

CARLA MARIA DOS SANTOS CAMARGO

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELA COLHEITA
DE *Pinus taeda*, PELO SISTEMA FUSTE (TREE LENGTH)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração: Silvicultura e Manejo.

CURITIBA

1999



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pela candidata **CARLA MARIA DOS SANTOS CAMARGO**, sob o título “**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELA COLHEITA DE *Pinus taeda*, PELO SISTEMA FUSTE (TREE LENGTH)**”, para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Florestais**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **SILVICULTURA**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido a candidata são de parecer pela “**APROVAÇÃO**” da Dissertação, com média final: (9,7), correspondente ao conceito: (*A*).

Curitiba, 09 de Dezembro de 1999.

Prof. Dr. Arthur Santos Filho
Primeiro Examinador
UFPR

Pesq. PhD. Renato Dedecek
Segundo Examinador
EMBRAPA

Prof. Dr. Jorge Roberto Malinovski
Orientador e Presidente da Banca
UFPR



À **Deus**,

AGRADEÇO

Aos meus pais **Rosalvo** (in memoriam) e **Odete**,

e

ao meu filho **Guilherme**

DEDICO

Aos meus irmãos **Luíz Claudio** e **Fábio**

e

ao amigo **Pedro**,

OFEREÇO

...

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Paraná, pelas oportunidades de qualificação que me ofereceu em especial pela concessão da licença para realização deste curso.

A IGARAS – Papéis e Embalagens S/A, pela cessão da área, apoio logístico e credibilidade que viabilizou a execução do projeto.

Aos Pesquisadores Dr. Djalma Chaves, e aos Engenheiros Elmir Xavier Roesler e Antônio Maurício Moreira, pelos recursos oferecidos, colaboração, sugestões e disposição durante o período de coleta de dados.

Aos funcionários Jurandir Koerich da Costa, Sidnei Firmino da Silva, João Sidnei Ribeiro e João Silva Ferreira, pela presteza nas amostragens de campo, sempre com boa vontade e bom humor.

Ao Professor Dr. Jorge Roberto Malinovski, pela orientação, amizade, confiança, ensinamentos e oportunidades oferecida neste período.

Ao Professor PhD Glaucio Roloff, pela co-orientação e estimável contribuição prestada na realização deste trabalho e pelos novos conhecimentos adquiridos.

As Professoras Dra. Beatriz Monte Serrat Prevedello e Dra. Celina Wisniewski, pela compreensão e auxílio no processo de liberação.

Ao Professor Dr. Arthur Santos Filho, pela assistência na classificação dos perfis de solos do projeto e em especial pela amizade, respeito e dedicação profissional.

Ao Professor Dr. Emerson Carneiro Camargo, pela colaboração na identificação do material geológico da área trabalhada.

Ao Professor Vander de Freitas Melo, pela especial atenção na identificação do mineral de argila através da análise mineralógica.

Ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Paraná, por ceder o Laboratório de Física do Solo, para a realização das análises previstas neste trabalho.

Aos colegas de laboratório Valdina Celestino da Rocha, Maria Aparecida dos Santos Carvalho, Sérgio dos Anjos, Reginaldo Bodziak e Rui Barbosa que direta ou indiretamente colaboraram na determinação das análises de solo.

Ao amigo de pós-graduação Rafael Alexandre Malinovski, pela contribuição no processo de apresentação do projeto junto a IGARAS, e pela amizade sincera.

Aos demais amigos de pós-graduação Silma Regina Carmelo, Sandra Regina Cavichiollo, Cristina Barcik, Margit Hauer, Ruth Maria de Quadros Bianchini e Klaus D. Sauter pela amizade, convívio e colaboração na realização deste trabalho.

Ao amigo Adonai Cintra, pela amizade e assistência técnica.

A bibliotecária Liliana Pizzolato, pelo apoio, orientação e correção na conclusão deste trabalho.

2.2.3 - COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	14
2.2.3.1 - Densidade do solo.....	21
2.2.3.1.1 - Métodos utilizados para determinação da densidade do solo.....	24
2.2.3.2 - Porosidade do solo.....	25
2.2.3.3 - Resistência mecânica.....	28
2.2.4 - POROSIDADE DO SOLO.....	33
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA.....	36
3.2 - TIPO DE COBERTURA DO SOLO.....	37
3.3 - SISTEMA DE COLHEITA ADOTADO.....	37
3.4 - DIPOSIÇÃO DO ENSAIO EM CAMPO.....	38
3.4.1 - SITUAÇÃO SIMULADA DE TRÁFEGO E UMIDADE.....	39
3.4.2 - ÁREA DE TRABALHO EFETIVO OU GRADE DESGALHADORA.....	41
3.5 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	44
3.6 - METODOLOGIA.....	44
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1 - SITUAÇÃO SIMULADA DE TRÁFEGO E UMIDADE.....	48
4.1.1 - RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO (MPa), EM ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	52
4.1.2 - DENSIDADE DO SOLO (ρ_{ss}), NA ÁREA DE SIMULAÇÃO	61
4.1.3 - POROSIDADE TOTAL DO SOLO (α), NA ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	67

4.1.4 - POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO (α_{ar}), NA ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	71
4.2 - ÁREA DE EFETIVO TRABALHO OU ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	76
4.2.1 - RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	77
4.2.2 - DENSIDADE DO SOLO (ρ_{ss}), NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	80
4.2.3 - POROSIDADE TOTAL DO SOLO (α) NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	82
4.2.4 - POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO (α_{ar}), NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	84
5 - CONCLUSÃO.....	87
6 - RECOMENDAÇÕES.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	102

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS POR LINHA DE CORTE DE ÁRVORES DENTRO DO TALHÃO, NA ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	40
FIGURA 2 – GRADE INSTALADA PARA OPERAÇÃO DE DESGALHAMENTO.....	42
FIGURA 3 – CONCENTRAÇÃO DE GALHOS E ACÍCULAS NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	42
FIGURA 4 – DISPOSIÇÃO DO ENSAIO E PONTOS DE AMOSTRAGEM, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	43
FIGURA 5 – REDE DE PONTOS DE AMOSTRAGEM PARA MENSURAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA NAS POSIÇÕES AVALIADAS NA ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	45
FIGURA 6 – PROFUNDIDADE DE COLETA DE SOLO, PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE TOTAL E POROSIDADE DE AERAÇÃO NA ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	46
FIGURA 7 – REGRESSÃO LINEAR DA UMIDADE NO MOMENTO DA AMOSTRAGEM DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO.....	52

FIGURA 8 – COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE, AVALIAÇÃO DA ÁREA COMPACTADA ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	56
FIGURA 9 – PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DAS ÁREAS COMPACTADAS POR QUATRO NÍVEIS DE TRÁFEGO EM CONDIÇÃO NATURAL DE UMIDADE.....	57
FIGURA 10 – COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM CHUVA DE 30 mm, AVALIAÇÃO DA ÁREA COMPACTADA ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	58
FIGURA 11 – PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DAS ÁREAS COMPACTADAS POR QUATRO NÍVEIS DE TRÁFEGO EM CHUVA DE 30 mm.....	59
FIGURA 12 – COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA, AVALIAÇÃO DA ÁREA COMPACTADA ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	59
FIGURA 13 – PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DAS ÁREAS COMPACTADAS POR QUATRO NÍVEIS DE TRÁFEGO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA.....	60
FIGURA 14 – DENSIDADE DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE.....	63

FIGURA 15 – DENSIDADE DO SOLO EM CHUVA DE 30 mm.....	64
FIGURA 16 – DENSIDADE DO SOLO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA.....	66
FIGURA 17 – POROSIDADE TOTAL DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE.....	68
FIGURA 18 – POROSIDADE TOTAL DO SOLO EM CHUVA DE 30mm.....	69
FIGURA 19 – POROSIDADE TOTAL DO SOLO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA.....	70
FIGURA 20 – POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE.....	72
FIGURA 21 – POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO EM CHUVA DE 30 mm.....	73
FIGURA 22 – POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO EM ADIÇÃO DE 60 MM DE ÁGUA.....	74
FIGURA 23 – RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM PROFUNDIDADE, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	78
FIGURA 24 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO POR DISTÂNCIA, NA ÁREA DE GRADE.....	79
FIGURA 25 – DENSIDADE DO SOLO NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	81

FIGURA 26 – POROSIDADE TOTAL DO SOLO NA ÁREA DE GRADE.....	83
FIGURA 27 – POROSIDADE DE AERAÇÃO NA ÁREA DE GRADE.....	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CAPACIDADE DE CAMPO E TEOR DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA DO SOLO NA OCASIÃO DO TRÁFEGO.....	50
TABELA 2 – TESTE DE TUKEY PARA OS TRÊS TRATAMENTOS DE UMIDADE, NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	51
TABELA 3 – ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO, PARA ÁREAS COMPACTADAS NOS VALORES SUPERIORES À 1 MPa.....	54
TABELA 4 – ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO PARA ÁREAS COMPACTADAS NOS VALORES ACIMA DE 2 MPa.....	55
TABELA 5 – NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DE “F” PARA A VARIÁVEL DENSIDADE DO SOLO, NAS TRÊS PROFUNDIDADES AVALIADAS.....	62
TABELA 6 – NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DE “F” PARA A VARIÁVEL POROSIDADE TOTAL DO SOLO, NAS TRÊS PROFUNDIDADES AVALIADAS.....	68
TABELA 7 – NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DE “F” PARA A VARIÁVEL POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO, NAS TRÊS PROFUNDIDADES AVALIADAS.....	72
TABELA 8 – ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO, NA ÁREA DE GRADE.....	77

TABELA 9 – ANOVA DA DENSIDADE DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	81
TABELA 10 – ANOVA DA POROSIDADE TOTAL DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	83
TABELA 11 – ANOVA DA POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA.....	84

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as alterações nas propriedades físicas do solo como: resistência mecânica do solo a penetração, densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração do solo, em um tipo de solo representativo da região de Otacílio Costa / SC, submetido a colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema fuste “tree length”. As determinações foram feitas em duas etapas: uma condição simulada de tráfego e umidade, com variação entre tratamentos de 1 a 16 passadas de máquinas de forma cumulativa e os tratamentos de umidade foram constituídos de condição natural (cerca de 3 dias sem chuva), 30 mm (correspondente a uma chuva de aproximadamente 30 mm) e 60 mm (chuva de aproximadamente 30 mm com adição de 30 mm água através de carro pipa, sob o solo úmido). A outra etapa que corresponde a área de trabalho efetivo ou de grade desganhadora, a qual representa o ponto crítico para as propriedades físicas do solo no sistema de colheita adotado. A umidade do solo apresentou forte correlação com o processo de compactação e a predisposição do solo foi maior em condições de menor umidade, em todas as propriedades físicas avaliadas, no entanto os tratamentos de umidade não chegaram a atingir a capacidade de campo. A área de trabalho efetivo não apresentou valores críticos para as propriedades físicas avaliadas, provavelmente devido a concentração de galhos e acículas, reduzindo o efeito do tráfego nesta área. Os parâmetros mais sensíveis a compactação do solo devido a colheita de madeira foram em ordem decrescente: porosidade de aeração do solo, resistência mecânica do solo à penetração, densidade do solo e porosidade total do solo.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the soil physical properties such as penetration resistance, bulk density, total porosity and air filled, of a soil representative of the Otacilio Costa / SC, region, where *Pinus taeda* was harvested using the tree length system. Measurements were done for two conditions. First traffic and soil moisture were simulated, with 1 to 16 cumulative passes of the machinery and soil moisture treatments of no additional water (after 3 rainless days), 30 mm added and 60 mm added. Second the work area in front of the delimiting cradle, which is potentially critical area for soil physical properties under the harvesting system utilized. Effects of soil compaction due harvesting by tree length system were not as evidence, in delimiting cradle. Soil moisture was strongly correlated with the compaction process, with the lowest soil moisture level being associated to the largest alternations for all soil physical properties evaluated, however the soil moisture has not to attain at the field capacity. Most sensitive soil parameters were, in decreasing order: air filled porosity, resistance to penetration, bulk density and total porosity.

1 INTRODUÇÃO

O impacto ambiental provocado pela colheita mecanizada de madeira tem despertado o interesse em diversas partes do mundo devido ao uso intensivo de máquinas florestais que podem provocar consideráveis danos no povoamento remanescente e principalmente em algumas propriedades físicas do solo. O principal efeito observado é a compactação do solo, que pode ser definido como um processo de reagrupamento de partículas, provocado por uma redução no espaço poroso através do aumento da microporosidade em detrimento do volume de macroporos. Esta nova configuração das partículas aumenta a densidade do solo ou massa específica do solo, reduzindo sua capacidade de infiltração e o movimento interno da água, provocando um aumento do escoamento superficial e o decréscimo da fertilidade natural do solo. É de conhecimento também, que a aeração escassa reduz a população microbológica do solo provocando maior resistência mecânica do mesmo e isso dificulta o crescimento de raízes.

A compactação é considerada como sendo um problema múltiplo que envolve os fatores máquina / solo / produção / clima, que interage em função da importância, com conseqüências econômicas e ao meio ambiente. A compactação ocorre de forma similar em diferentes sistemas de produção, sendo possível observar estas semelhanças pelo tráfego de veículos empregados em atividades específicas de operações de campo, como por exemplo durante o preparo do solo, plantio, tratos culturais ou nas aplicações de fertilizantes e pesticidas, e finalmente nas operações de colheita e transporte da madeira.

Quando se faz o preparo do solo, através de revolvimento da camada superficial ou por subsolagem durante a fase de implantação de um povoamento florestal podem

ocorrer alterações nas condições físicas do solo. A medida que o povoamento vai se estabelecendo devido a natureza da cultura como tamanho, peso e ciclo da planta, as raízes aplicam forças de compressão no solo por longos períodos, porém é na colheita da cultura que o problema se agrava, com a derrubada e a manipulação de grandes árvores associado ao peso elevado das máquinas utilizadas nesta operação as quais impõe sobrecargas ao solo.

As variáveis inerentes ao solo, de maior influência no processo de compactação, são a textura, o grau de agregação do solo, a densidade natural e o tipo de mineral de argila predominante. A intensidade da compactação do solo é afetada, também, por fatores externos como a pressão exercida pelos pontos de apoio dos veículos ou superfície de contato, suas cargas e equipamentos, número de passadas e principalmente e pelo teor de umidade do solo no momento da operação. O tráfego de máquinas de grande porte, sem a preocupação com os fatores acima citados pode alterar sensivelmente as características físicas do solo, e estes distúrbios podem provocar erosão, além de efeitos no comportamento hidrológico e no desenvolvimento das plantas, reduzindo a capacidade produtiva do sítio.

O conhecimento sobre os principais agentes responsáveis pelo processo de compactação do solo e sua relação com o sistema de colheita é de vital importância para definir o melhor momento de intervenção na floresta, buscando a melhor interação entre solo / umidade / máquina e com isso um manejo adequado para cada situação, minimizando com isso os danos ao meio ambiente, visando sua autosustentabilidade e melhoria na produção de madeira com redução dos custos no preparo do solo, para novos plantios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas, durante a operação de colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema fuste (tree length), em um Cambissolo álico de textura média.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a compactação do solo em:

1.1.2.1 - Área simulada, com condição de tráfego e umidade controlados e

1.1.2.2 - Área de trabalho efetivo relacionado com área de grade desgalhadora, buscando detectar os pontos críticos para intervenção na floresta e os níveis de compactação do solo provocados pelo tráfego no local de escoamento da matéria prima para o sistema de colheita adotado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA

A palavra sistema, compreende um grupo de componentes que são interrelacionados e que em conjunto contribuem para algum objetivo comum, podendo ser considerado como uma ampla parte de um sistema dominante. O sistema em questão pode ser composto por inúmeros pequenos sistemas, chamados de subsistemas. O conceito de sistema envolve uma descrição apropriada das afinidades do conjunto e suas inter-relações, exigindo planejamento, metodologia e ordenamento das atividades a serem desenvolvidas (CONWAY, 1976).

O sistema de colheita de madeira corresponde a toda cadeia de trabalho, desde o corte até a madeira posta no pátio da indústria consumidora. Para possibilitar a criação de um sistema florestal, devem ser integrados as formas utilizadas da colheita de madeira em outras empresas florestais, ou criar racionalmente formas próprias, dependendo da floresta a ser trabalhada. O sistema é formado por elementos que podem ser modificados em função do trabalho a executar, normalmente criam-se novos elementos, mas dificilmente um sistema completamente novo (MALINOVSKI, 1981).

SEIXAS *et al.* (1996) citam que os sistemas de colheita de madeira podem ser agrupados a grosso modo em sistemas aéreos (com uso de cabos teleféricos, balões e helicópteros) e sistemas de base terrestre com diversas combinações de equipamentos dentro desta classe.

Os sistemas de colheita variam de acordo com as condições locais, existe uma combinação de atividades manuais e mecânicas dentro de cada sistema de colheita de madeira, onde a escolha do sistema é feita com base no comprimento das toras a serem retiradas da floresta. Podemos classificar quatro sistemas de colheita de madeira no que se refere ao beneficiamento da matéria prima: sistema de madeira curta “*cut to length*”, sistema de madeira longa ou fuste “*tree length*”, sistema árvore inteira; sistema árvore completa (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

2.1.1 SISTEMA DE MADEIRA CURTA “*CUT TO LENGTH*”

Este sistema é caracterizado pela realização de todos os trabalhos complementares ao corte (desgalhamento, destopo, toragem ou traçamento e descascamento, quando necessário) executados no próprio local onde a árvore foi derrubada, e o comprimento das toras variam de 1 à 6 metros, dependendo do índice de mecanização empregado. (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

SEIXAS *et al.* (1996) apontam algumas vantagens do sistemas de toras curtas, ou corte por comprimento:

- Podem oferecer um melhor desempenho e viabilidade econômica na implementação de regimes de desbaste seletivo,
- Devido a madeira ser processada próxima ao toco, galhos e folhas são espalhados sobre o solo, aumentando a ciclagem de nutrientes e a produtividade do sítio a longo prazo,
- O carregamento do material processado confinado na caixa de carga do “*forwarder*”, reduz o sulcamento, distúrbios no solo e danos ao povoamento remanescente.

MAKKONEN (1989) acrescenta ainda que este sistema proporciona uma otimização do uso da terra com a necessidade de pátios menores, redução de danos ao talhão em cortes de desbaste e melhor classificação da madeira para serraria e celulose.

Enquanto os sistemas de toras curtas possuem diversas vantagens sobre os sistemas convencionais nas prescrições de manejos de ecossistemas, a questão básica ainda é econômica. As exigências de madeira e a condição de colheita são relativamente específicas para a economia e performance máxima, a produtividade e os custos estão diretamente relacionadas ao tamanho das peças, e apresentam limitações em relação ao diâmetro que deve ser inferior à 45 cm, e declividade que não deve ser superior a 40 %. Quando comparados a sistemas convencionais, a produtividade de sistemas de toras curtas raramente será superior mesmo em condições favoráveis (SEIXAS *et al.* 1996).

2.1.1.1 Máquinas utilizadas na colheita de madeira pelo sistema madeira curta

Os equipamentos empregados neste sistema de colheita consiste basicamente em colhedoras ou processadores “*harvester*” para as atividades de corte, desgalhamento e traçamento e tratores florestais auto-carregáveis “*forwarder*” para as atividades de extração, baldeio ou transporte primário (SEIXAS *et al.*, 1996).

Em sistemas de colheita com corte mecanizado que utilizam processadores tipo “*harvester*”, que consiste em um trator derrubador, desgalhador, traçador e empilhador, composto de uma máquina base de pneus ou esteira, uma grua e um cabeçote, que pode ser do tipo “*One Grip Harvester*”, com as funções de corte, desgalhamento e traçamento, ou “*Two Grip Harvester*”, onde o cabeçote tem somente a função de corte, estando sobre o eixo traseiro da máquina base os implementos para desgalhamento e traçamento (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

As atividades de extração em diferentes sistemas de colheita podem ser feitas por arraste, baldeação ou ser suspensa, isso vai depender da forma com que a carga é extraída, e os meios de extração podem ser feitos de forma manual (através de calhas), pelo uso de animais (cavalos, bois e muares), guincho adaptado ao trator agrícola, teleféricos, tratores agrícolas “*mini-skidders*” podendo ser adaptados com três implementos: engate simples, barra e corrente ou garra ou pinça hidráulica, trator florestal articulado “*skidders*”, trator agrícola com carreta. No caso de colheita pelo sistema madeira curta a extração é feita através de tratores florestais auto-carregáveis “*forwarder*”, disponíveis nas versões 4 x 4, 6 x 6 e 8 x 8, com opções de uso de pneu ou esteira e uma capacidade de carga que varia de 10.000 kg à 15.000 kg (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

Em geral pode se dizer que se a carga é arrastada, ou seja quando ao menos uma parte importante desta está em contato com o solo, neste caso a máquina mais utilizada é o “*skidder*”. Se a carga é suspensa, o que se conhece como baldeio, a máquina mais empregada é o auto-carregável. É importante fazer a diferenciação para identificação do sistema de colheita empregado. (MAC DONAGH, 1994).

