadro 8. Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento *harvester*.

tg ϕ	ϕ	ϕ	C (psi)	C (kPa)	Tensão de cisalhamento (kPa)	Teor de água (g.kg ⁻¹)
1,07	46,94	46° 56'	3,10	21,37	$\tau=1,07 \sigma + 3,10$	171
1,19	49,96	49° 57'	3,70	25,51	$\tau= 1,19 \sigma + 3,70$	171
1,30	52,43	52° 25'	5,86	40,40	$\tau= 1,30 \sigma + 5,86$	171
1,08	47,20	47° 12'	3,00	20,68	$\tau=1, 08 \sigma + 3,00$	160
0,84	40,03	40° 01'	6,00	41,37	$\tau= 0,84 \sigma + 6,00$	160
0,94	43,23	43° 13'	1,70	11,72	$\tau= 0,94 \sigma + 1,70$	160
0,62	31,80	31° 47'	8,00	55,16	$\tau= 0,62 \sigma + 8,00$	171
1,09	47,46	47° 27'	6,66	45,92	$\tau= 1,09 \sigma + 6,66$	171
1,18	49,72	49° 43'	3,30	22,75	$\tau= 1,18 \sigma + 3,30$	171
0,86	40,69	40° 41'	9,13	62,95	$\tau= 0,86 \sigma + 9,13$	178
0,85	40,36	40° 21'	9,43	65,02	$\tau= 0,85 \sigma + 9,43$	178
0,73	36,13	36° 07'	10,16	70,05	$\tau= 0,73 \sigma + 10,16$	178
0,94	43,23	43° 13'	4,20	28,96	$\tau= 0,94 \sigma + 4,20$	165
1,16	49,24	49° 14'	1,56	10,76	$\tau= 1,16 \sigma + 1,56$	165
0,97	44,13	44° 07'	3,00	20,68	$\tau= 0,97 \sigma + 3,00$	165

Quadro 9. Resultados do ensaio de cisalhamento do solo no tratamento *forwarder*.

tg ϕ	ϕ	ϕ	C (psi)	C (kPa)	Tensão de cisalhamento (kPa)	Teor de água (g.kg ⁻¹)
0,70	34,99	34° 59'	15,40	106,18	$\tau=0,70 \sigma + 15,40$	171
0,41	22,29	22° 17'	19,76	136,24	$\tau= 0,41 \sigma + 19,76$	171
0,47	25,17	25° 10'	17,46	120,38	$\tau= 0,47 \sigma + 17,46$	171
0,83	39,69	39° 41'	9,16	63,16	$\tau= 0,83 \sigma + 9,16$	180
0,98	44,42	44° 25'	6,43	44,33	$\tau= 0,98 \sigma + 6,43$	180
0,96	43,83	43° 49'	9,63	66,40	$\tau= 0,96 \sigma + 9,63$	180
0,52	27,47	27° 28'	16,10	111,00	$\tau= 0,52 \sigma + 16,10$	176
1,02	45,56	45° 34'	10,50	72,39	$\tau= 1,02 \sigma + 10,50$	176
1,51	56,48	56° 29'	2,86	19,72	$\tau= 1,51 \sigma + 2,86$	176
1,46	55,59	55° 35'	4,00	27,58	$\tau= 1,46 \sigma + 4,00$	177
0,66	33,42	33° 25'	9,86	67,98	$\tau= 0,66 \sigma + 9,86$	177
1,10	47,73	47° 43'	10,26	70,74	$\tau= 1,10 \sigma + 10,26$	177
0,84	40,03	40° 01'	8,66	59,71	$\tau= 0,84 \sigma + 8,66$	169
1,01	45,28	45° 17'	8,56	59,02	$\tau= 1,01 \sigma + 8,56$	169
0,79	38,31	38° 18'	9,30	64,12	$\tau= 0,79 \sigma + 9,30$	169