O uso de máquinas pesadas durante a colheita de madeira tornou-se comum, conduzindo o solo a compactação e causando, a longo prazo, decréscimo na produtividade de sítio e agredindo o meio ambiente. Para HERBAUTS *et al.* (1996), o aumento do tamanho, da potência e o tráfego de máquinas é a principal causa para degradação física do solo e ecossistemas florestais. Sob a influência de repetidas passadas durante a operação de extração, os solos florestais estão submetidos a stress severo devido a forças mecânicas exercidas pelos pneus dos tratores e derrapagens na superfície do solo.

2.1.2 SISTEMA FUSTE “*TREE LENGTH*”

Sistemas de toras longas são definidos pelo corte e transporte de toras desganhadas em uma única peça, sempre que possível, para posterior toragem em um pátio intermediário ou indústria (SEIXAS *et al.*, 1996).

MALINOVSKI e MALINOVSKI (1998) apontam algumas vantagens do sistema fuste:

- Sistema mais barato quando mecanizado, devido a alta eficiência dos equipamentos e o menor custo por tonelada de madeira posta no pátio da empresa,
- Maior maleabilidade na definição das atividades por máquina em função da condição de sítio.
- SEIXAS *et al.* (1996) citam ainda que este sistema permite trabalhar com uma larga margem no tamanho de árvores, além de ser utilizado em cortes rasos com níveis aceitáveis de impactos ambientais.

Vários estudos sobre produtividade tem sido efetuados, constatando sua viabilidade econômica, no entanto, apresentam certas limitações. Mc NEEL e BALLARD (1992), cita que o uso destes equipamentos em desbaste pode resultar em danos severo ao povoamento remanescente e às raízes, somando-se a compactação do solo, sulcamento e deslocamento de nutrientes do solo.

- Os “*feller-bunchers*” suportam todo o peso da árvore na cabeça de corte durante a operação , criando assim um problema de compactação ao longo da trilha.
- Os “*skidders*” podem produzir danos as árvores remanescentes devido ao arraste de outras árvores através do talhão. Como na maioria das vezes estas árvores não são processadas no local de abate, é comum a

concentração de nutrientes a margem das estradas ou em pátios intermediários.

2.1.2.1 Máquinas utilizadas na colheita de madeira pelo sistema fuste

Os equipamentos utilizados neste sistema consistem basicamente em trator derrubador empilhador “*feller-buncher*” para as atividades de corte, e trator florestal articulado “*skidder*”, para realizar a operação de extração das toras (SEIXAS *et al.*, 1996). Para sistemas de corte mecanizado que utilizam “*feller buncher*” os tratores podem ser equipados com pneus ou esteiras, e implementos frontais responsáveis pelo corte, que podem ser de sabre, tesoura ou disco (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

2.1.3 SISTEMA DE ÁRVORE INTEIRA

Este sistema de colheita de madeira consiste na retirada da árvore sem raízes, mas com galhos com ou sem copa, que são transportadas até a estrada florestal ou pátio de acabamento estacionário, onde, na maioria das vezes com equipamentos altamente mecanizados ela é trabalhada, ou seja, desganhada, descascada e traçada (MALINOVSKI, 1981). É pouco utilizado, para nossas condições, devido ao elevado índice de mecanização e pela remoção de árvores para fora do talhão em local previamente escolhido, onde o processamento completo é feito, deixando um acúmulo de restos de árvores que podem ser utilizados para energia. Não apresenta limitações em relação a topografia, podendo ser utilizado em áreas planas ou acidentadas (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998). Mc CARY (1991) cita que em 1986, a

colheita por sistemas de toras longas e árvores inteiras dominava os métodos de exploração nos EUA e Canadá, respondendo por 94 % e 93 %, respectivamente.

2.1.3.1 Máquinas utilizadas na colheita de madeira pelo sistema de árvore inteira

Os equipamentos utilizados para este sistema de colheita podem ser os mesmos utilizados para o sistema fuste, ou seja, trator derrubador empilhador “*feller-buncher*” para as atividades de corte, e trator florestal articulado “*skidder*”, para realizar a extração das toras (SEIXAS *et al.*, 1996).

2.1.4 SISTEMA ÁRVORE COMPLETA

Este sistema de colheita de madeira consiste na retirada completa da árvore inclusive com raízes, quando estas apresentam altas concentrações de resina no toco ou árvores medicinais. Este sistema também é muito pouco utilizado em nossas condições, uma vez que as espécies plantadas não apresentam raízes com valor comercial que compense sua extração, e também a grande quantidade de biomassa retirada poderá afetar a produtividade do sítio (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998).

Existem ainda outros sistemas de colheita, pouco utilizado em nossas condições que consistem na utilização de cabos teleféricos, que reduzem consideravelmente os danos ao solo podendo ser empregados em terrenos com declividade acentuada ou áreas alagadas. Helicópteros e balões também podem ser usados na colheita de madeira, no entanto o alto custo na colheita e a necessidade de pessoal altamente especializado inviabiliza sua utilização em nossas condições.

2.2 PREJUÍZOS CAUSADOS POR MÁQUINAS FLORESTAIS

A colheita mecanizada de madeira pode provocar consideráveis prejuízos, seja por danos ocasionados em árvores remanescentes, através das injúrias causadas pelo tráfego de máquinas, como também pela queda na capacidade produtiva do sítio devido ao processo de compactação do solo, que altera o regime hídrico do mesmo tornando-o susceptível à erosão e conseqüentes perdas em sua fertilidade natural.

2.2.1 DANOS AO POVOAMENTO REMANESCENTE

Os danos provocados pelo uso de máquinas florestais nas atividades de colheita da madeira, principalmente em povoamentos manejados através de desbaste, devem reservar a qualidade do povoamento remanescente, através do controle de danos, uma vez que os mesmos são inevitáveis.

MALINOVSKI (1998) avaliando os impactos provocados pela colheita mecanizada de *Pinus taeda*, constatou os seguintes resultados: 5% das árvores remanescentes sofreram algum tipo de lesão no primeiro desbaste, 16% no segundo desbaste, 32% no terceiro desbaste e 45 % no quarto desbaste. Para SAUTER (1996), a porcentagem de danos em povoamentos remanescentes, causado pela colheita de coníferas no sistema fuste, foi de 9,1%, enquanto que no sistema de madeira curta, foi na ordem de 3,7%, considerando-se como dano áreas afetadas superiores a 10 cm².

LANDFORD e STOKES (1995) ao comparar um sistema fuste com um sistema de madeira curta constataram que, no primeiro desbaste comercial conduzido em um talhão de *Pinus taeda* com 18 anos de idade, o “*skidder*”, produziu injúrias em 62 árvores por hectare contra 25 do sistema “*forwarder*”. As lesões provocadas pelo

impacto das máquinas nas árvores restantes comprometem a qualidade do produto final, uma vez que é no último desbaste que a madeira obtém o melhor valor agregado.

2.2.2 QUEDA NA CAPACIDADE PRODUTIVA DO SÍTIO

Outro fator responsável por perdas em produtividade devido à colheita de madeira refere-se ao decréscimo na qualidade do sítio, devido às alterações físicas provocadas pelo processo de compactação do solo durante o tráfego de máquinas. A compactação causada pelas operações florestais afeta a drenagem e posteriormente o cultivo, devido ao corte e extração e a construção e uso de caminhos. O movimento de máquinas pode remover e sulcar o solo mineral e conseqüentemente redução da infiltração de água e aumento dos riscos de erosão localizada (WORRELL e HAMPSON, 1997).

Uma medida que reflete a capacidade de sustentação do solo durante aplicação de cargas e que está diretamente relacionada com o processo de compactação do solo devido ao tráfego de máquinas são as condições de transitabilidade do solo. Segundo LOYCKE citado por MALINOVSKI (1981), transitabilidade entende-se como as características do solo em sustentar peso de veículos tanto imóveis como em movimento, definindo de forma genérica sua capacidade de sustentação em função do tipo de solo, e utiliza como unidade de medida kilo pounds por centímetro quadrado.

- solos pantanosos – 0,2 até 0,5 kp/cm²
- solos argilosos – 0,5 até 1,5 kp/cm²
- solos argilo-arenosos – 1,5 até 3,0 kp/cm²
- solos saibrosos ou de cascalho – até 5,0 kp/cm²

Por outro lado, a pressão da parte rolante de tratores, é de aproximadamente:

- tratores de esteiras leves – 0,1 até 0,3 kp/cm²

- tratores de rodados largos – 0,3 até 0,5 kp/cm²
- tratores florestais - 0,4 até 1,5 kp/cm²
- tratores agrícolas – 1,2 até 2,5 kp/cm²

A pressão de contato sobre o solo de um trator carregador florestal “*skidder*”, no eixo dianteiro é de 0,56 kp/cm², 0,48 kp/cm² no eixo traseiro e 0,67 kp/cm² para o eixo traseiro carregado, e para tratores derrubador florestal “*feller bunchers*” a pressão de contato é de 0,69 kp/cm² (ROESLER e MOREIRA, 1998).

WÄSTERLUND (1992) constatou através de cálculos, que “*skidder*” tem que produzir forças de tração muito maiores que o “*forwarder*”. Conseqüentemente, podem ser esperados maiores danos ao solo. WRONSKI (1984), encontrou o mesmo nível de danos ao solo causado pelo tráfego de um “*skidder*” de 9 toneladas (incluindo a carga), comparado com os efeitos de um “*forwarder*” de 28 toneladas, embora as pressões estimadas de contato no solo fossem de 80 kPa e 200 kPa respectivamente. LANDFORD e STOKES (1995) comparando o sistema de madeira curta com o sistema fuste, constatou que este apresentou praticamente o dobro de distúrbios no solo, na ordem de 65% para o sistema fuste e 34 % para o sistema de madeira curta, este com menor compactação do solo do que aquele outro.

A produtividade de solos florestais está diretamente relacionada com a porcentagem de área afetada pela compactação provocada pelo tráfego de máquinas. FENNER (1996) sugere algumas soluções para evitar perdas na qualidade de sítio como, evitar o tráfego em solos úmidos ou acima de um determinado teor de umidade, concentrar o tráfego nos ramais de extração, trafegar sobre a galhada, empregar máquinas de pneus largos com baixa pressão de contato com o solo, buscando reduzir os danos com compactação. O mesmo autor cita ainda que tratores equipados com esteira podem provocar danos ao sistema radicular superficial.

2.2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O impacto econômico gerado pela compactação do solo é evidenciado por consideráveis perdas na produtividade de sítio em florestas comerciais, o que pode ser atribuído ao uso comum de transporte pesado e tráfego de veículos durante a extração de madeira e também pelo encurtamento da rotação com espécies de rápido crescimento, resultando em consideráveis perdas futuras na capacidade produtiva do sítio (SMITH, 1995).

Para WARKOTSCH *et al.* (1994), McLEOD e HOFFMAN (1983), HERBAUTS *et al.* (1996), BETTINGUER *et al.* (1994), o processo de compactação é caracterizado pela perda ou destruição da superfície de agregados do solo, aumento da sua densidade, devido ao decréscimo no volume de macroporos e um aumento proporcional no volume de sólidos, reduzindo a difusão de ar e a infiltração da água, elevando a resistência mecânica do solo, afetando toda a vida no interior do mesmo e influenciando no estabelecimento e desenvolvimento de mudas. Estes efeitos reduzem a velocidade de crescimento e empobrece o enraizamento, induzindo-o a redução na reserva de nutrientes e água, possibilitando o decréscimo no crescimento de árvores, além de aumentar os riscos das árvores serem derrubadas pelo vento. PREVEDELLO (1996) acrescenta ainda que a compactação afeta todos os processos de transportes que ocorrem no solo (aeração, condutividade do solo ao ar, à água, ao calor, infiltração, redistribuição, etc.), além dos processos de transformações químicas e biológicas, de impedimento mecânico na emergência de plântulas e no desenvolvimento de raízes, comprometendo severamente a capacidade produtiva do solo.

O efeito compactação causado por máquinas de colheita, esta associado a pressão exercida no solo e ao número de passagens e ao teor de umidade no momento do tráfego, provocando movimentação do solo e consideráveis danos nas condições de sítio. WARKOTCH *et al.* (1994) consideram que os fatores decisivos na

compactação do solo compreendem transporte de cargas, conteúdo de água no solo no momento do tráfego e número de passadas do veículo. CLAYTON *et al.* (1987) cita que as atividades de colheita de madeira provocam perturbações nos horizontes superficiais do solo podendo acelerar a decomposição e mineralização resultando em aumento da lixiviação e perda de nutrientes e o deslocamento da matéria orgânica pode ter efeitos adversos nas propriedades físicas do solo como a compactação, a magnitude e a longevidade destes impactos negativos tem uma grande influência no crescimento de árvores e produtividade de sítio.

CAMARGO (1997) cita que a compactação do solo pode ser causada tanto por fatores externos, como tráfego de veículos e crescimento de grandes raízes que empurram as partículas do solo para forçar sua passagem, como por fatores internos, resultantes de ciclos de congelamento e degelo, umedecimento e secamento, expansão e contração da massa do solo, além de fatores pedogenéticos, derivados da evolução do solo, que podem causar adensamento em camadas subsuperficiais.

NAMBIAR (1996) aponta outros fatores que estão relacionados com o processo de compactação que são inerentes ao manejo de solos florestais como: altos níveis de produção por unidade de área e com isso grande demanda por sítio; alta intensidade e frequência de distúrbios provocados pela baixa rotação e retorno econômico do investimento a curto prazo, portanto as técnicas de manejo são fortemente influenciadas pelo mercado. No entanto, atividades não manejadas possibilitam o aparecimento de distúrbios no solo e na produtividade do sítio. Estes distúrbios podem provocar grandes alterações na mineralização e perdas de recursos do sítio, como matéria orgânica e nutrientes que são removidos pela colheita e queima, erosão e redução da porosidade. Estas alterações irão afetar o crescimento da vegetação devido a competição por água e nutrientes, entre os efeitos apontados incluem além da compactação, o deslocamento da camada superficial do solo, deformação da estrutura do solo, redução da porosidade, redistribuição e incorporação da matéria orgânica.

WORRELL e HAMPSON (1997) apontam alguns impactos que ocorrem em solos provocados pelas operações de colheita de madeira, destacando-se a erosão devido a exposição do solo pela colheita, alterações no “*status*” de nutrientes no solo, seja por exportação ou por lixiviação, compactação do solo, alterações no comportamento da água assim como na quantidade e qualidade da matéria orgânica. Todas as operações de manejo podem causar compactação em algum grau, embora sejam nas operações de desbaste e limpeza, onde ocorrem grandes pressões no solo provocadas pelas múltiplas passadas.

BETTINGUER *et al.* (1994) citam que durante a colheita de madeira, as passadas repetidas de equipamentos de extração sobre solos florestais, comprimem sua massa, resultando num aumento significativo da compactação do mesmo. Técnicas de cultivo mecânico provocam compactação pelo tráfego, reduzindo a espessura da camada superficial do solo, e as maiores alterações ocorrem nas primeiras passadas de uma máquina.

Para MC LEOD e HOFFMAN (1983), a degradação do solo durante as atividades de colheita florestal pode resultar em redução da capacidade do sítio para produção comercial de madeira. O estabelecimento, desenvolvimento e a velocidade de crescimento de espécies comerciais são afetadas de formas adversas pela compactação e remoção da superfície do solo, e a magnitude destes impactos depende do grau de perturbação, tipo de solo e espécie. CORNS (1988), cita que os danos provocados pela colheita de madeira em solos florestais através da compactação causados por equipamentos pesados são evidentes, sendo responsável por perdas em produtividade, constatado em diversas partes do mundo, tendo como parâmetro de comparação o aumento da densidade e a redução de crescimento de mudas.

O interesse sobre as potenciais alterações no comportamento do solo sob plantio florestais e sua influência na velocidade de crescimento de árvores tem sido avaliado através de alterações na produção de madeira devido a práticas florestais na Europa

desde 1800 (GRIGOR, 1868, citado por WORRELL e HAMPSON, 1997). No entanto, a infinidade de fatores responsáveis pelo crescimento de árvores, torna difícil em experimento de campo atribuir reduções de crescimento a um só fator como a compactação, as perdas na potencial produtividade acompanhadas pela perturbação no solo e erosão em ecossistemas florestais ainda são pouco conhecidas (CORNS, 1988).

A persistência dos impactos negativos no solo pode variar de acordo com alguns autores DICKERSON (1976), estima um período de recuperação das propriedades físicas do solo na linha de tráfego de aproximadamente 12 anos e entre linhas em torno de 8 anos. PERRY (1964) estima aproximadamente 40 anos para recuperação da capacidade de infiltração em solos argilosos; e as perdas e reduções em volume, nos caminhos de arraste chegam à 45% após 26 anos e de 74 % à 80 % após 32 anos (WERT e THOMAS 1981, JAKOBSEN 1983).

WORRELL e HAMPSON (1997), ao avaliar o crescimento de árvores em solos compactados pelo tráfego e arraste, constatou que o crescimento em altura pode ser reduzido de 13 % à 50 % e o volume na ordem de 10 % à 20 % . O crescimento de *Pinus radiata* na Nova Zelândia foi reduzido na segunda rotação, devido a baixa qualidade de sítio e principalmente devido a deficiência de nitrogênio, além de perdas acima de 40% no crescimento em volume, como resultado de derrubadas pelo vento, nos últimos 17 anos provavelmente devido a problemas nutricionais associados com a compactação do solo. Na Austrália, a segunda rotação de *Pinus radiata*, também demonstrou consideráveis reduções no crescimento quando comparados com a primeira rotação, também atribuído aos efeitos das operações de colheita. Na América do Norte, muitos trabalhos reportam danos ao solo resultantes das operações de manejo, porém resultados evidentes de decréscimo na produtividade ainda são poucos. Na Columbia Britânica, foi estimado 20% de área degradada pelos efeitos da colheita florestal entre 1976 e 1986, com base nestes dados podemos computar perdas em crescimento na ordem de 1 milhão de metros cúbicos por ano para o ano 2000,

associado a alterações climáticas e poluição (BAKEN e MAC KINNON, 1990 citado por WORRELL e HAMPSON, 1997).

WHITMANN *et al.* (1997) constataram que não houve decréscimo em altura em mudas de *Swietenia macrophylla*, em solos compactados, mas a sobrevivência foi reduzida. Os equipamentos de extração ao afetar o comportamento físico do solo devido ao processo de compactação, reduzem o estabelecimento e crescimento de mudas, podendo levar mais de 35 anos para recuperar-se. As linhas de tráfego que correspondem a áreas mais compactadas, constatou-se redução na sobrevivência de mudas, que correspondiam a 13,5 % do total da área em estudo.

A compactação do solo produz efeito limitante na germinação de sementes e a sobrevivência é significativamente afetada devido ao sistema radicular que não é capaz de penetrar em solos compactados. Foram constatadas reduções no crescimento de *Pinus ponderosa* em resposta às alterações das propriedades físicas do solo. Aumento de 15% na densidade do solo, a partir de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ na profundidade de 0 – 30 cm, representou reduções em 4,8% do crescimento em altura, 7,7% em diâmetro e 20,4% em volume, para um período de 5 anos. Grandes perdas no estabelecimento de mudas tem sido constatada devido à destruição da superfície do solo e lamaçal gerado pela extração, refletindo em reduções acima de 34% no estabelecimento de mudas nas áreas fortemente compactadas, pode-se dizer que a capacidade produtiva da área depende da proporção da área afetada (FROEHLICH *et al.* 1986).

SMITH (1995), constatou que a compactação afetou significativamente o crescimento de *Eucaliptus grandis* (15,5%), *grandis x camaldulensis* (12,3%) e *grandis x urofila* (16,2 %), após um período de 12 meses. Medidas corretivas para reduzir a compactação do solo podem incorrer em consideráveis gastos, portanto aliviar a compactação em florestas pelo cultivo dificilmente é feita, devido a grande presença de resíduos e raízes. A redução de sobrevivência de plantas em solos compactados no replantio podem chegar a 57%. As mudas jovens são mais suscetíveis

ao stress gerado pela falta de água e nutrientes e aparecimento de doenças, quando plantadas em solos compactados.

CONSTANTINI *et al.* (1995), como parte de um estudo preliminar, objetivando avaliar a extensão da compactação do solo em plantações de *Pinus sp.*, observou que a compactação excessiva é capaz de ocorrer potencialmente em qualquer parte, quando do uso de equipamentos, e quanto a extensão e a severidade da compactação são fortemente afetadas pelo teor de umidade do solo. Para a maioria dos solos que ostentam plantações de *Pinus sp.*, em Queensland, a compactação excessiva associada a colheita, está inclinada a degradação das propriedades físicas e de fertilidade do solo, reduzindo o crescimento de plantas. As alterações associadas ao fluxo d'água em solos compactados aumenta o escoamento superficial (runoff) tornando-o susceptível ao aparecimento de erosão, reduz o armazenamento de água no solo, percolando em profundidade e redirecionando (CONSTANTINI *et al.* 1997).

WILLIAMSON (1990) avaliando os efeitos das operações de colheita de eucalipto em floresta mista na Tasmânia, constatou impactos causados pelas trilhas e separou em ordem decrescente por severidade; trilhas primárias 13 % à 47 %, secundárias 36 % à 66 % e terciárias 11 % à 29 %, os danos avaliados foram remoção e deslocamento da camada superficial, formação de sulcos, compactação, remoção de horizonte orgânico e distúrbios no solo.

FERNANDES (1997), avaliou a compactação causada pela colheita de madeira no sistema madeiras curtas em um Latossolo Roxo em teores de umidade no solo em torno de 9,3 % à 12,6 % e constatou que o “*forwarder*” provocou menor incremento na densidade do solo, sem diferenças significativas nas profundidades avaliadas, quando comparados ao “*harvester*” que apresentou diferença significativa na camada superficial 0 – 15 cm, e os altos valores de resistência do solo à penetração foram atribuídos ao baixo teor de umidade no solo. NICHOLS *et al.* (1994), avaliando o processo de colheita de madeira em diferentes estações do ano constatou que os danos

às raízes e perturbações no solo eram reduzidos quando a colheita era executada no inverno provavelmente devido a cobertura de neve no solo, os danos foram em torno de 18% e no verão chegaram a 34%.

As alterações provocados no solo são evidentes, no entanto os critérios de avaliação ainda são efetuados de forma subjetiva e conforme a ótica em que é observada podem ser contraditórios. CLAYTON *et al.* (1987) ao estudar áreas perturbadas pela colheita de madeira constatou que: pouco deslocamento lateral do solo e a mistura de horizontes pode ser benéfica para a regeneração devido a redução da competição durante o preparo de sementeiras. Por outro lado, este deslocamento lateral pode romper com processos biológicos afetando a disponibilidade e o nível de nutrientes, provocando decréscimo do material lenhoso na planta e tornando-a suscetível ao aparecimento de patógenos e doenças, a perturbação na camada de proteção ainda predispõe o solo aos efeitos da erosão. O mesmo autor cita ainda algumas opções para evitar ou amenizar as perdas em produtividade como o uso de equipamentos que provoquem baixas pressões no solo, tráfego controlado, evitando que as operações sejam feitas em períodos chuvosos e uso de subsoladores como medida corretiva.

Segundo GOMES (1996), o grau de compactação pode ser medido por vários métodos, no entanto a maioria apresenta limitações teóricas e práticas, e o principal problema encontrado em medições de compactação é que não reflete adequadamente as condições encontradas para o desenvolvimento de raízes. As principais propriedades físicas envolvidas no processo de compactação do solo são a densidade do solo (massa específica do solo seco ρ_{ss}), porosidade total (α), porosidade de aeração (α_{ar}) e resistência mecânica do solo.

2.2.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo ou massa específica do solo seco (ρ_{ss}) é a propriedade física que expressa muito bem o efeito da compactação do solo, pode ser expressa em Mg m^{-3} , kg dm^{-3} ou g cm^{-3} . O aumento da densidade do solo geralmente é diretamente proporcional ao aumento da resistência mecânica e inversamente proporcional a porosidade de aeração.

Uma aproximação tradicional para avaliação da compactação do solo tem usualmente envolvido a densidade máxima do solo (compactabilidade) e índices de compressão (compressibilidade). É importante reconhecer o início da compressibilidade, que refere-se a uma leve compactação do solo, embora exposto a aplicação de pressão, não deve ser confundido com compactabilidade, que corresponde a máxima densidade que um solo pode alcançar para uma quantidade específica de energia, são mensuradas por valores físicos e podem ser usados como ponto de referência para descrever o grau de compactação para um solo e o potencial para desenvolver o máximo em densidade, em solos saturados é chamada de consolidação e solos não saturados de compactação (HORN, 1994).

Durante o processo de compactação as partículas e a microestrutura são alinhadas em direção perpendicular a aplicação da carga, causando uma redução no volume e formando um arranjo mais denso. Estudos recentes indicam que este alinhamento é significativo para altos níveis de “stress”, superiores à 1 MPa (KOOISTRA e TOVEY, 1994). Quanto maior a massa específica do solo seco ou densidade do solo, menor é a porosidade total do solo, seja pela natureza e arranjo das partículas sólidas ou pela compactação (PREVEDELLO, 1996).

Para DUFFY e McCURKINS (1974), o aumento da densidade do solo em áreas de pátio de madeira é causada pelo tráfego intenso e depósito de toras, dificultando o estabelecimento de mudas podendo até impedir o crescimento das mesmas nestas

áreas. Mudanças de *Pinus taeda* cresceram 39 % à 59 % menos após 5 anos quando plantadas em áreas de pátio. McLEOD e HOFFMAN (1983) constataram aumento da densidade do solo na camada superficial do solo (0 – 10 cm) em torno de 15 % à 20 % na trilha de arraste e 15 % à 50 % nas áreas de pátio e com o aumento da densidade do solo pela compactação provocou decréscimo da estrutura de macroporos do solo acima de 68 %, alterando com isso a infiltração da água e a condutividade hidráulica do solo. Densidade do solo superior a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, restringe a penetração, ramificação e crescimento de raízes de *Pinus sp.*.

Os níveis máximos de densidade encontrados em solos florestais no Sul da África variavam entre $1,21 \text{ g.cm}^{-3}$ e $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$, quando comparados a solos agrícolas, estes valores podem ser considerados baixos, podendo ser atribuídos aos altos conteúdos de silte + argila e elevados níveis de carbono orgânico. Em solos húmicos, o valor máximo de densidade do solo reflete em baixa compactabilidade, devido aos altos teores de argila, apresentam muito baixa densidade natural em condições de campo, podendo chegar abaixo de $0,7 \text{ g.cm}^{-3}$, solos com baixos valores de densidade máxima ($<1,4 \text{ g.cm}^{-3}$), são predominantemente de textura argilosa e com altos conteúdos de carbono orgânico ($>2,5\%$), o material de origem geralmente são derivados de rochas básicas como diabásicos, gnaisses, entre outros (SMITH, 1995).

FROEHLICH *et al.* (1979) observaram que a compactação do solo por equipamentos de extração foi conferida após 16 anos de corte raso, através de medições, com densidades superiores em média de 9 % à 18 %, quando comparados a solos não perturbados com textura arenosa. HERBAUTS *et al.* (1996) trabalhando com solos hidromórficos encontrou valores para densidade do solo em torno de $1,54 \text{ g.cm}^{-3}$ à $1,62 \text{ g.cm}^{-3}$. No entanto, a compactação devido ao tráfego de máquinas apresenta maiores efeitos nas camadas superficiais do solo, nos parâmetros de densidade do solo e na porosidade total, a partir do horizonte B, poucas alterações foram observadas.

Para FROEHLICH *et al.* (1986), solos florestais são particularmente suscetíveis à compactação devido às perdas da estrutura friável e da porosidade de aeração, e aumento da densidade do solo. O crescimento em altura e diâmetro de *Pinus ponderosa* mostrou-se fortemente influenciado pelo aumento da densidade de 7,1% com decréscimos na porosidade em 11,8 %.

SANDS (1983), avaliando a densidade do solo sob plantações de *Pinus radiata*, constatou que os valores obtidos eram superiores aos sítios sob floresta nativa ou pastagem, e estes valores estendiam-se pela segunda rotação de forma cumulativa. MINKO (1975) citado por McLEOD e HOFFMAN (1983), considera $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ como densidade crítica para crescimento de *Pinus radiata* em viveiro para solos silte-argilosos, sendo que valores até $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ são considerados apropriados ao desenvolvimento de raízes e altura de mudas. CORNS (1988) constatou que com um aumento de densidade do solo de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ para $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, houve uma redução no comprimento de raízes em aproximadamente 48% e 15% no crescimento em diâmetro e 17% para a altura em mudas de *Pinus sp.* CLAYTON *et al.* (1987), objetivando avaliar o efeito da compactação em dois povoamentos de *Pinus ponderosa* na Califórnia, concluiu que aumentos de 10 à 20 % na densidade do solo provocaram variabilidade de crescimento em altura, reduzindo a produção por acre em torno de 20% devido a compactação, nos dois povoamentos. Os resultados deste estudo sugerem que a compactação ocasionada pelas atividades de colheita e preparo do solo podem provocar efeitos adversos na regeneração do povoamento. Ao se considerar um nível de erro permitido de 10%, o decréscimo em um ou mais atributos de crescimento está associado ao aumento da resistência à penetração e deslocamento do solo nos dois casos em estudo, no entanto, estes dados não são adequados para prever perdas em produtividade após a rotação.

HILDEBRAND (1983) constatou que densidades acima de $1,23 \text{ g.cm}^{-3}$ em solos argilosos retardou a penetração de raízes e o desenvolvimento de *Faia* (beach) e

densidades de $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$ cessou o crescimento de raízes. HEILMAN e LEBERT (1981) demonstram o declínio de mudas de *Douglas fir*, devido a dificuldade de penetração de raízes em solos argiloso e arenosos com aumento na densidade de $1,33 \text{ g.cm}^{-3}$ para $1,77 \text{ g.cm}^{-3}$ com um máximo de $1,83 \text{ g.cm}^{-3}$, no entanto, as mudas podem estabilizar e crescer em solos com alta densidade o que será fortemente afetada é a velocidade de crescimento.

CLAYTON *et al.* (1987) apontam alguns valores toleráveis de densidade do solo por espécie como: *Thuja plicata*, a qual tolera densidade do solo até $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$, *Alnus rubra* suporta densidades até $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ e para espécies como *Pseudotsuga menziensis* e *Tsuga heterophylla* o desenvolvimento fica prejudicado com densidades superiores à $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$. RAB (1994), trabalhando com *Eucalyptus regnans*, observou que o crescimento em altura e diâmetro com um ano de idade, correlacionou-se negativamente com a densidade do solo na camada superficial (0-10 cm), com maior efeito em altura do que em diâmetro. Reduções de até 50% no incremento em altura e diâmetro de *Eucalyptus regnans*, quando a densidade se elevava de $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$ para $0,96 \text{ g.cm}^{-3}$, estes incrementos cessariam em solos com densidade de $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$.

O processo de compactação geralmente, porém nem sempre, aumenta a densidade do solo, no entanto as alterações na porosidade e na geometria dos poros são sempre observadas. As alterações nestas propriedades do solo devem ser consideradas no contexto da compactação do solo em camadas e variação da estrutura dos sistemas de cultivo (HORTON *et al.*, 1994).

2.2.3.1.1 Métodos utilizados para determinação da densidade do solo

Segundo CAMPBELL (1994), os métodos de mensuração da densidade do solo podem ser divididos em dois grupos:

- Métodos diretos, que envolvem medidas de massa e volume como o método do anel volumétrico, do torrão parafinado e da escavação, entre outros. Estas metodologias fazem parte do manual de métodos de análise de solos da EMBRAPA (1979).
- Métodos indiretos, baseados nos efeitos da radiação nuclear no solo, raio x ou raio gama, cuja fonte radioativa pode ser Césio (Cs) ou Amerício (Am).

O uso do raio x e a transmissão através da tomografia computadorizada apresenta grande potencial para estudo de alterações da macroporosidade em colunas de solo submetidos à períodos de secagem e molhamento, no entanto são pouco utilizados para nossas condições devido a complexidade e o custo dos aparatos necessários.

2.2.3.2 Porosidade do solo

A porosidade total do solo é uma importante propriedade física, responsável pelo armazenamento, disponibilidade e transporte de ar e solução do solo. A disposição, tamanho e a forma dos poros no solo são diversificados variando conforme a textura e arranjo das partículas sólidas do solo. SMITH *et al.* (1997) consideram que a compactação excessiva reduz porosidade total do solo pela compressão do espaço poroso e pelo rearranjo das partículas do solo. A distribuição do tamanho do poro é tipicamente alterada pela redução do volume, abundância e direção dos poros, reduzindo a velocidade de fluxo de água saturada, reduz a infiltração e a velocidade do fluxo de gases, aumentando a condutividade e a difusividade térmica, bem como a resistência à penetração de raízes. Para WARKOTSCH *et al.* (1994), a compactação aumenta a massa do solo por unidade de volume, provocando redução no volume de poros, afetando toda vida no interior do solo. Geralmente em solos compactados a porosidade total não é suficiente para suportar crescimento ótimo de raízes.

ROLOFF¹(1986) cita que a gama de tamanhos e formas dos poros é imensa, variando desde alguns milímetros de separação entre as partículas de argila, até vários centímetros das rachaduras formadas por dessecação ou túneis formados pela fauna do solo, e a distribuição do tamanho dos poros (DTP) geralmente é calculada entre umidade volumétrica e o potencial matricial (curva de retenção de umidade) em conjunção com a equação de capilaridade. O sistema poroso do solo pode ser dividido em microporosidade que corresponde ao poros de armazenamento e macroporosidade, que corresponde aos poros de transmissão e podem ser classificados segundo (BEVEN e GERMAN 1982, citado por ROLOFF 1986) conforme sua morfologia em:

- a) Poros formados pela fauna do solo, de forma predominantemente tubular e diâmetro variando de 1 à > 50 mm,
- b) Poros formados por raízes, também de forma tubular e com diâmetros e continuidade dependente da espécie e condições de para o desenvolvimento do sistema radicular,
- c) Rachaduras e fissuras formadas por secagem – molhamento e túneis naturais, formado pela ação erosiva do fluxo sub-superficial da água.

A porosidade de aeração é um fator determinante na produtividade do solo, uma vez que as raízes e a micro e meso-fauna são dependentes da troca de ar entre o solo e atmosfera. PREVEDELLO (1996) cita que a porosidade de aeração consiste em uma parte da porosidade total, descontada a porosidade ocupada pela solução do solo, a qual é a própria fração volumétrica da água (θ), e para o bom desenvolvimento das plantas a porosidade de aeração não deve ser menor que 10 % à 15 %, principalmente entre dois ou três dias após ocorrer chuva ou irrigação. BEETINGUER *et al.* (1994), a compactação pode persistir por longos períodos causando redução de crescimento de árvores localizadas próximos ou ao longo de áreas compactadas, os mesmos autores consideram ainda como produtividade inaceitável quando ocorre um aumento da

ROLOFF ¹, G. Monografia “Aspectos dinâmicos da estrutura de solos agrícolas e seu estudo. St. Paul, Minnesota, USA. Abril / 1986.

densidade do solo acima de 15% ou uma redução da macroporosidade acima de 50% quando comparada com área não afetada pelo tráfego.

Para o cálculo da porosidade total, é necessário primeiramente a determinação da densidade de partículas do solo ou massa específica das partículas do solo, feita através do método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1979).

A partir dos valores obtidos de densidade global do solo ou massa específica do solo seco (ρ_{ss}) e da densidade de partículas ou massa específica das partículas (ρ_p) poderemos obter a porosidade total (α) através da seguinte expressão, segundo PREVEDELLO (1996):

$$\alpha (\%) = (1 - \rho_{ss} / \rho_p) \cdot 100$$

A porosidade de aeração (α_{ar}), consiste no espaço poroso livre da solução do solo, livre da fração volumétrica da água (θ), e esta por sua vez é obtida através da umidade gravimétrica com a seguinte fórmula:

$$\theta (\%) = [U (\rho_{ss} / \rho_{ag.})] \cdot 100$$

Onde :

U = umidade gravimétrica (massa úmida – massa seca / massa seca)

ρ_{ss} = densidade do solo ou massa específica do solo seco g.cm^{-3}

$\rho_{ag.}$ = massa específica da água (1 g.cm^{-3})

Existem ainda outras metodologias para estudo de macroporosidade, e seus efeitos que podem ser determinados em laboratório ou campo, pouco utilizadas citadas por ROLOFF¹ (1986).

- Para determinação da macroporosidade em laboratório, podemos citar as seguintes metodologias: colunas indeformadas, água marcada com fluorescina

após equilíbrio; colunas indeformadas, solução eletrolítica fraca marcada com Cl ou trítium após equilíbrio; amostras deformadas, água marcada com deuterium para a determinação da auto difusão da água e colunas deformadas com e sem plantas, adição de água marcada com Cl, amostragem para distribuição de Cl em profundidade.

- Podemos ainda determinar a macroporosidade em campo através das seguintes metodologias: poros ativos corados por azul de metileno e forma mantida por gesso adicionado como suspensão, observação e medição visuais em pequenos incrementos de profundidade, infiltrabilidade de macroporos individuais e ainda adição de água marcada com Cl ou Br após o equilíbrio, amostragem para a distribuição de Cl em profundidade, que podem ser determinadas tanto em condições de campo ou laboratório.

2.2.3.3 Resistência mecânica do solo

Outro método de medição de compactação é a mensuração da resistência mecânica do solo à penetração. A grande vantagem desta técnica é a rapidez com que se pode obter grande número de mensurações, no entanto é altamente sensível ao teor de umidade na ocasião da medição (GOMES e PENA, 1996). Os efeitos da compactação no crescimento de raízes surgem através de uma complexa interação entre a resistência mecânica do solo, disponibilidade de água e nutrientes, e aeração. Por causa da compactação, juntamente com o aumento da resistência e decréscimo do volume de macroporos a velocidade de prolongamento de raízes é reduzida, limitando o comprimento de raízes (CORNS, 1988).

Em geral, a resistência mecânica aumenta com uma relação diretamente proporcional ao aumento da densidade do solo e com o decréscimo do conteúdo de água. Solos com valores entre 25 % à 50 % do conteúdo de argila apresentam os

maiores valores de resistência mecânica 4,0 à 5,5 MPa, sendo portanto considerado altamente compactado, e de 30 % à 60 % entre 1,0 à 2,0 MPa, para um nível de densidade moderada. A relação entre resistência mecânica e o nível de compactação do solo é fortemente influenciada pela umidade do solo, e os valores críticos para resistência mecânica fecham em 2 MPa, provocando sérias limitações para o desenvolvimento de raízes (ROLOFF ², 1986).

WARKOTSCH *et al.* (1994) avaliando o efeito do tráfego de “*forwarder*”, encontrou valores máximos de resistência a penetração de 2,6 MPa no tratamento de tráfego mais pesado, correspondendo a 30 passadas, e em condições naturais > 1 MPa. WHITMANN *et al.* (1997), ao avaliar a compactação causada pelo desbaste seletivo constatou na linha de tráfego um aumento na resistência a penetração de 1,0 MPa para 2,3 MPa. Ao avaliar o crescimento de *Eucalyptus grandis*, constatou que na faixa de 0 a 1,0 MPa, o desenvolvimento era bom à razoável e acima de 1 MPa já comprometia o desenvolvimento das mudas. Observou ainda que o aumento da resistência era crescente até a profundidade de 0,50 cm, tendendo a baixar a resistência conforme aumentava a profundidade, até estabilizar em torno de 1,0 à 1,5 MPa, em todos os tratamentos. Perdas em crescimento em torno de 30%, são mais expressivas nas áreas afetadas quando comparados com áreas onde não houve compactação, no entanto a magnitude destas perdas variam consideravelmente com a espécie plantada, material de origem do solo, condição do povoamento e severidade do dano.

Instrumentos de sondagem denominados penetrômetros ou penetrógrafos, determinam a resistência mecânica que o solo oferece a penetração, possibilitando quantificar, em profundidade o grau de compactação e, em consequência estimar a resistência que o solo oferece a penetração radicular. Segundo GOMES e PENA (1996), estes instrumentos são diferenciados em função do princípio de penetração e podem ser classificados como:

ROLOFF ², G. O tráfego de máquinas e suas implicações nas propriedades físicas do solo. Curso Intensivo de Plantio na Palha. Função ABC. 1986.

- Penetrógrafos estático ou convencional, onde a penetração da haste no solo se realiza por uma força contínua e a resistência que o solo oferece a penetração é medida por um dinamômetro e registrada em um traçador gráfico. A velocidade imprimida para a penetração da haste deve ser lenta e contínua, ligeiramente superior a resistência de ruptura do solo, as unidades de medida normalmente utilizadas são resistência de carga estática, ou seja, Kgf cm^{-2} ou MPa.
- Penetrômetro dinâmico ou de impacto, neste tipo de aparelho a haste penetra no solo através de um impacto de um peso que cai; de uma altura constante, em queda livre, por este princípio de ação também é conhecido como bate-estaca. A compactação é determinada a partir da relação estabelecida entre o número de impactos despendido e o comprimento da haste que penetra no solo e os resultados obtidos são normalmente expressos em número de impactos por decímetro.