Figura 29. Curvas de compactação do solo no tratamento trânsito anterior

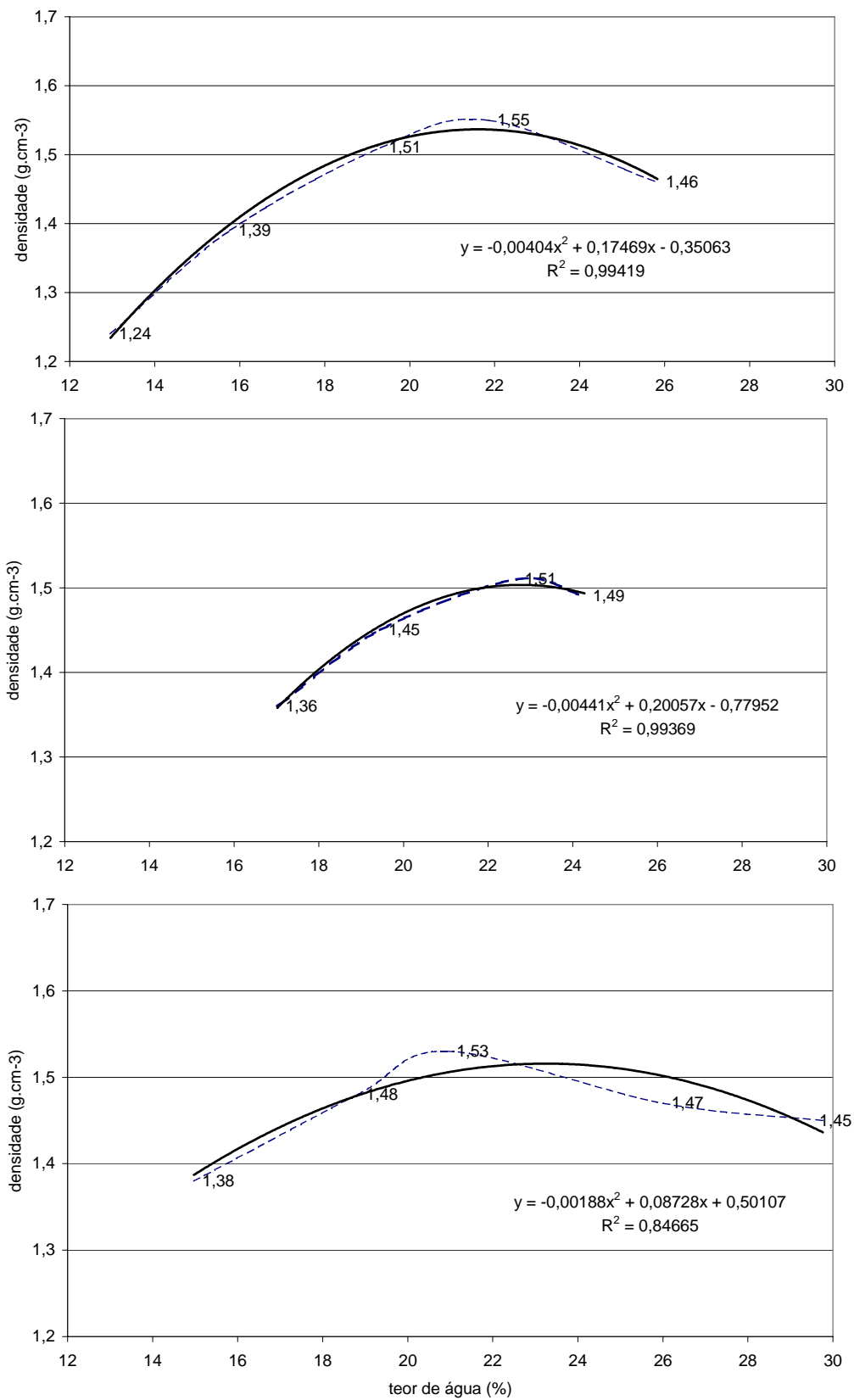