Para maior praticidade, estes resultados devem ser transformados em resistência de carga estática, desta forma é possível dizer quantas unidades força o solo resiste para penetrar uma determinada profundidade. A equação holandesa, simplificada por STOLF (1990), apresenta uma aproximação razoável da resistência mecânica que o solo oferece a penetração sendo expressa da seguinte forma:

$$R = 5,6 + 6,89 N$$

Onde;

$$N = \text{número de impactos / dm}$$

2.2.3.4 Teor de umidade e textura do solo

A susceptibilidade de um solo sofrer compactação é fortemente influenciada pelo teor de umidade no momento do tráfego, e também pela composição granulométrica, distribuição e tamanho das partículas, conteúdo de matéria orgânica,

níveis de atividade biológica. Solos argilosos são mais susceptíveis à compactação, devido ao fato da argila promover o fenômeno de plasticidade ao substrato, aumentando a coesão entre as partículas, e em relação ao teor de umidade, quanto maior (próximo à capacidade de campo), mais severa será a compactação, pois nestas tensões os solos apresentam baixa resistência à erosão e estão mais sujeitos a compactação (OLIVEIRA *et al.*, 1998). BOWEN (1981) sugere valores generalizados para solos na sua capacidade de campo (teor máximo de água retido pelo solo, após saturação, cessado o movimento gravitacional) e de acordo com a classe textural a densidade do solo pode variar de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco argiloso até $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco arenosos. Em solos de textura média à argilosa, quando submetidos a uma dada pressão conhecida, em diferentes condições de umidade aumentava a compactação em aproximadamente 60%, quando comparado seco e úmido.

Para NAMBIAR (1996), operações de colheita efetuada em solos secos sofrem pouca ou nenhuma compactação. Aplicando uma pressão moderada no solo de 400 kPa, embora o solo esteja úmido resulta em um aumento da compactação de 60%. E este aumento pode elevar-se para 80% quando a mesma pressão é aplicada em solos molhados, isto não coincide com alguns solos derivados de granito e gnaiss, que são conhecidos por possuírem problemas com compactação severa, apesar de apresentarem relativamente alto teor de argila. Os minerais de argila tipo 1:1, apresentam diferenciação na compactação do solo devido ao óxido de ferro.

Solos florestais tendem a apresentar altos níveis de acidez e baixa atividade biológica quando oriundos de textura fina, tornando-o suscetível a degradação (HERBAUTS *et al.*, 1996). Para CLAYTON *et al.* (1987), as limitações no crescimento em virtude do aumento da densidade do solo são fortemente dependente da textura do solo. Solos com grande quantidade de partículas finas (silte + argila) podem apresentar menores limitações no crescimento devido a densidade do solo quando comparados a solos arenosos de textura grossa. WARKOTSCH *et al.* (1994),

ao trabalhar com solos de textura arenosa constatou efeitos da compactação em profundidades de 60 à 80 cm de profundidade devido ao tráfego de máquinas de extração. GRACEN e SANDS (1980) tem observado compactação na linha de tráfego em solos arenosos sob plantio de *Pinus radiata*, após 50 anos de uso.

Para SMITH *et al.* (1997), tanto a compactabilidade como a compressibilidade são influenciados por fatores externos, como a aplicação de pressão e fatores internos como a distribuição do tamanho das partículas do solo e do conteúdo de matéria orgânica. A compressibilidade é alta para solos de textura média onde a relação silte + argila encontra-se entre 50% e 75%. Solos com textura arenosa, em que a relação silte + argila é menor que 30%, são fortemente alterados em sua densidade, quando submetidos a uma aplicação de pressão. Em geral a fração silte + argila aumenta a compressibilidade e provoca o decréscimo da compactabilidade, formando um paradoxo, sendo solos com alta compactabilidade.

2.2.4. SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO

Para OLIVEIRA *et al.* (1998), o grau de erosividade de um solo é definido pela susceptibilidade que ele apresenta a erosão hídrica, em função de suas características como textura, mineralogia, teor de matéria orgânica, infiltração, entre outras. O fato da compactação do solo diminuir a taxa de infiltração e também modificar sua estrutura faz com que o solo torne-se mais susceptível à erosão. A redução da infiltração da água no solo aumenta o escoamento superficial (runoff) e como consequência aumenta a erosividade pela chuva por causa da maior quantidade de água que fica sobre o solo. A compactação do solo causada pela exploração não se restringe a perdas em produção, vem acompanhado de degradação do solo devido ao processo de erosão

(VOORKHEES, 1991, citado por WARKOTSCH *et al.*, 1994). McLEOD e HOFFMAN (1983), citam que o processo de compactação não só reduz a velocidade de crescimento e atrasam a regeneração como também reduzem a proteção da superfície do solo, induzindo estas áreas à erosão acelerada e oxidação da matéria orgânica. Para CONSTANTINI *et al.* (1997), a remoção da cobertura florestal resulta numa maior influência da pluviosidade na superfície do solo, induzindo a perdas por erosão ou lixiviação, promovendo anaerobiose, em alguns tipos de solo pode provocar o processo de impermeabilização de camadas pelo ferro, o grande acúmulo de turfa e aumento do intemperismo das rochas em conjunto com alterações no fluxo padrão e qualidade da água. Práticas que expõem o solo mineral, concentram e alteram o padrão de escoamento superficial do solo com maiores velocidades e riscos se a área for declivosa, durante a colheita e associado às excessivas perturbações provocadas pelo preparo do solo como remoção e queima de resíduos e a aração. SMITH *et al.* (1997) citam que o impacto gerado pelas operações de colheita incluem além da compactação do solo, da destruição da estrutura superficial do solo e do decréscimo de nutrientes devido a erosão e a remoção da biomassa, ocorre ainda um aumento da produção de sedimentos como resultado da erosão.

2.3 ESTIMATIVAS DE RECUPERAÇÃO

Para WORRELL e HAMPSON (1997), o conceito de sustentabilidade em relação a solos florestais tem sido amplamente explorado em relação aos impactos sofridos durante as operações de manejo. No entanto, a longo prazo não parece exceder a capacidade de recuperação por processos naturais; perdas por erosão não

parecem exceder a velocidade de formação do solo, a remoção de nutrientes não demonstra exceder a entrada de nutrientes, etc. A erosão do solo, remoção de nutrientes, compactação e alteração no conteúdo de matéria orgânica e no comportamento da água no solo, são identificados como processos muito importantes envolvendo impactos provocados pelo manejo utilizado e alguns impactos requerem regime de manejo intensivo para atender a capacidade de restabelecimento do solo. Alterações em solos florestais como resultado da implantação de floresta, podem ser subdivididos em resultados diretamente relacionado ao manejo de operações florestais, como erosão após as operações de colheita e cultivo e efeitos indiretos às operações de manejo como o processo de podzolização, resultado do restabelecimento por plantações de coníferas. CORNS (1988) o aumento da intensidade de manejo tem como meta aumentar a quantidade e a qualidade dos rendimentos alcançados pelos solos florestais, com isso os investimentos florestais concentram-se em melhorar a produtividade florestal na capacidade de sítio para produzir maiores rendimentos em respostas a práticas silviculturais intensivas.

A velocidade de recuperação vai depender do tipo de solo e o grau de compactação, solos argilosos com alto conteúdo de matéria orgânica são mais hábeis para recuperação (WORRELL e HAMPSON, 1997). O tempo estimado para recuperação, em estudos nos EUA, Nova Zelândia e Austrália, segundo WORRELL e HAMPSON (1997), foi de 5 a 15 anos após a extração, de 18 anos em caso de áreas de pátio e aproximadamente 40 anos ou mais em áreas de trânsito. Os mesmos autores citam ainda que deve se considerar a ocorrência da compactação natural em solos florestais podendo ser taxado como fator limitante, no entanto é resultado de um processo natural, decorrente de forças exercidas pelas árvores do solo acrescentada a expansão e crescimento de raízes provocando deslocamento de partículas e compactação do solo. DICKERSON (1976), observou que na linha de tráfego requer aproximadamente 12 anos para recuperar-se e a degeneração do cepo

aproximadamente 8 anos. HATCHELL *et al.* (1970) e HATCHELL e RALSTON (1971) constataram que não houve nenhuma recuperação após 1 ano em solos compactados durante a colheita com trator e auto-carregáveis em florestas de *Pinus taeda*, porém a baixa velocidade de recuperação é evidente nestes solos, sendo constatada por períodos de até 19 anos após a extração. Eles estimam 18 anos para recuperação entre linhas e cobertura de cepos.

HILDEBRAND e SHACK-KIRCHNER (1998) citam que as raízes precisam principalmente de água, nutrientes e oxigênio e que estes devem estar ao alcance do sistema radicular, não havendo interesse por parte das mesmas nas propriedades físicas do solo como densidade, porosidade e permeabilidade.

OLIVEIRA *et al.* (1998) citam algumas medidas de caráter preventivo, no processo de compactação do solo, como escolha de espécies com sistema radicular capaz de penetrar em solos compactados, aproveitamento de restos culturais e adubação orgânica, são alternativas que melhoram a estrutura e o teor de matéria orgânica do solo; o controle de tráfego, restringindo a movimentação de máquinas a uma menor área, fazendo com que estas realizem várias operações ao mesmo tempo e preferencialmente em épocas mais secas. Outras práticas mecânicas também podem ser usadas na recuperação de solos compactados como: aração, escarificação, gradagem, plantio direto, tratos culturais e a subsolagem. Esta tem sido muito utilizada como paliativo em situações de solos compactados e tem como objetivo reduzir a resistência mecânica do solo à penetração de raízes, aumentar a aeração e a infiltração do solo, devendo ser feita em época certa, para evitar que o subsolador forme uma camada compactada logo abaixo do seu raio de ação, formando “pé de grade”.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

O experimento foi conduzido na Fazenda Moreira, de propriedade da IGARAS – Papéis e Embalagens S/A, localizada no município de Otacílio Costa, região do planalto Sul do Estado de Santa Catarina, à 27° 25' de latitude e 50° 10' de longitude a oeste de Greenwich, com altitude média de 840 m acima do nível do mar.

O clima predominante na região é do tipo Cfb1: temperado brando, chuvoso com verão fresco segundo Köeppen, com precipitação média anual de 1.800 mm distribuídas com maior frequência nos meses de dezembro à março, e em menor quantidade nos meses de junho à agosto. A temperatura média anual é de 18° C, e as médias mínimas alcançadas foram de 7° C as médias máximas de 26° C. A umidade relativa do ar, no mês de coleta, foi de aproximadamente 90 %. Os dados de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos através de controle interno da empresa.

A geologia local compreende rochas sedimentares do grupo Guatá, formação Rio do Rasto, porção superior Membro Morro Pelado. Onde predominam folhelhos e siltitos, ocorrem também argilitos e arenitos em menor escala (MAPA GEOLÓGICO S.C.,1986). A avaliação dos perfis, abertos nas áreas de ensaio, classificam o solo como um Cambissolo álico, Tb, com horizonte A moderado, textura média à argilosa, fase floresta ombrófila mista, relevo regional e local predominantemente ondulado, com declividade de aproximadamente 25%.

3.2 TIPO DE COBERTURA DO SOLO

O talhão, onde foi conduzido o experimento, era constituído por um povoamento de *Pinus taeda* em primeira rotação, plantado em 1979 num espaçamento 2,00 m x 2,50 m, sob regime de manejo de corte raso aos 20 anos, e o volume de madeira com casca obtido na fazenda foi de 99.840 toneladas, com 589,3 toneladas por hectare, e o peso médio de 0,388 toneladas por árvore. A madeira consumida pela fábrica é de aproximadamente 3.000 toneladas ao dia, sendo utilizada para produção de papel tipo Kraft, papel miolo, caixas de papelão e sistemas de embalagens, com uma produção de 900 toneladas ao dia de papel.

3.3 SISTEMA DE COLHEITA ADOTADO

O sistema de colheita de madeira adotado pela empresa é o sistema fuste, madeiras longas, sendo mecanizado em aproximadamente 80% das áreas da empresa e os 20 % semi-mecanizado em situações de relevo íngreme onde a derrubada e o desgalhamento é feito com motosserras e o arraste com guinchos florestais nos locais acessíveis.

A máquina utilizada no ensaio para a operação de derrubada mecanizada, trata-se de um “*feller buncher*” de disco 22”, da marca HIDRO-AX, modelo 611EX, 4 x 4, com capacidade de carga do implemento é de 14,5 toneladas, sendo que a carga média é de 4 à 5 árvores, fazendo com que este peso atinja 17 toneladas, a carga é distribuídas 60% na parte traseira (motor) e 40% na dianteira (implemento). As

máquinas são usualmente equipadas com pneus 28L 26, que apresentam as seguintes características: capacidade de carga de 4.285 kg, largura da superfície rodante que varia de 0,69 m à 0,73 m, com pressão interna recomendada de 17 libras/pol² com garra tipo espinha.

As operações de arraste e estaleiramento com guinchos florestais nos locais inacessíveis, correspondem a aproximadamente 15% da área e com tratores carregadores skidders em 85 % da área. No ensaio utilizou-se um “skidder” com garra de arco simples, 4 x 4, marca TIMBERJACK, modelo 460, apresenta uma capacidade de carga por eixo de 12,4 toneladas, carrega em torno de seis à oito árvores elevando seu peso até 17 toneladas. A distribuição de carga por eixo, quando carregado é de aproximadamente 60% traseira (garra) e 40% dianteiro, operando com pneus 28L 26. Esta máquina também é responsável pelas operações de desgalhamento na área de grade.

3.4 DISPOSIÇÃO DO ENSAIO EM CAMPO

As atividades de campo tiveram início na primeira quinzena de julho de 1998 e foram executadas em duas etapas:

- uma área de simulação de tráfego em diferentes condições de umidade e
- uma área denominada de trabalho efetivo ou área de grade desgalhadora, a qual representa uma condição de solo considerada crítica para o sistema de colheita adotado, devido ao tráfego intenso tanto de máquinas como também de caminhões para o escoamento da produção.

3.4.1 SITUAÇÃO SIMULADA DE TRÁFEGO E UMIDADE

A condição simulada de tráfego e umidade foi desenvolvida em uma área delimitada de um talhão com aproximadamente 0,5 ha (100 m x 50 m), dividida em doze blocos, com quatro repetições para cada um dos três tratamentos de umidade.

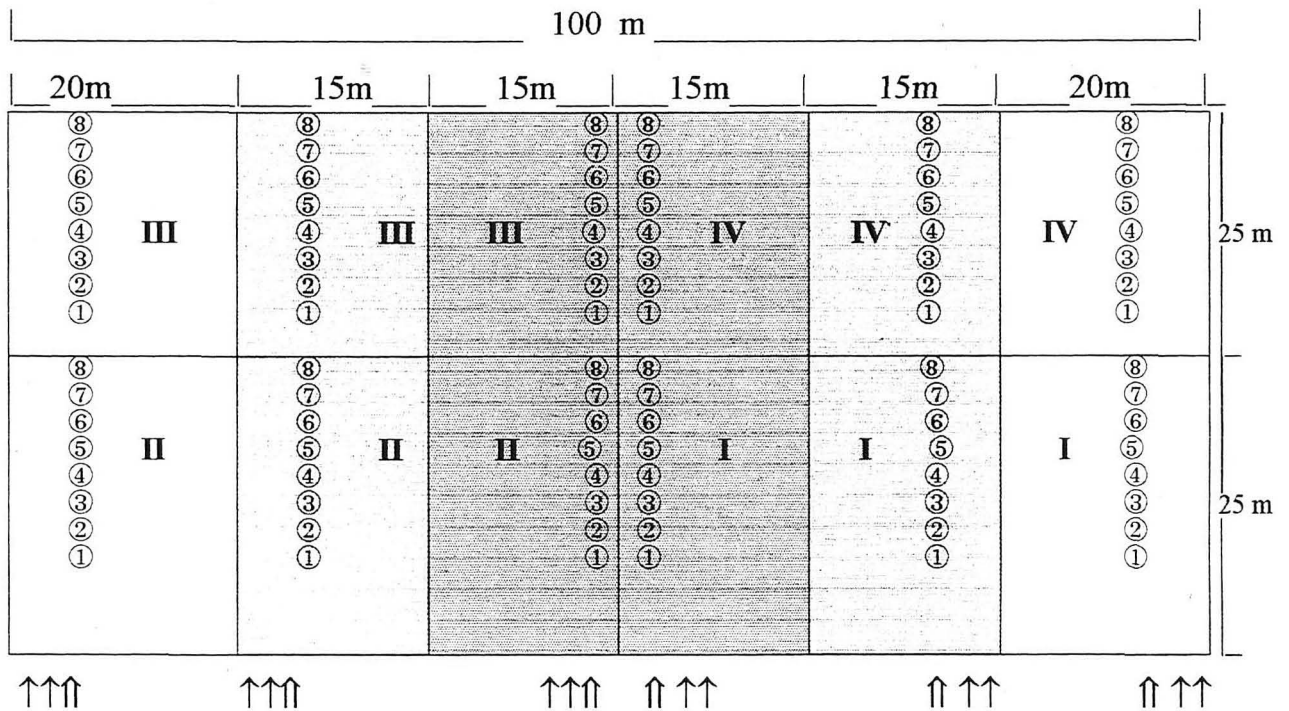
- Nas extremidades da área foram instalados os blocos referentes a condição natural de umidade, condição de campo com cerca de três dias sem chuva,
- Nas posições intermediárias à condição de campo, instalou-se os blocos para mensuração do tratamento de 30 mm, após chuvas ininterruptas de aproximadamente 30 mm,
- E na parte central da área foram instalados os blocos referentes ao tratamento de 60 mm que correspondia a chuvas ininterruptas de aproximadamente 30 mm, mais 30 mm de água adicionada ao solo através de carro-pipa, buscando condições aproximadas de 60 mm de chuva.

As mensurações de resistência mecânica, densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração foram efetuadas a partir da terceira fileira de corte de árvores, buscando obter a melhor configuração do rodado, para mensuração dos tratamentos de tráfego, nas posições rodado e fora do rodado. Em uma porção intermediária entre os dois blocos (I e IV e II e III), foram avaliados ainda o teor de umidade do solo durante os tratamentos de tráfego, antes de cada tratamento de tráfego, para posterior comparação com a umidade do solo na capacidade de campo.




A metodologia utilizada para determinação da umidade do solo na capacidade de campo segue a recomendação da EMBRAPA (1979), que consiste na avaliação da umidade volumétrica do solo saturado, submetido a uma pressão de 0,1 Bar, através do uso de extrator de umidade com placas de Richards ou mesa de tensão. A umidade volumétrica neste ponto de pressão deverá ser dividida pela massa específica do solo

seco à 105 °C. O valor de umidade obtido representará 80 % da umidade do solo, ou seja a umidade do solo na capacidade de campo.

FIGURA 1 – DISPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS, POR LINHA DE CORTE DE ÁRVORES DENTRO DO TALHÃO, NA ÁREA DE SIMULAÇÃO:



Onde:

-  - Tratamento condição natural,
-  - Tratamento 30 mm,
-  - Tratamento 60mm,

↑ - Sentido da linha de tráfego, no momento do corte,

↑↑ - Linha de referência, onde foram delimitados os tratamentos de tráfego,

I, II, III e IV - Blocos,

①, ②, ③... - Mensurações dos tratamentos de tráfego.

Em cada tratamento de umidade foram efetuados os diferentes níveis de tráfego, que consistiam em passadas de máquinas, efetuadas de forma cumulativa da seguinte maneira:

- ⇒ Tratamento 1 (1.0 - 1 passada de “feller – buncher”),
- ⇒ Tratamento 2 (1.1 - 1 “ “ ” + 1 passada de “skidder”),
- ⇒ Tratamento 3 (1.2 - 1 “ “ “ + 2 passadas de “ “),
- ⇒ Tratamento 4 (1.3 - 1 “ “ “ + 3 “ “ “ “ “),
- ⇒ Tratamento 5 (1.6 - 1 “ “ “ + 6 “ “ “ “ “),
- ⇒ Tratamento 6 (1.9 - 1 “ “ “ + 9 “ “ “ “ “),
- ⇒ Tratamento 7 (1.12 - 1 “ “ “ +12 “ “ “ “ “),
- ⇒ Tratamento 8 (1.15 - 1 “ “ “ +15 “ “ “ “ “).

3.4.2 ÁREA DE TRABALHO EFETIVO NA GRADE DESGALHADORA

Para avaliação desta etapa do trabalho, foi escolhida uma área de grade desgalhadora mais próxima ao experimento, e que apresentasse características de solo semelhantes à área de simulação em relação às condições de relevo, drenagem, textura, etc.

Algumas características da área de grade desgalhadora, representada nas figuras 2 e 3, ilustram a forma de desgalhamento de árvores que são introduzidas na grade, propiciando uma concentração de galhos e acículas no local de desgalhamento, que são espalhadas no local. A intensidade de tráfego de máquinas nesta área durante a operação de desgalhamento é expressiva, no entanto esta camada de galhos e acículas reduz o efeito do tráfego, onde a pressão exercida pela máquina é distribuída sobre a galhada e não diretamente sobre o solo.

FIGURA 2 – DISPOSIÇÃO DA GRADE PARA OPERAÇÃO DE DESGALHAMENTO NA ÁREA DE GRADE:



FIGURA 3 – CONCENTRAÇÃO DE GALHOS E ACÍCULAS NA ÁREA DE TRABALHO DA GRADE DESGALHADORA:

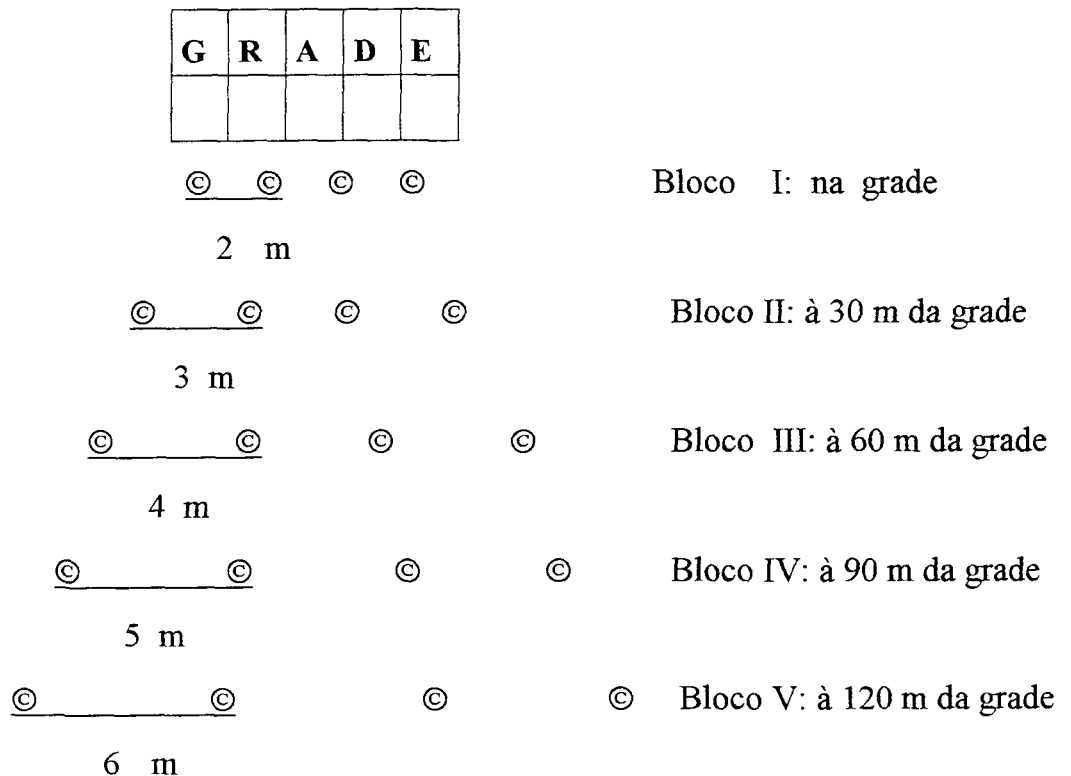


Nesta área instalou-se cinco blocos, que eram compostos por quatro redes de pontos para mensuração para resistência mecânica e duas coletas de amostras indeformadas de solo para determinação da densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração. A distância entre redes variou em cada bloco, a medida em que se distanciava da grade buscando maior representatividade na amostragem, sendo:

- Primeiro bloco instalado na grade desgalhadora, as redes de pontos eram distantes em dois metros umas das outras;
- Segundo bloco ou a trinta metros com distância entre redes de três metros;
- Terceiro bloco ou a sessenta metros e equidistância de quatro metros;
- Quarto bloco ou a noventa metros e equidistância de cinco metros por rede e
- Quinto bloco ou a cento e vinte metros de distância da grade desgalhadora, a distância entre redes era de seis metros.

A disposição das redes de pontos encontram-se descritas na figura 4.

FIGURA 4 – DISPOSIÇÃO DO ENSAIO E PONTOS DE AMOSTRAGEM NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA:



3.5 MATERIAIS UTILIZADOS

A resistência mecânica do solo à penetração foi medida através de penetrógrafo de marca EIJKELKAMP, uma amostra dos gráficos obtidos encontram-se no anexo 7, e a superfície da base do cone utilizada foi de 2 cm² com penetração até a profundidade de 75 cm. As leituras na posição do rodado foram corrigidas com base na superfície original do solo, descontado-se a profundidade do sulco.

As coletas de solo foram feitas através de anéis volumétricos, de volume conhecido, e as amostras não deformadas, foram utilizadas para determinação da densidade do solo, porosidade total, porosidade de aeração do solo e teor de umidade do solo na capacidade de campo, através de mesa de tensão.

3.6 METODOLOGIA

Nas duas áreas avaliadas foram feitas classificação de perfis de solo, com avaliação da fertilidade e granulometria do solo, mensurações de resistência mecânica do solo, densidade do solo, porosidade total do solo e porosidade de aeração do solo.

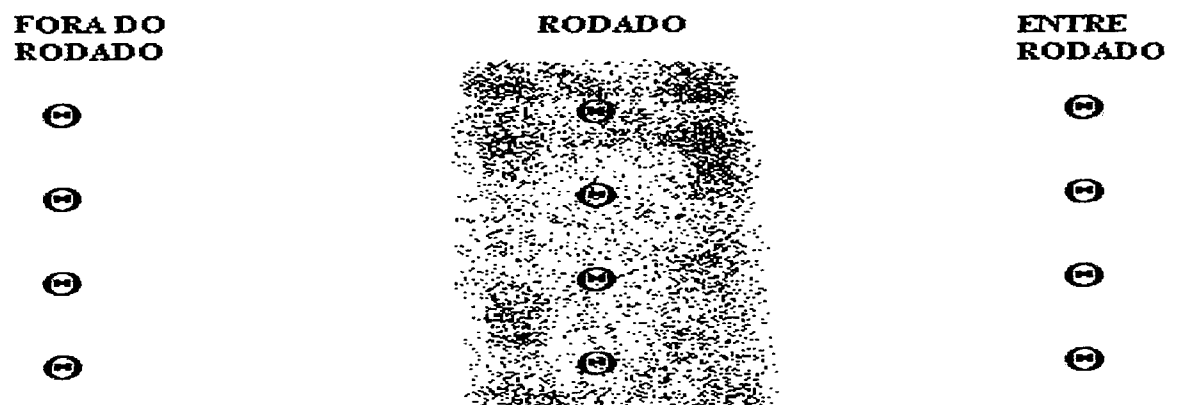
Para determinação da resistência mecânica do solo à penetração foram instaladas rede de pontos nas duas áreas avaliadas. Estas redes eram compostas por três linhas com quatro pontos de medição de resistência mecânica equidistantes em um metro, num total de doze mensurações de resistência mecânica por rede.

Na área de simulação de tráfego e umidade, estas redes de pontos foram instaladas em cada tratamento de tráfego, em cada um dos quatro blocos submetidos

aos três níveis de umidade controlada. Cada linha de medição era composta de quatro pontos para medição da resistência mecânica do solo à penetração, que correspondia a uma posição (rodado, entre rodado e fora do rodado) na rede de pontos. Na posição do rodado, os valores de resistência mecânica foram corrigidos considerando-se a profundidade do sulco, utilizando como referência a superfície do solo não afetada pelo tráfego.

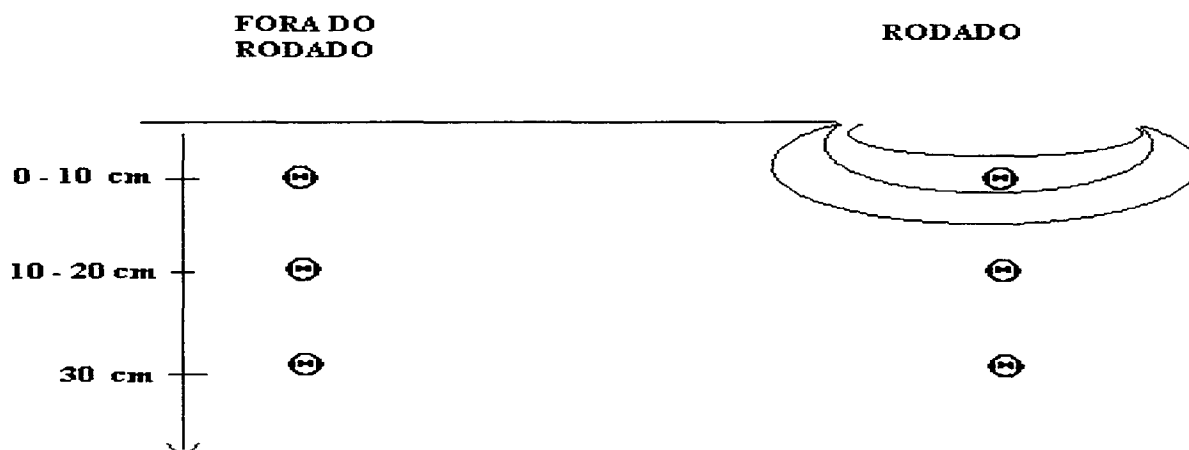
A disposição da rede de pontos para mensuração da resistência mecânica na área de simulação segue descrito na figura 5.

FIGURA 5 – REDE DE PONTOS DE AMOSTRAGEM PARA MENSURAÇÕES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA NAS POSIÇÕES AVALIADAS PARA A ÁREA DE SIMULAÇÃO:



Para determinação das demais propriedades físicas do solo como: densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração, foram coletadas amostras não deformadas de solo tanto na área de simulação como na área de grade desgalhadora, através de anéis volumétricos em três profundidades de 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm. Na área de simulação as medições foram efetuadas em duas posições: rodado e fora do rodado, conforme figura 6, para cada rede de pontos instalada nos diferentes tratamentos de tráfego e umidade, nos quatro blocos inseridos na área de simulação.

FIGURA 6 - PROFUNDIDADE DE COLETA DE SOLO, PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE TOTAL E POROSIDADE DE AERAÇÃO, NA ÁREA DE SIMULAÇÃO:



Na área de grade desgalhadora, foram instaladas quatro redes com 12 pontos por bloco para mensuração da resistência mecânica do solo, a distância entre redes variou em cada um dos cinco blocos, a medida em que se distanciava da grade desgalhadora, conforme a disposição do ensaio para esta área, apresentado na figura 2. A coleta de solo foi feita em 2 repetições e nas três profundidades anteriormente citada, de forma aleatória, uma vez que não foi possível identificar diferentes posições de rodado dentro das rede de pontos, nesta área.

Para identificação dos tipos de solos trabalhados foram abertos e classificados perfis nas duas áreas do ensaio, sendo dois na área de grade e um na área de simulação. A metodologia para determinação das características químicas e físicas das amostras de solo coletadas nos perfis seguem as recomendações da EMBRAPA (1979), e os resultados destas análises encontram-se descritos nos anexos 4 e 5 para a área de simulação de tráfego e umidade, e no anexo 6 para a área de grade desgalhadora. As amostras indeformadas de solo, coletadas durante os tratamentos, foram submetidas a análise em laboratório para determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico, a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico, a capacidade de campo através de mesa de tensão (0,1 Bar) e avaliação

granulométrica pelo método da pipeta, que também seguem as recomendações da EMBRAPA (1979). A porosidade total e a porosidade de aeração, foram determinadas conforme PREVEDELLO (1996).

Os valores de umidade gravimétrica do solo no momento da amostragem foram submetidos a análise de regressão linear, para avaliar a interferência da umidade no momento do tráfego, para os resultados de resistência mecânica do solo à penetração, considerando-se até a profundidade de 40 cm. Descartado o efeito da umidade do solo no momento do tráfego, os resultados dos parâmetros físicos obtidos foram submetidos a análise estatística utilizando o método no quadrado mínimo ponderado e teste de Tukey para os fatores que apresentaram diferenças significativas. A avaliação estatística foi efetuada pelo programa de gráficos e estatística SYSTAT (SYSTAT for WINDOWS), considerando-se uma probabilidade de 95 %.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os três perfis abertos nas duas áreas amostradas caracterizaram o solo como sendo: CAMBISSOLO ÁLICO, Tb, horizonte A moderado, com textura média para o perfil aberto na área de simulação, conforme anexo 1, e textura argilosa para os perfis abertos na área de grade, descrito nos anexos 2 e 3. Os três perfis avaliados apresentam predominância dos substratos siltitos e argilitos, folhelhos do sub-grupo Rio do Rasto. Cambissolo é um tipo de solo bastante representativo na região, permitindo uma variação muito grande nas características pedogenéticas, que foram constatados nos perfis avaliados, com diferenças significativas em alguns parâmetros como profundidade, cor, textura, estrutura, consistência e conteúdo de carbono orgânico.

Os resultados referentes a análise de fertilidade do solo, não apresentaram variações significativas entre os perfis avaliados apresentando em comum as seguintes características: baixa CTC ($T < 24$), baixo grau de saturação de bases ($V < 50\%$), altos teores de alumínio ($M > 50\%$), solos ácido com pH entre 3,5 e 4,0, argila de baixa atividade. Foram constatados ainda a presença de minerais de argila do tipo 2:1, expansível.

4.1 SITUAÇÃO SIMULADA DE TRÁFEGO E UMIDADE

Os blocos instalados nesta área não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si, para as propriedades físicas avaliadas: resistência mecânica,

densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração. No entanto a análise granulométrica, classificada de acordo com a escala proposta pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSC), foram constatadas algumas diferenças texturais entre os blocos e nas profundidades avaliadas, que estão descritos no anexo 4:

- 0-10 cm, apresentou textura franco argilosa nos quatro blocos,
- 10-20 cm, nesta profundidade houve uma variação textural entre os blocos, com predominância da textura franco argilosa para os blocos II e III, argilosa no bloco I e franco no bloco V,
- 20-30 cm, apresentou predominância da textura argilosa, exceto no bloco II que manteve em toda profundidade avaliada a textura franco argilosa.

O teor de umidade do solo no momento da amostragem é um fator que altera sensivelmente o comportamento da resistência mecânica do solo à penetração, portanto nesta área foram feitas determinações da umidade gravimétrica do solo todos os dias durante a execução do ensaio. As amostragens foram feitas entre os blocos I e IV e blocos II e III, nas mesmas profundidades anteriormente citadas, para cada nível de tráfego efetuado nos diferentes tratamentos de umidade.

A umidade do solo na capacidade de campo, determinada em laboratório considerando-se uma pressão de 0,1 Bar, neste este tipo de solo variou de 22,4 % em condições naturais de umidade chegando à 38,1 %, no tratamento de 60 mm. Os valores médios de umidade gravimétrica do solo no momento da amostragem apresentaram uma variação de 12,1 % em condições naturais de umidade, chegando à 22,7 % no tratamento de 60 mm. Como pode se constatar, a umidade do solo no momento da amostragem encontra-se abaixo da capacidade de campo em todos os tratamentos de umidade. Os dois tratamentos de maior umidade não foram suficiente para que o solo atingisse o ponto ideal para compactação. Um dos fatores que interferiram nestes resultados se deve ao fato que o experimento foi instalado em campo numa época de baixos índices de precipitação, e as chuvas ocorrentes não

chegaram a molhar o solo suficientemente para que ele atingisse a sua capacidade de campo. O tratamento de 60 mm apresentou algumas limitações tanto na forma de distribuição da água no solo, que não teve a mesma intensidade nem a distribuição de uma chuva natural, considerando-se que parte do tratamento foi feita através de carropipa. A declividade da área foi outro fator que colaborou com o escoamento superficial da água, não permitindo que ela infiltrasse no solo. Os resultados da avaliação da umidade encontram-se descritos na tabela 1.

TABELA 1 – CAPACIDADE DE CAMPO E TEOR DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA NO SOLO, NA OCASIÃO DO TRÁFEGO:

NÍVEIS DE TRÁFEGO / TRATAM.	BLOCOS I e IV (%)			BLOCOS II e III (%)		
	0-10 cm - U _{cc}	-10-20 cm - U _{cc}	20-30 cm - U _{cc}	0-10 cm - U _{cc}	10-20 cm - U _{cc}	20-30 cm - U _{cc}
0-1 / C. Nat.	14,0 – 28,7	13,3 – 29,7	13,7 – 26,0	15,4 – 22,5	15,4 – 22,4	15,2 – 28,0
2-4 / C. Nat.	13,9 – 25,3	13,3 – 25,4	13,4 – 28,7	15,3 – 24,2	15,1 – 29,6	15,0 – 31,9
5-6 / C. Nat.	13,2 – 28,4	12,9 – 26,9	13,0 – 25,6	14,6 – 25,9	14,5 – 27,0	14,1 – 26,0
7-8 / C. Nat.	12,6 – 27,1	12,1 – 24,4	12,7 – 24,5	14,5 – 26,9	14,4 – 28,4	13,8 – 29,2
0-1 / 30 mm.	17,0 – 29,1	16,8 – 32,6	16,8 – 32,1	17,9 – 29,0	17,8 – 30,1	17,8 – 32,4
2-4 / 30 mm.	16,9 – 29,2	16,8 – 35,5	16,6 – 36,3	17,8 – 31,5	17,7 – 34,2	17,7 – 34,1
5-6 / 30 mm.	16,7 – 36,3	16,5 – 38,5	16,5 – 34,6	17,7 – 30,5	17,4 – 32,4	17,4 – 33,8
7-8 / 30 mm.	16,5 – 35,2	16,1 – 37,3	16,4 – 36,2	17,7 – 32,6	17,3 – 35,9	17,2 – 28,2
0-1 / 60 mm.	19,3 – 27,6	18,8 – 32,0	18,3 – 31,7	22,7 – 34,4	21,7 – 32,7	19,9 – 34,0
2-4 / 60 mm.	19,0 – 34,5	18,7 – 37,1	18,2 – 36,	22,5 – 37,2	20,3 – 36,7	19,8 – 33,4
5-6 / 60 mm.	18,6 – 33,0	18,5 – 37,1	18,1 – 33,1	21,8 – 38,1	20,1 – 35,9	19,5 – 37,1
7-8 / 60 mm.	18,5 – 29,1	18,4 – 30,1	18,0 – 28,0	21,8 – 36,6	20,0 – 37,0	19,1 – 33,1

U_{cc}* = Umidade do solo na capacidade de campo (%)

Na profundidade de 0-10 cm, foram constatadas diferenças entre os dois primeiros tratamentos de umidade que representou um aumento da umidade do solo de 21,8 %. Ao comparar os tratamento condições naturais com 60 mm, constatamos um aumento de 44,9 %, e a diferença entre os tratamentos de 30 mm de chuva e 60 mm representou um aumento de 19 % na umidade do solo.

Na profundidade de 10-20 cm, a variação da umidade do solo entre os dois primeiros tratamentos foi de 23,0 %. Quando comparada à 60 mm atingiu 41,1 %, entre os maiores valores de umidade constatou-se que o aumento foi de 14,7 %.

Na profundidade de 20-30 cm, o aumento da umidade entre os dois primeiros tratamentos foi de 23,0 %, em condições de 60 mm chegou à 35,9 %, e um aumento de 10,5 %, entre os tratamentos de maior umidade.