Figura 30. Curvas de compactação no tratamento harvester com galhada

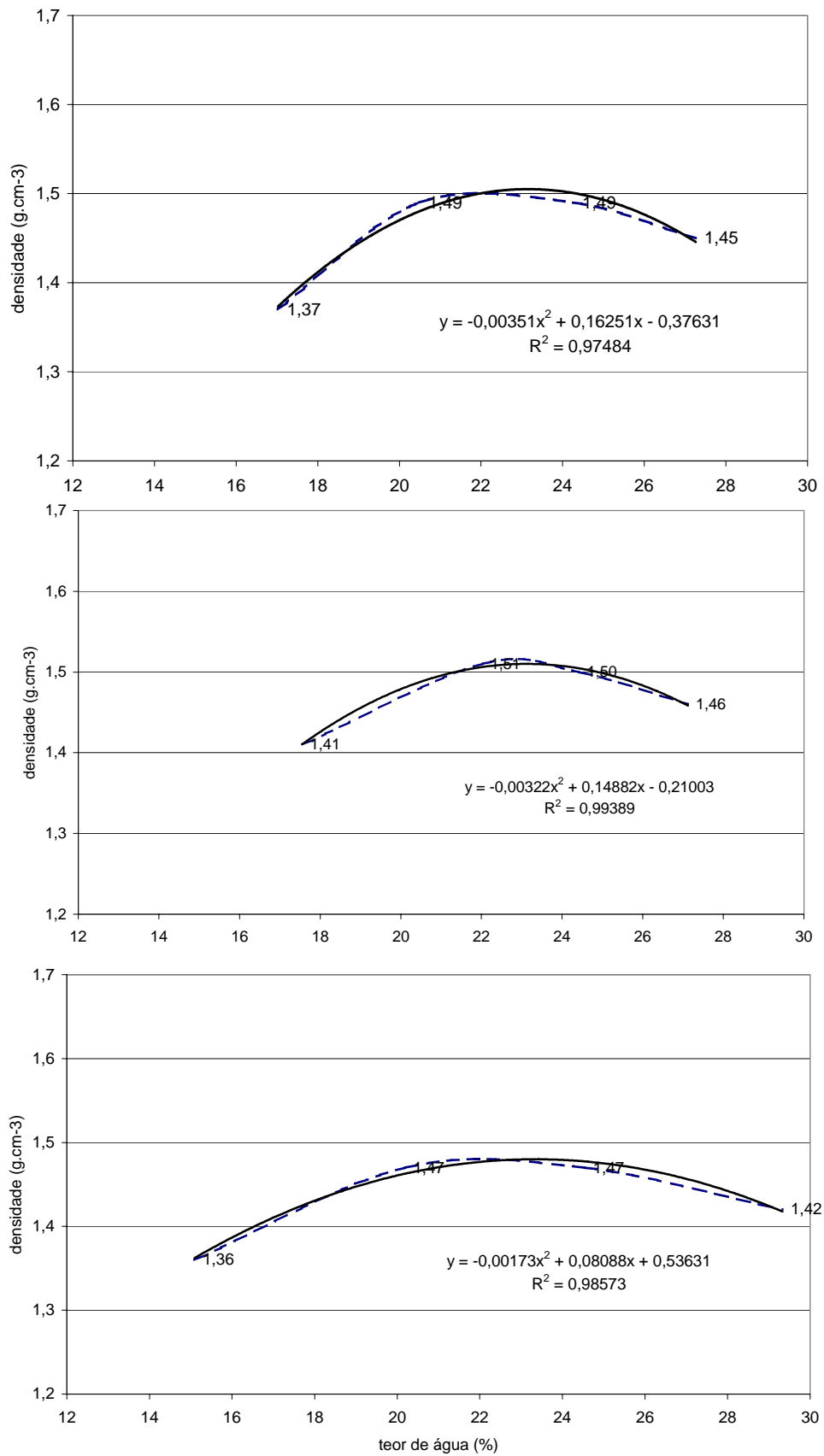


Figura 31. Curvas de compactação do solo no