Para avaliar os efeitos dos diferentes níveis de umidade no comportamento da resistência mecânica do solo à penetração, densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração do solo, efetuou-se o teste de Tukey que apresentou os seguintes resultados, desconsiderando o fator profundidade:

TABELA 2 - TESTE DE TUKEY PARA OS TRÊS TRATAMENTOS DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO AVALIADAS:

TRATAMENTOS	DENSIDADE DO SOLO			POROSIDADE TOTAL			POROSIDADE DE AERAÇÃO		
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
	C. N.	1,25a	1,23a	1,21a	49,2a	45,3a	53,0a	7,9a	7,4a
30 mm	1,16b	1,11b	1,12b	54,4b	55,8b	55,9b	10,3b	10,6b	11,1b
60 mm	1,29a	1,23a	1,23a	55,9b	55,9b	56,4b	10,8b	10,3b	10,2b

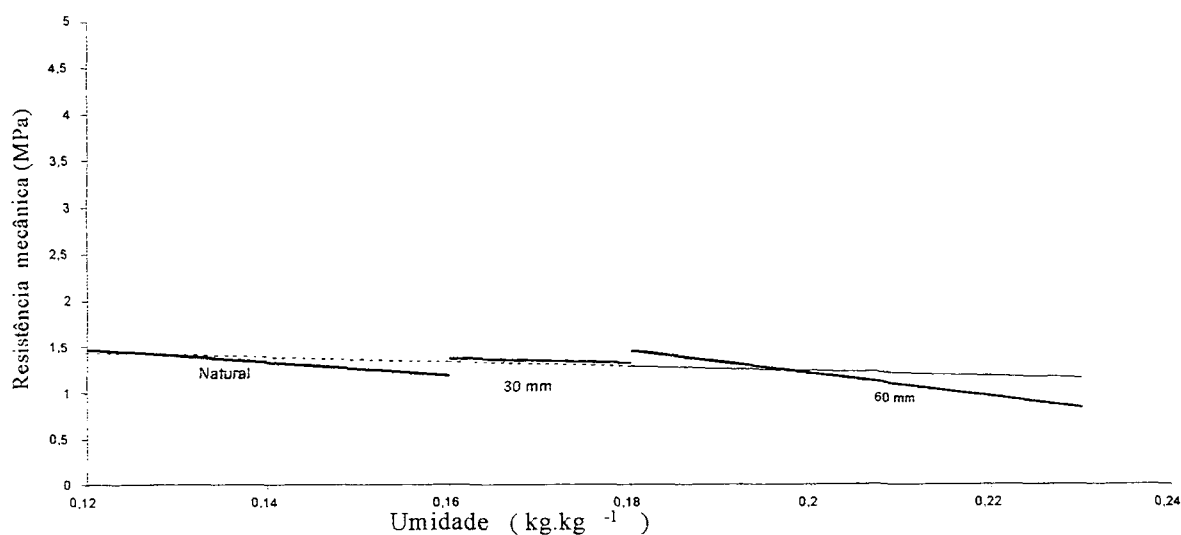
* Tratamentos seguidos pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey, a 5%.

Os tratamentos de umidade mantiveram o mesmo comportamento em quase todos os parâmetros físicos avaliados, com os piores resultados para densidade do solo, porosidade total e porosidade de aeração encontrados em condição natural de umidade, exceto na densidade do solo que apresentou valores estatisticamente semelhantes nos tratamentos condição natural e 60 mm, com maiores densidades observadas na profundidade de 0-10 cm. Não foi constatado diferenças significativas entre os parâmetros de porosidade total e porosidade de aeração avaliados nos tratamentos de maior umidade, 30 mm de chuva e 60 mm.

4.1.1 Resistência mecânica do solo à penetração (MPa), em área de simulação

Os valores de resistência mecânica à penetração na área de simulação, de uma profundidade compreendida entre 5 à 40 cm, foram submetidos à análise de regressão linear para averiguação da interferência da umidade gravimétrica do solo no momento do tráfego. Os resultados obtidos através da análise encontram-se descritos na figura 7:

FIGURA 7 – REGRESSÃO LINEAR DA UMIDADE NO MOMENTO DA AMOSTRAGEM DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO:



A análise de regressão linear demonstrou que os ângulos formados pelas retas não foram estatisticamente diferente de zero, portanto a umidade gravimétrica do solo não afetou de forma significativa os resultados de resistência mecânica por tratamento de umidade e nem para o conjunto de resultados. O período em que foram feitas as amostragens corresponde a época de baixa demanda de evapotranspiração, não havendo portanto a necessidade de corrigir os valores de resistência mecânica do solo para uma mesma umidade padrão.

Sem a interferência da umidade gravimétrica do solo no momento da amostragem, os valores de resistência mecânica do solo (Anexo 7) foram compilados pelo programa de análise estatística e gráficos (SYSTAT), com a finalidade de calcular a área afetada pela compactação do solo através dos gráficos de isoresistência (Anexo 8). Através dos resultados obtidos pelos gráficos de isoresistência foi possível determinar na posição rodado, a área afetada pela compactação no perfil do solo até uma profundidade de 120 cm, considerando-se dois níveis de resistência mecânica à penetração:

- Valores de resistência mecânica do solo superiores à 1 MPa, sendo considerado como compactação moderada para solos de textura argilosa, podendo apresentar limitações ao desenvolvimento de raízes de algumas espécies e
- Valores de resistência mecânica do solo superiores à 2MPa, valores de resistência mecânica altamente restritivo a penetração, ramificação e crescimento de raízes.

A análise de variância das áreas compactadas, considerando-se valores de resistência mecânica superiores a 1 MPa, encontram-se descritos na tabela 3.

TABELA 3 - ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO PARA ÁREAS COMPACTADAS NOS VALORES SUPERIORES A 1 MPa:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Umidade	0.133	2	0.067	0.261
Tráfego	1.887	8	0.236	0.000
Umid x Tráf.	0.470	16	0.029	0.873
Resíduo	3.946	81	0.049	

A avaliação estatística da área compactada no perfil do solo, para valores de resistência mecânica do solo superiores à 1 MPa, considerou como variáveis os três tratamentos de umidade e os oito níveis de tráfego. Os resultados da análise de variância sugerem que a área afetada pela compactação para estes valores de resistência mecânica é fortemente influenciada pela intensidade de tráfego, onde os maiores efeitos ocorrem durante as primeiras passadas de máquina, alterando sensivelmente o comportamento do solo. Constatou-se ainda que a umidade não teve influência significativa no aumento da área compactada para os valores de resistência mecânica do solo acima de 1 MPa. O tráfego de máquinas neste tipo de solo é responsável pelo aumento da área compactada no perfil do solo em valores de resistência mecânica do solo superiores à 1 MPa, independente da condição de umidade em que foi executada a operação.

Foram submetidos a análise de variância as áreas compactadas, por valores de resistência mecânica superiores a 2 MPa, e os resultados encontram-se descritos na tabela 4.

TABELA 4 - ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO A PENETRAÇÃO PARA ÁREAS COMPACTADAS NOS VALORES SUPERIORES À 2 MPa:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Umidade	0.701	2	0.350	0.001
Tráfego	0.342	8	0.043	0.499
Umid x Tráf.	1.464	16	0.091	0.024
Resíduo	3.734	81	0.046	

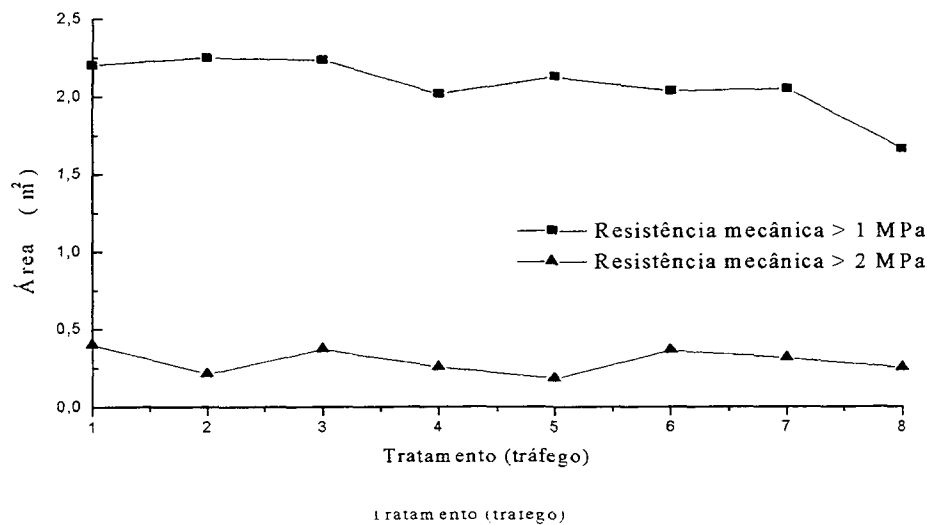
Na avaliação estatística da área compactada em valores de resistência mecânica superiores à 2 MPa, foi utilizado o mesmo critério anterior para áreas acima de 1 MPa. Para este nível de resistência podemos constatar através da análise de variância que a condição de umidade do solo durante o tráfego age de forma significativa no aumento da área afetada pela compactação no perfil do solo, considerando-se valores de resistência superiores à 2 MPa. Observou-se ainda que a intensidade do tráfego não aumenta a área compactada em valores acima de 2 MPa, isto é não foi constatado aumento significativo após as primeiras passadas de máquina, como foi constatado em áreas com resistência mecânica superiores à 1 MPa. Se o tráfego é o principal responsável pelo aumento da área compactada em valores de resistência mecânica superiores à 1 MPa, o mesmo tráfego efetuado em condições adversas de umidade pode provocar um aumento da área compactada no perfil do solo, em valores de resistência superiores à 2 MPa.

A interação entre umidade e tráfego sugere ainda que estes fatores estão interagindo no processo de compactação do solo para valores de resistência mecânica superiores à 2 MPa. Devemos também considerar a variabilidade do solo, bastante

pronunciada nos perfis avaliados, e a variabilidade da redistribuição da água no solo após a chuva ou adição de água, uma vez que cambissolos apresentam drenagem interna heterogênea, tanto em relação a textura como na estrutura.

A seguir serão explicitados o comportamento da resistência mecânica do solo para os dois níveis avaliados (> 1 MPa e > 2 MPa) e a área compactada pelo rodado, considerando a profundidade corrigida com base na superfície do solo, para os diferentes tratamentos de tráfego e umidade.

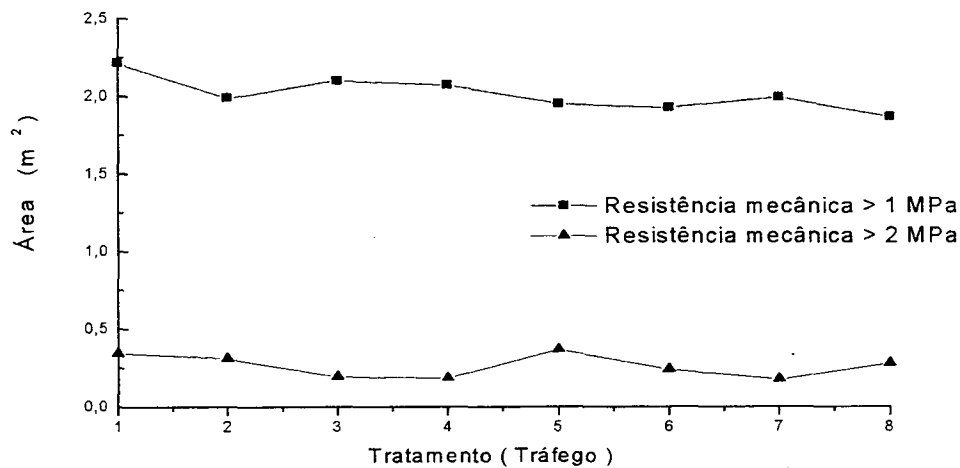
FIGURA 8 - COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE, AVALIAÇÃO DA ÁREA COMPACTADAS ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO:



Em condições naturais de umidade (Figura 8) constatou-se que houve um aumento significativo da área compactada no perfil do solo, ocorrendo principalmente durante as primeiras passadas de máquinas, principalmente para os valores de resistência mecânica superiores à 1 MPa.

Os valores de área compactada nos dois níveis de resistência mecânica avaliados para cada tratamento de tráfego, nos permite estimar a compactação causada pelos sistema de colheita adotado por hectare, para um povoamento de *Pinus sp.* com

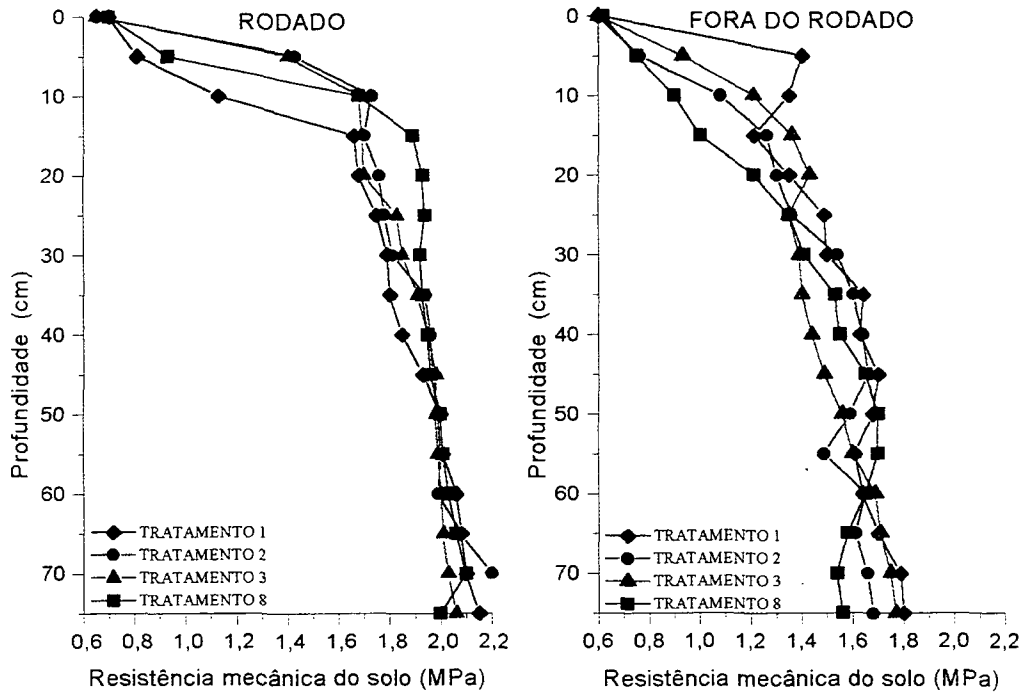
FIGURA 10 - COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM CHUVA DE 30 mm, AVALIAÇÃO DAS ÁREAS COMPACTADAS ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO:



Na área afetada pela compactação em condições de 30 mm de chuva (Figura 10) foi constatado uma redução da área afetada pela compactação no perfil do solo, para os dois valores de resistência mecânica avaliados, quando comparados a condição natural de umidade. O primeiro tratamento de tráfego também apresentou o maior volume de solo afetado pela compactação no perfil do solo, chegando a compactar 74,3 % do volume de solo compactado em valores de resistência mecânica superiores à 1 MPa, que apresenta limitações para o desenvolvimento de algumas espécies e 10 % deste volume de solo foi afetado por resistência mecânica do solo acima de 2 MPa.

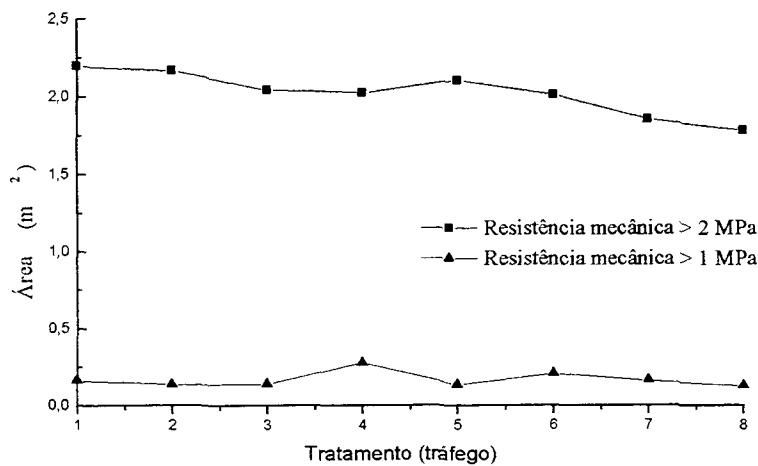
A profundidade de ocorrência das áreas comprometidas com compactação severa começa a aparecer a partir de 40 cm (Figura 11) para este tratamento de umidade, no entanto podemos observar que mesmo sem o efeito do tráfego a densidade do solo aumenta de $1,4 \text{ g.cm}^3$ para $1,8 \text{ g.cm}^3$, a partir de 20 cm de profundidade, demonstrando que o solo apresenta uma tendência natural a compactação, seja pelas características da cultura ou pelo tipo de solo.

FIGURA 11 - PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DAS ÁREAS COMPACTADAS PARA QUATRO NÍVEIS DE TRÁFEGO EM 30 mm DE ÁGUA



Em adição de 60 mm de água (Figura 12), houve um comportamento semelhante ao tratamento anterior em relação a área afetada pela compactação.

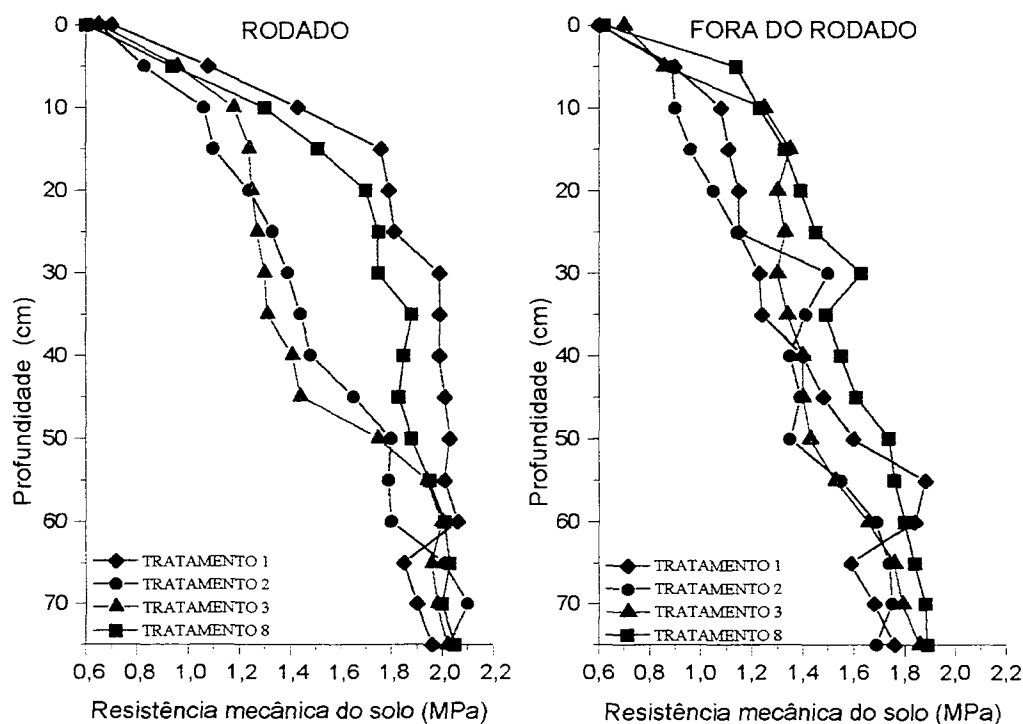
FIGURA 12 - COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA, AVALIAÇÃO DAS ÁREAS COMPACTADAS ACIMA DE DETERMINADOS VALORES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO:



O tratamento de 60 mm corresponde à aproximadamente 33 mm de chuva + adição de água até atingir uma umidade equivalente a 60 mm. Neste tratamento foi observado uma redução significativa da área afetada pela compactação no perfil do solo, quando comparado aos outros tratamentos de umidade. Os valores de resistência mecânica do solo superior à 2 MPa, corresponderam à 7,0 % durante o primeiro tratamento de tráfego, e manteve o mesmo volume de solo compactado encontrados nas duas outras condições de umidade para valores de resistência mecânica superior à 1 MPa, ou seja, 74,3 % do volume de solo afetado. A área comprometida pela compactação acima de 2 MPa variou de 3,3 % à 8,3 %, representando o menor volume de solo afetado pela compactação no perfil avaliado.

A profundidade de ocorrência de áreas compactadas neste tratamento de umidade (Figura13) foi a partir de 30 cm, este tratamento apresentou as melhores condições para esta propriedade física.

FIGURA 13 - PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DAS ÁREAS COMPACTADAS PARA QUATRO NÍVEIS DE TRÁFEGO EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA



Ao se comparar os tratamentos de umidade deve-se considerar que não foi atingido o ponto ideal para compactação do solo (umidade do solo na capacidade de campo), portanto o volume de solo afetado pela compactação severa pode ser maior e comprometer a produtividade do sítio devido a problemas gerados pela compactação do solo se as mesmas operações forem efetuadas na capacidade de campo.

Neste ensaio onde a umidade do solo variou de 12,1 % a 22,7 %, o maior volume de solo afetado pela compactação severa foi encontrado no tratamento que apresentou o menor teor de umidade, e as melhores condições quando o teor de umidade do solo apresentou-se na faixa de 16,1% a 22,7%, abaixo da capacidade de campo para os tratamentos de umidade avaliados, que para este tipo de solo variou de 22,4 % à 38,1 %.

O aumento da resistência mecânica em maiores profundidades, que também é observado na posição fora do rodado, esta associado com as características da cultura, como concentração de raízes encontradas em profundidades de 20 cm à 100 cm, como também devido a fatores de origem pedogenética, como a linha de pedras encontrada em profundidade de 80 cm à 120 cm, devido a sobreposição de horizontes encontradas no perfil durante a classificação deste solo.

Os resultados das demais propriedades físicas do solo avaliadas em laboratório, como a densidade do solo (ρ_{ss}), porosidade total (α) e porosidade de aeração (α_{ar}), foram submetidos a análise estatística, considerando-se as variáveis: oito níveis de tráfego, três níveis de umidade e duas posições.

4.1.2 Densidade do solo (ρ_{ss}), na área de simulação

Os tratamentos de umidade e tráfego foram submetidos a análise de variância, para averiguação do efeito dos diferentes tratamentos na densidade do solo em três

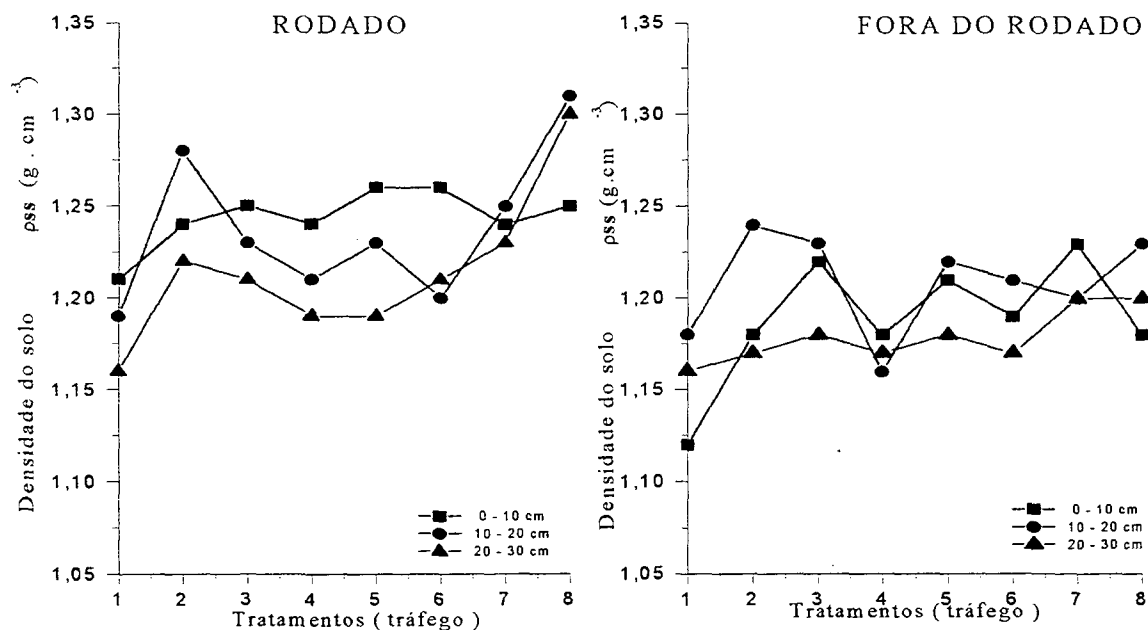
profundidades 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Os valores do Teste “F” das variáveis intensidade de tráfego, níveis de umidade e ocorrência do tráfego, avaliadas em profundidade seguem descritos na tabela 5:

TABELA 5 – NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE “F” PARA A VARIÁVEL DENSIDADE DO SOLO NAS TRÊS PROFUNDIDADES AVALIADAS:

VARIÁVEL	0 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 30 cm
Tráfego	0,681	0,931	0,913
Umidade	0,002	0,000	0,001
Posição	0,001	0,031	0,001

Os resultados obtidos demonstraram que a variável intensidade de tráfego não afeta de forma significativa o comportamento da densidade do solo nas três profundidades avaliadas, no entanto a umidade e a posição apresentaram-se altamente significativo, considerando-se uma probabilidade de 95 %. Esta avaliação sugere que a ocorrência do tráfego altera o comportamento da densidade do solo já nas primeiras passadas das máquinas, e se o tráfego for efetuado em condições adversas de umidade os danos podem ser ainda maiores, no entanto a intensidade de tráfego não modifica significativamente esta propriedade.

FIGURA 14 - DENSIDADE DO SOLO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE



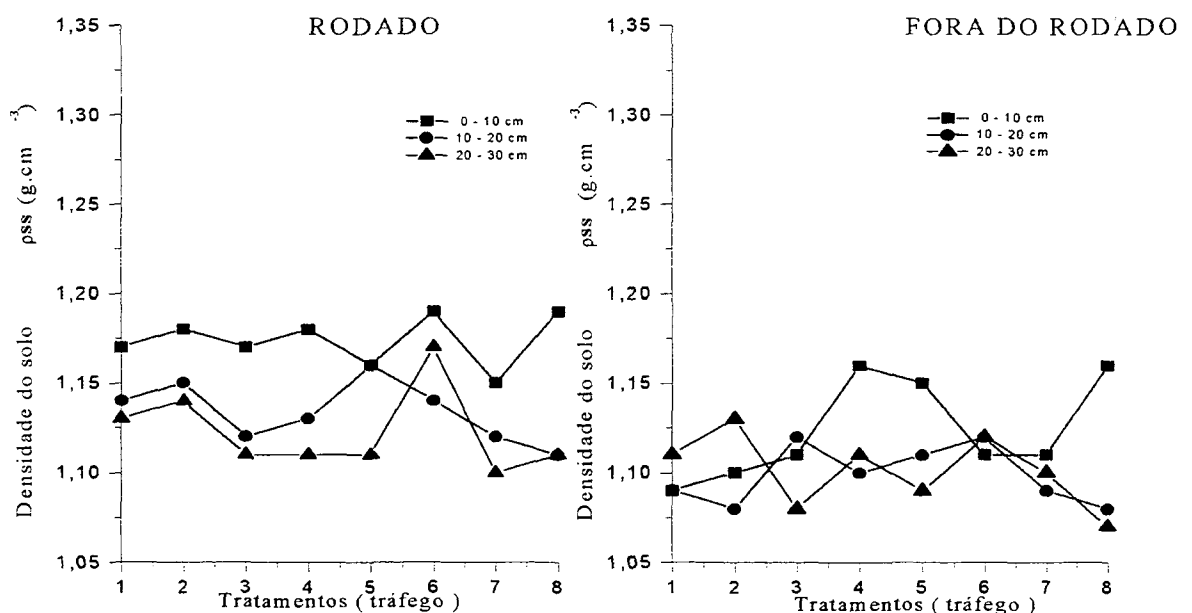
O comportamento da densidade do solo em condições naturais de umidade (Figura 14), constatou um aumento significativo da densidade do solo na posição rodado, de forma acentuada durante os primeiros tratamentos e no último tratamento de tráfego, a variação da densidade do solo não apresentou-se uniforme com o aumento da intensidade de tráfego.

O primeiro tratamento de tráfego, que apresentou a pior condição na avaliação da resistência mecânica do solo, na avaliação da densidade do solo foi responsável por um aumento de apenas 8 % na profundidade de 0 – 10 cm, mantendo-se constantes nas outras profundidades. No segundo tratamento de tráfego, a densidade do solo foi mais afetada nas profundidades de 10 - 20 cm, que aumentou em torno de 8 % quando comparada ao primeiro tratamento de tráfego no rodado e 20 –30 cm, que também apresentou aumento de densidade na ordem de 4 %. O aumento da densidade do solo foi mais expressivo no tratamento oito que chegou a apresentar os maiores

valores de densidade do solo encontrada no ensaio, chegando à $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$, na profundidade de 10 – 20 cm, no entanto o aumento foi de 8 % quando comparado com a posição fora do rodado.

A produtividade florestal é considerada inaceitável quando ocorre um aumento da densidade do solo superior à 15 %, quando comparada a uma condição sem tráfego. (BEETINGUER, *et al.*, 1994). As alterações de densidade do solo encontradas neste ensaio encontram-se abaixo de 10 %, podendo ainda ser considerado como produtividade aceitável. A amplitude de variação da densidade do solo observado na posição do rodado variam de $1,16 \text{ g cm}^{-3}$ à $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ e fora do rodado de $1,12 \text{ gcm}^{-3}$ a $1,24 \text{ g cm}^{-3}$.

FIGURA 15 - DENSIDADE DO SOLO, EM CHUVA DE 30 mm



O comportamento da densidade do solo em condições de umidade equivalente à uma chuva de 30 mm (Figura 15), demonstrou que a amplitude de variação foi menor do que a condição anterior, apresentando um aumento significativo da densidade do

solo no rodado, onde as maiores alterações foram observadas nas camadas superficiais do solo. Assim como a condição anterior, não houve aumento uniforme da densidade global do solo com os diferentes níveis de tráfego.

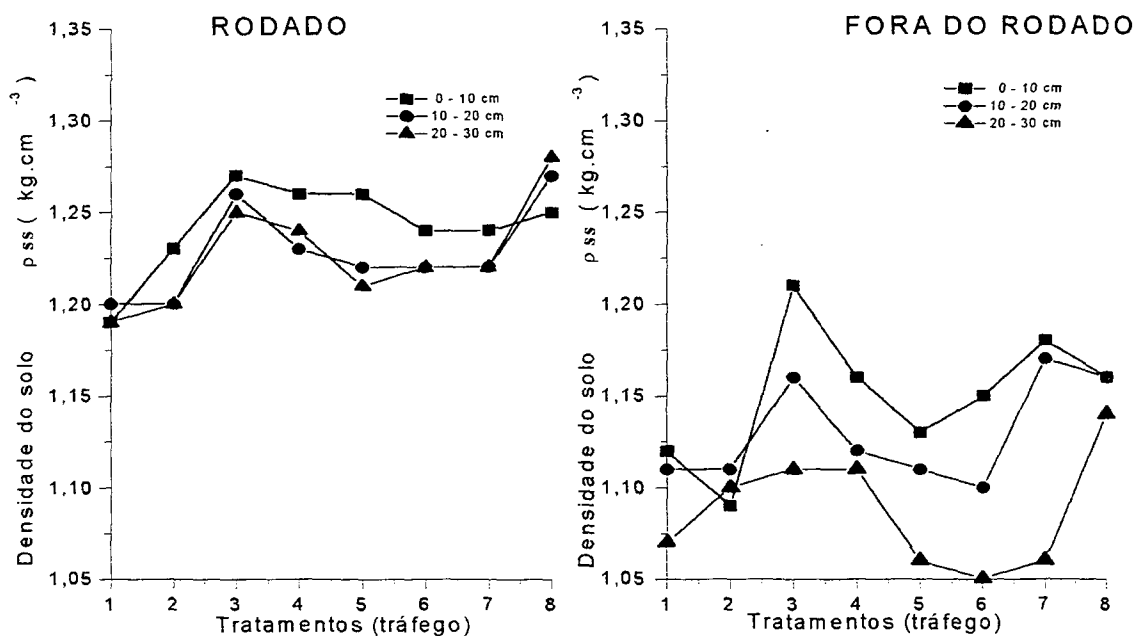
Considerando novamente o primeiro tratamento, constatou-se que houve uma alteração da densidade do solo na profundidade de 0 – 10 cm, partido de $1,09 \text{ g. cm}^{-3}$ em área não afetada pelo tráfego para $1,17 \text{ g. cm}^{-3}$ no rodado, o que representa um aumento de 7,3 % , foi constatado também alterações na densidade do solo em profundidade de 10-20 cm, elevando-se de $1,09 \text{ g.cm}^{-3}$ para $1,14 \text{ g.cm}^{-3}$, ou seja 4,6 %, e em menor escala, na profundidade de 20 - 30 cm a densidade do solo passou de $1,11 \text{ g. cm}^{-3}$ para $1,13 \text{ g. cm}^{-3}$, o que representa um aumento de 1,8 %.

Para esta condição de umidade, o tratamentos mais prejudicial foi o sexto, onde a densidade do solo apresentou um aumento de 8,1 %, na profundidade de 0- 10 cm e 4,2 % na profundidade de 20 – 30 cm.

Em solos de textura silte-argilosos, os valores de densidade do solo até $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ são considerados apropriados ao desenvolvimento de raízes e ao crescimento em altura de mudas de *Pinus sp.* (SMITH, 1997). A variação da densidade do solo observados na posição do rodado foi de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e o máximo de $1,20 \text{ g cm}^{-3}$, estando portanto dentro do limite para o bom desenvolvimento da espécie citada. Na posição fora do rodado que corresponde a uma área sem tráfego, a variação foi de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$ à $1,16 \text{ g cm}^{-3}$, estes valores representam as menores densidade do solo observado no ensaio.

A execução das atividades de colheita nestas condições de umidade possivelmente provocam menores alterações na densidade do solo, uma vez que os valores máximos obtidos nestas condições de umidade são equivalentes as menores densidade do solo encontradas em condições naturais de umidade, para este tipo de solo.

FIGURA 16 - DENSIDADE DO SOLO, EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA



O comportamento da densidade do solo nesta condição de umidade (Figura 16), foi constatado um aumento significativo da densidade do solo na posição rodado, principalmente em profundidade de 0 – 10 cm e durante os três primeiros tratamentos de tráfego. Assim como os demais tratamentos de umidade, não houve um aumento uniforme da densidade do solo de acordo com os diferentes níveis de tráfego.

O pior tratamento nesta condição de umidade foi o terceiro, elevando a densidade do solo inclusive na posição fora do rodado, a variação observada na profundidade de 0- 10 cm representa um aumento de 5 %, em 10 –20 cm a variação foi de 8,6% e de 20-30 cm de profundidade houve um aumento de 13,6%. O aumento da

densidade do solo, nesta condição de umidade é mais pronunciado nas maiores profundidades. Os valores observados na posição do rodado variaram de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ e fora do rodado de $1,05 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,21 \text{ g cm}^{-3}$.

Ao avaliar-mos as três condições de umidade, observou-se que tanto em condições naturais de umidade como em 60 mm de umidade os valores de densidade de solo foram maiores, onde é maior a susceptibilidade do solo ao processo de compactação, sendo que em condições naturais, ocorrem preferencialmente nas camadas superficiais e em condições de elevada umidade a compactação é maior em profundidades mais elevadas.

Os valores de densidade do solo superiores à $1,49 \text{ g cm}^{-3}$ começam a apresentar restrições ao desenvolvimento de plantas em solos com conteúdo de argila compreendido entre 35 % e 45 %, que representa uma condição textural equivalente a encontrada no ensaio, e a partir de $1,58 \text{ g cm}^{-3}$ passa para uma condição limitante ao desenvolvimento de raízes (USDA, 1999). Em nenhum dos tratamentos de tráfego e umidade desenvolvidos neste ensaio apresentou valor equivalente, chegando ao máximo de $1,31 \text{ g cm}^{-3}$. Com base neste parâmetro, podemos dizer que para este tipo de solo submetido ao sistema de colheita fuste, provavelmente não afetará o desenvolvimento de mudas desta espécie.

4.1.3 Porosidade total do solo (α), na área de simulação

Os valores calculados de porosidade total do solo em diferentes tratamentos de umidade e tráfego foram submetidos a análise de variância, para avaliação do efeito destes tratamentos no comportamento da porosidade total do solo, nas três profundidades avaliadas 0 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 30 cm, assim como o parâmetro anterior.

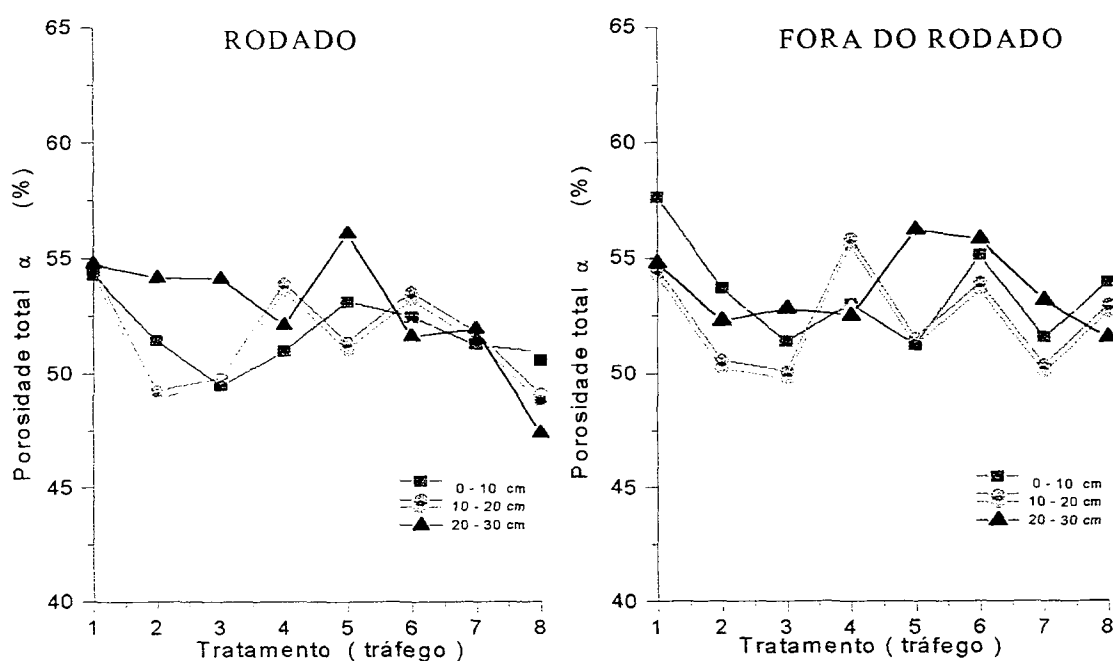
Os valores do Teste “F”, das diferentes variáveis em profundidade seguem descritos na tabela 6.

TABELA 6 – NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE “F” PARA A VARIÁVEL POROSIDADE TOTAL DO SOLO NAS TRÊS PROFUNDIDADES AVALIADAS:

VARIÁVEL	0 – 10 cm	10 - 20 cm	20 – 30 cm
TRÁFEGO	0,0001	0,0001	0,0001
UMIDADE	0,0001	0,0001	0,0001
POSIÇÃO	0,053	0,178	0,065

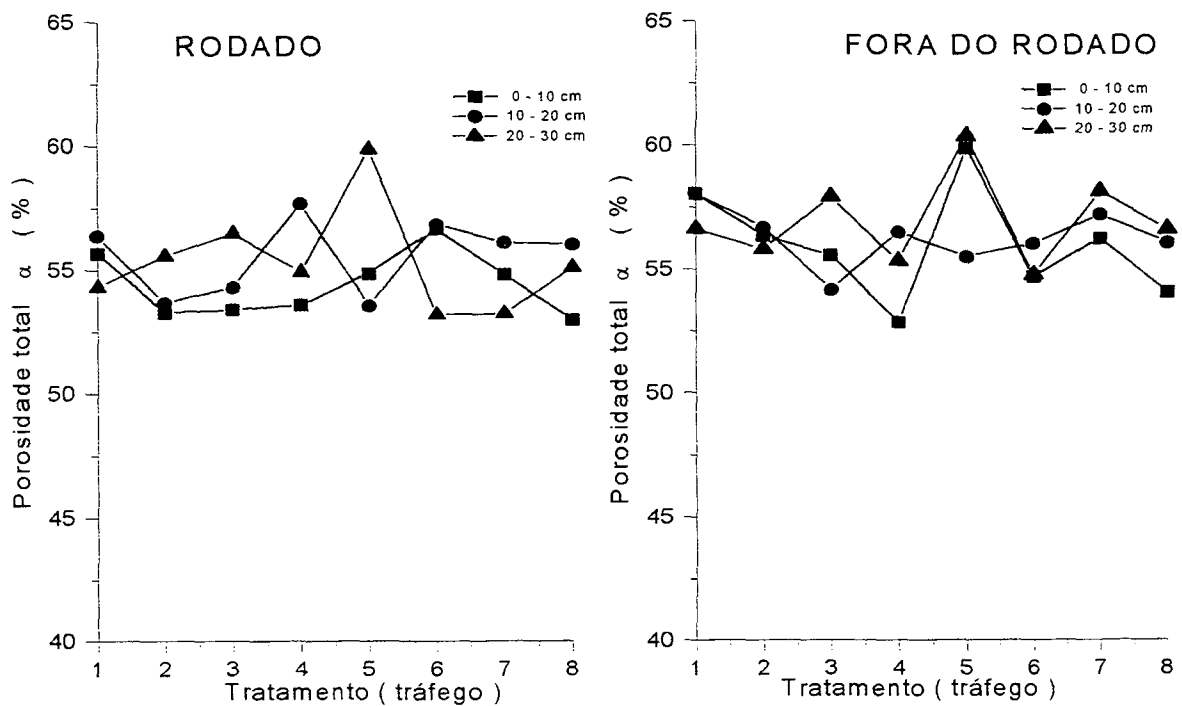
Os resultados obtidos, demonstram que tanto a intensidade de tráfego como as condições de umidade afetaram significativamente a variável porosidade total, e os efeitos do tráfego para esta variável foram mais expressivo nas camadas de 0 – 10 cm e 20 – 30 cm. O comportamento da porosidade total do solo, submetidos aos diferentes tratamentos de tráfego, nas três condições de umidade a que foram submetidos.