tratamento harvester sem galhada

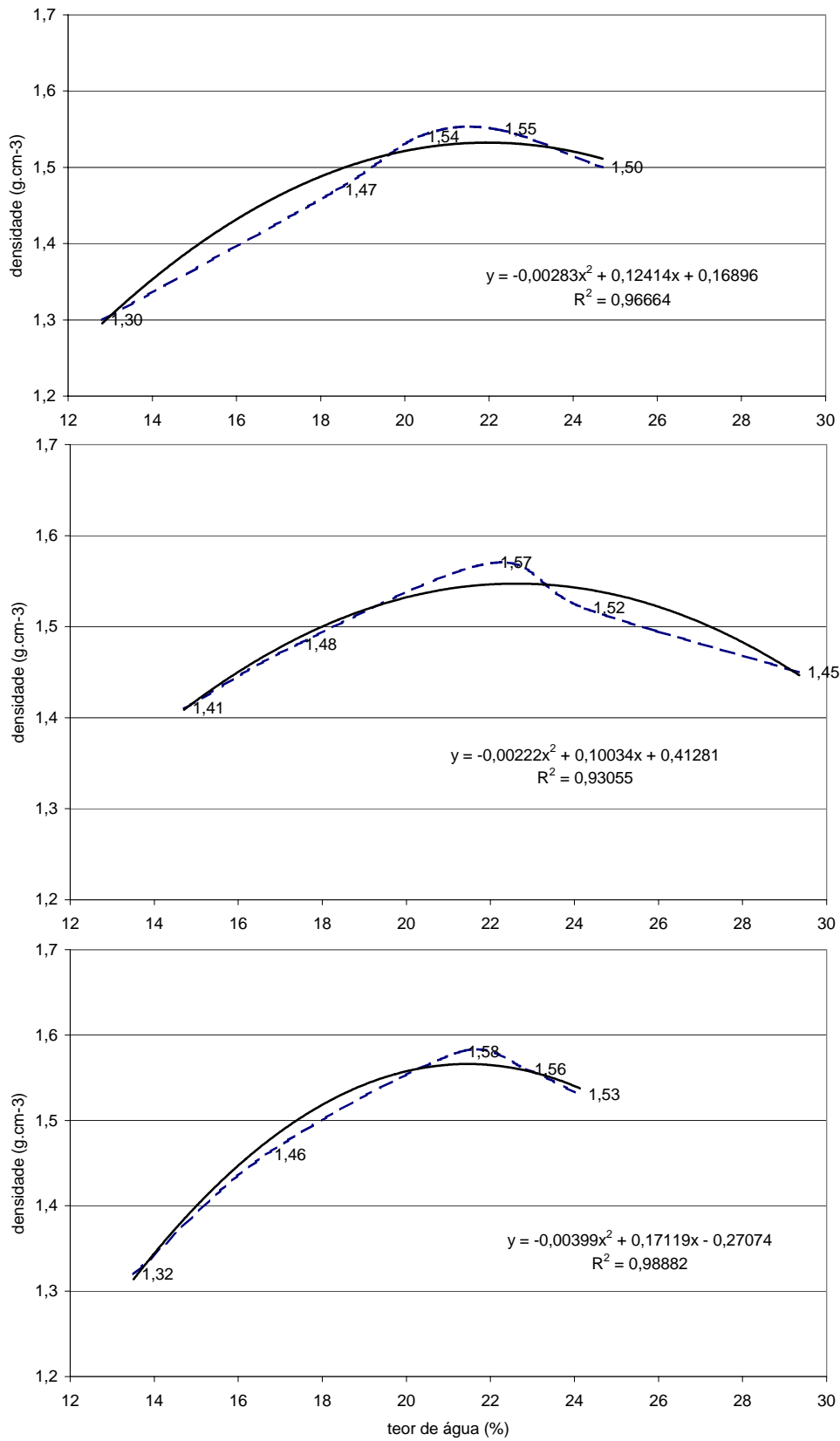


Figura 32. Curvas de compactação do solo no tratamento forwarder com galhada

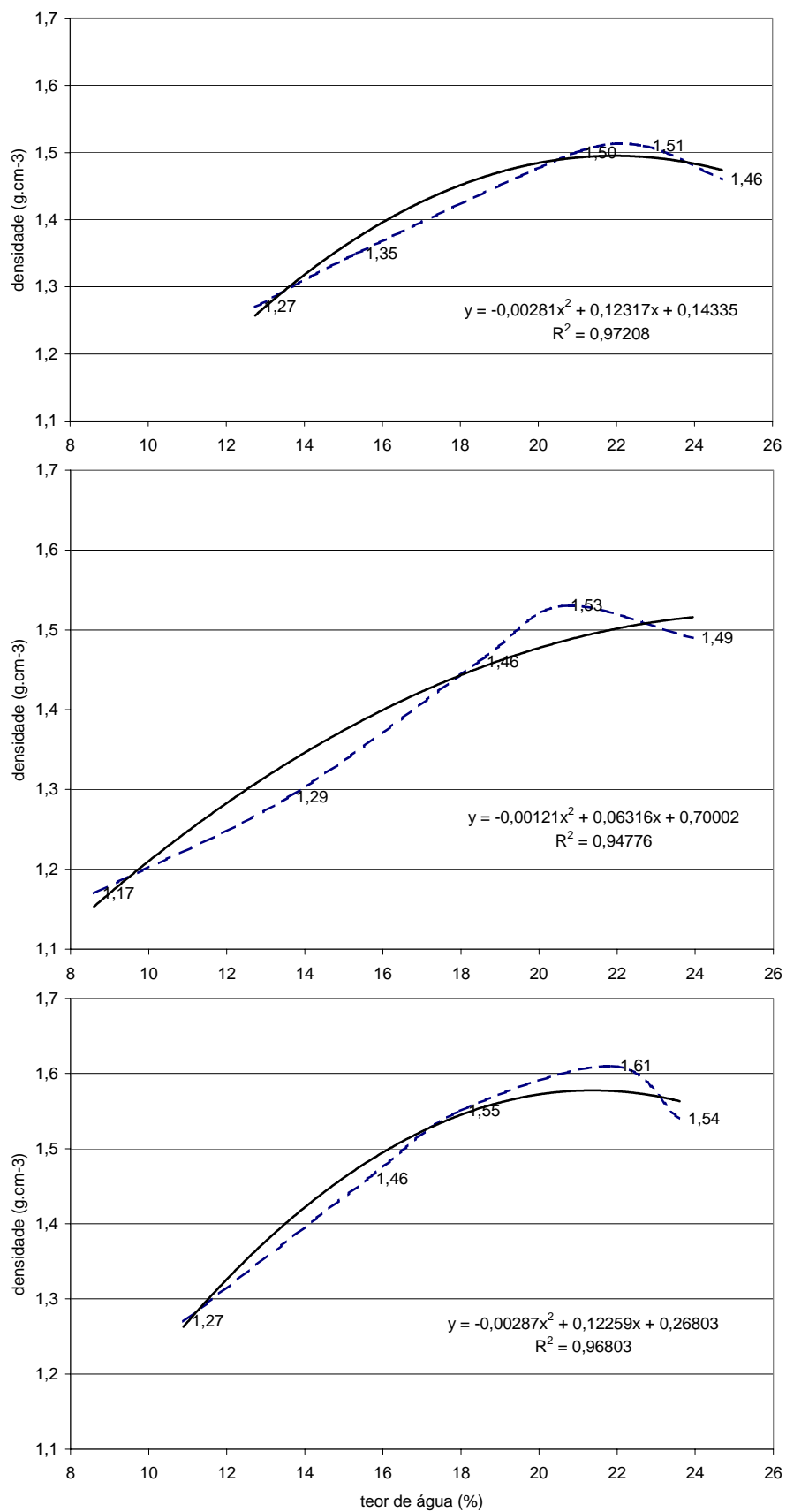


Figura 33. Curvas de compactação do solo no tratamento forwarder sem galhada