FIGURA 17 - POROSIDADE TOTAL EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE



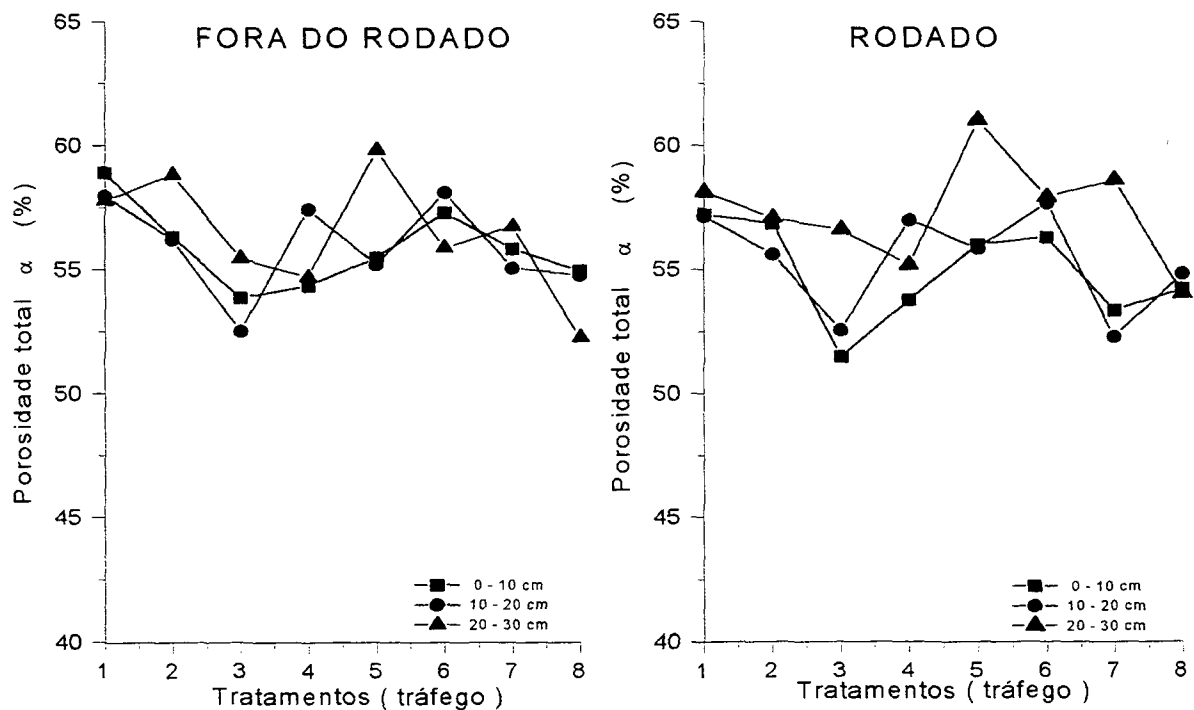
O comportamento da porosidade total do solo em condição natural de umidade (Figura 17) teve um comportamento pouco diferenciado entre as posições rodado fora do rodado, com maior redução nas camadas superficiais do solo e nos tratamentos onde tráfego foi mais intenso. O primeiro tratamento, foi o mais prejudicial para as outras propriedades avaliadas, porém praticamente não afetou a porosidade total do solo, na profundidade de 0 - 10 cm, houve uma redução de 5,3 %, sem alterar as outras profundidades. No entanto o quarto tratamento foi o mais prejudicial para esta condição de umidade na profundidade de 0 – 10 cm , onde sofreu uma redução da porosidade total do solo de 18,5%, quando comparados ao primeiro tratamento e de 13,7 % quando comparados a posição de fora do rodado, nas demais profundidades praticamente não tiveram alterações na porosidade total do solo, quando comparadas as posições rodado e fora do rodado. A porosidade total do solo no rodado oscilou de 45 % a 56 %, e fora do rodado de 50 % à 57 %.

FIGURA 18 - POROSIDADE TOTAL, EM CHUVA DE 30 mm



O comportamento da porosidade total do solo em condição de 30 mm de chuva (Figura 18) apresentou pouca alteração da porosidade total do solo devido ao efeito do tráfego, sendo mais expressivas na profundidade de 0 – 10 cm principalmente durante os primeiros tratamentos de tráfego, na profundidade de 10 – 20 cm onde apresentou reduções na porosidade total nos tratamentos de tráfego mais intenso, quando comparadas as posições rodado e fora do rodado. O tratamento mais prejudicial para esta condição de umidade foi o quinto, onde a porosidade total do solo na profundidade de 0 – 10 cm, baixando de 60% para 53%, ou seja, uma redução de 12%, e entre 10 e 20 cm a redução foi de 5%. A variação da porosidade total do solo no rodado foi de 45 % à 56 % e fora do rodado entre 50 % e 57 %.

FIGURA 19 - POROSIDADE TOTAL, EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA



O comportamento da porosidade total do solo em condições de 60 mm de água adicionada (Figura 19), teve um comportamento semelhante a condição de 30 mm de

chuva, apresentando maiores alterações na profundidade de 0 – 10 cm, mantendo-se praticamente constante nas outras profundidades.

Este parâmetro, assim como a densidade do solo não apresentou um comportamento uniforme em relação aos diferentes níveis de tráfego, nesta condição de umidade o terceiro e o sétimo tratamentos apresentaram as maiores reduções da porosidade total do solo. A porosidade total do solo nesta condições de umidade praticamente não sofreu alteração entre as posições rodado de 53% à 60% e fora do rodado de 52 % a 61%, nas três profundidades.

Ao avaliar as três condições de umidade constatou-se que o fator porosidade total do solo apesar da diferença estatisticamente significativa, apresentou poucas alterações quando submetido à diferentes níveis de umidade e a intensidade de tráfego. Destacando-se a condição natural que apresentou as maiores reduções na porosidade total, quando comparados a posição fora do rodado e os menores valores para a posição rodado.

4.1.4 Porosidade de aeração do solo (α_{ar})

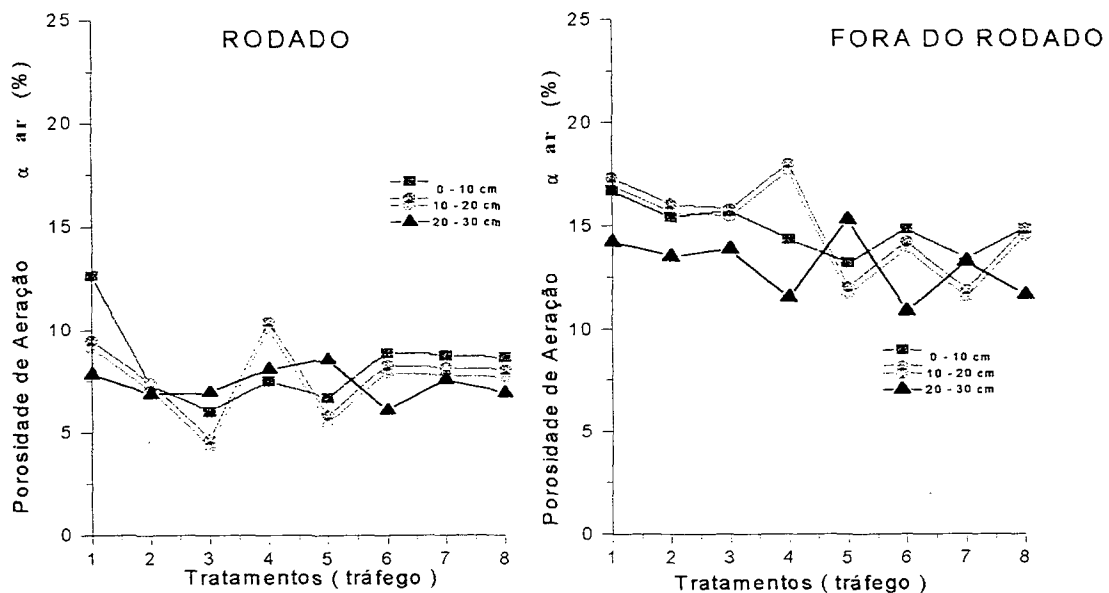
Os valores calculados de porosidade de aeração do solo foram submetidos a análise de variância, assim como as outras variáveis, para verificar o efeito dos tratamento de umidade e os diferentes níveis de tráfego no comportamento deste parâmetro nas três profundidades avaliadas. Os valores do Teste “F”, para a porosidade de aeração em profundidade foram os seguintes.

TABELA 7 – NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE “F” PARA A VARIÁVEL POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO NAS PROFUNDIDADES AVALIADAS:

VARIÁVEL	0 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 30 cm
Tráfego	0,007	0,000	0,144
Umidade	0,0001	0,0001	0,0001
Posição	0,00001	0,00001	0,00001

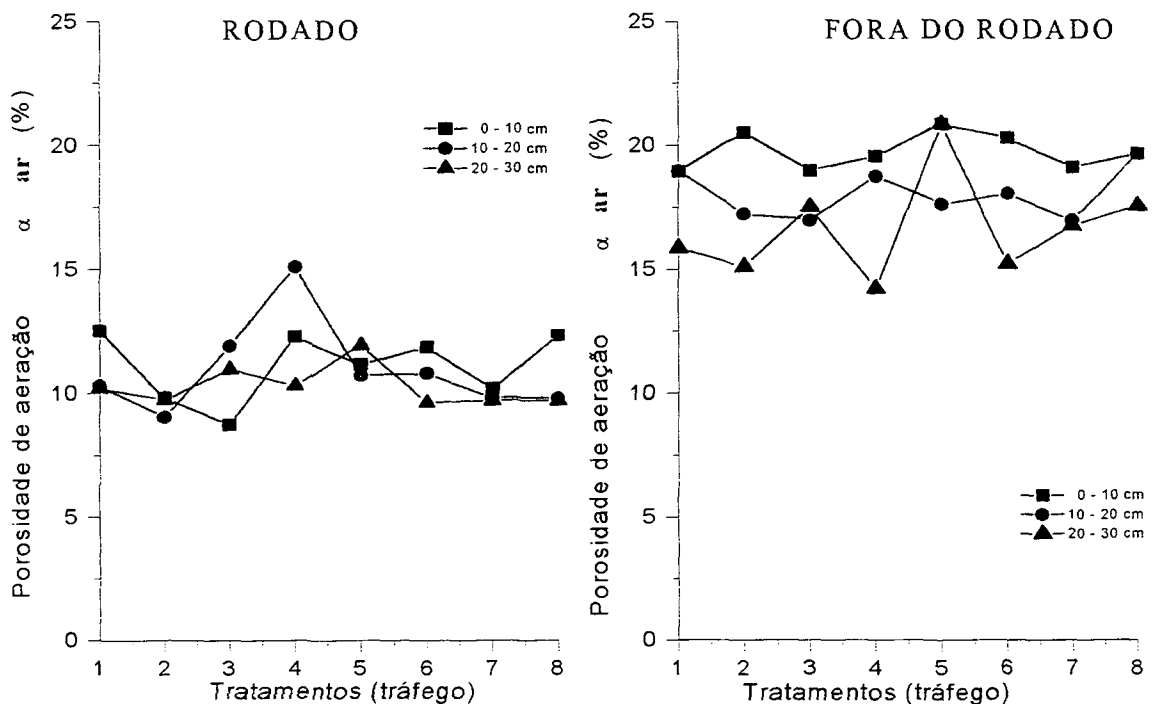
Os resultados obtidos através da análise de variância sugerem que o fator porosidade de aeração do solo é afetada de forma significativa tanto pela ocorrência como pela intensidade do tráfego, assim como a umidade. O fator intensidade do tráfego atinge principalmente as camadas superficiais do solo, considerando-se uma probabilidade de 95%. Trata-se portanto de uma variável altamente sensível à fatores externos, GRABLE (1971) considera como boas condições de aeração quando o solo apresenta valores acima de 25% de suprimento de ar nos poros, podendo apresentar limitações na permuta de gases para os valores compreendidos entre 25 % e 10% e abaixo de 10% para a ocorrer deficiência de aeração.

FIGURA 20 - POROSIDADE DE AERAÇÃO, EM CONDIÇÕES NATURAIS DE UMIDADE



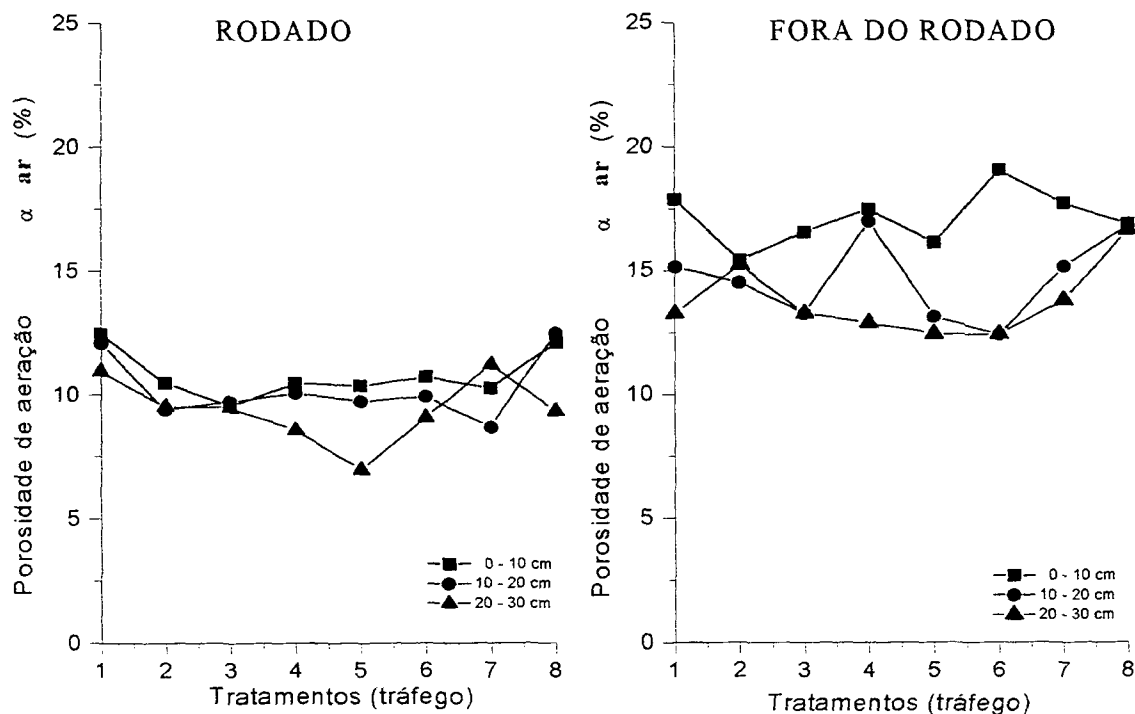
O comportamento da porosidade de aeração do solo em condições naturais de umidade (Figura 20), mostrou-se altamente sensível ao fator tráfego, alterando o seu comportamento nas três profundidades avaliadas, e as principais perdas ocorrem durante as primeiras passadas de máquina. O terceiro tratamento foi o mais prejudicial, reduzindo a porosidade de aeração na camada superficial do solo de 15 % para 6 %, representando uma perda de volume de ar no solo na ordem de 60%, na profundidade de 10 – 20 cm o prejuízo foi ainda maior de 16% para 4%, uma perda de 75%, afetando inclusive a profundidade de 30 cm, que foi reduzida de 14% para 7%, ou seja 50% de perda. Perdas em volume de macroporos superiores a 50% são consideradas como produtividade inaceitável. Considerando os valores citados por GRABLE como padrão, vamos constatar que mesmo sem efeito do tráfego, esta condição de umidade apresenta limitações na permuta de gases, os percentuais de porosidade de aeração no rodado variaram de 4 % à 12 % e fora do rodado de 11 % à 18 %, ou seja passa, de uma condição limitação para uma condição de deficiência de aeração.

FIGURA 21 - POROSIDADE DE AERAÇÃO, EM CHUVA DE 30 mm



O comportamento da porosidade de aeração do solo em condições de chuva de aproximadamente 30 mm (Figura 21) também apresentou sensibilidade ao tráfego, porém os danos causados pelo tráfego foram menores do que em condições naturais de umidade, e as maiores perdas foram observadas na profundidade de 0 – 10 cm. O terceiro tratamento nestas condições foi considerado o mais prejudicial, reduzindo a porosidade de aeração do solo na camada superficial de 19% para 9%, ou seja uma perda de 53%, para a profundidade de 10 – 20 cm a variação foi de 17% para 12%, representando 29% de perda no volume de poros do solo, e de 20 - 30 cm de profundidade foi de 17% para 11%, ou 35% de perda de porosidade de aeração no solo. A porosidade de aeração no rodado variou de 9% a 16% e de 15% a 21% fora do rodado, mantendo-se na faixa de limitação de trocas gasosas, para a maioria dos tratamentos .

FIGURA 22 - POROSIDADE DE AERAÇÃO, EM ADIÇÃO DE 60 mm DE ÁGUA



A porosidade de aeração do solo em condições de 60 mm de água adicionada (Figura 22) apresentou maiores perdas durante os primeiros tratamentos e em maiores

profundidades passou de uma condição limitante para a troca de gases para uma situação de deficiência de aeração. Na posição do rodado houve uma variação de 7% a 12% e fora do rodado 13% a 21 %. Se considerarmos novamente o terceiro tratamento, vamos constatar que a porosidade de aeração na camada superficial do solo foi reduzida de 17 % para 10%, ou seja 41%, nas profundidades de 10 – 20 cm e de 20 - 30 cm houve uma perda de 13% para 10%, representando uma perda de 23%. E no quinto tratamento reduz em 54 % o volume de macroporos na profundidade de 20 – 30 cm.

Entre os parâmetros físicos do solo avaliados: resistência mecânica do solo, densidade do solo (ρ_{ss}), porosidade total do solo (α) e porosidade de aeração do solo (α_{ar}), este foi o parâmetro mais sensível, talvez por apresentar limitações na troca de gases em condições naturais, agravando sua condição quando submetido ao efeito do tráfego e principalmente quando este era efetuado em condições de pouca umidade. A porosidade total do solo não alterou de forma significativa sua condição quando submetida aos diferentes tratamentos de umidade, e em relação a ocorrência e a intensidade de tráfego, isso se deve ao fato que o volume de macroporos que compunha o espaço gasoso do solo foi substituído por microporos, não afetando a porosidade total do solo. A densidade do solo teve um aumento significativo tanto em condições de pouca umidade como no tratamento de maior umidade, com diferenças apenas na profundidade de alteração. A resistência mecânica do solo à penetração pode ter sido afetada tanto pela concentração de raízes como também por fatores pedogenéticos, como a linha de pedras enterradas por horizontes sobrepostos constatado durante a classificação deste perfil.

Os tratamentos de umidade foram executados abaixo da capacidade de campo, mesmo em condições de 60 mm de água adicionada ao solo, o maior teor de umidade encontrado neste tratamento foi de 22,7 %, no entanto a umidade do solo na capacidade de campo, que representa o ponto ideal para compactação do solo, variou

de 30,5 % a 35,7 %. A baixa taxa de precipitação na época em que foi instalada o experimento, contribuiu para que o solo absorvesse e/ou percolasse toda água que incidia sobre ele, não permitindo que o mesmo atingisse sua capacidade de campo. Entre eles os tratamentos de umidade, o que apresentou os melhores resultados para este tipo de solo foi a condição de chuva equivalente à 30 mm, em todos os parâmetros avaliados submetidos as mesmas condições de tráfego.

4.2 ÁREA DE EFETIVO TRABALHO OU ÁREA DE GRADE DESGALHADORA

Esta área é caracterizada por sofrer o tráfego de máquinas florestais durante as atividades de corte, arraste e desganhamento, conferindo uma sobrecarga ao solo, devido ao tráfego intenso que está submetido esta área, podemos considerar como ponto crítico para este sistema de colheita. Os dois perfis abertos nesta área apresentaram diferenças em algumas características do solo como:

- no perfil aberto próximo a grade desganhadora (Anexo 2), a profundidade variou de 0 – 30 cm entre os horizontes A e Bi, com 30 – 120⁺ cm de rocha variegada de vermelho e amarelo, a textura predominantemente encontrada foi argila, consistência muito duro, firme, plástico e pegajoso
- no perfil aberto à 90 m da grade desganhadora (Anexo 3), a variação foi de 0–170⁺ cm entre os horizontes A, B e C, textura média, consistência com diferenças significativas a partir de 50 cm de profundidade, sendo muito duro, extremamente firme, ligeiramente plástico e pegajoso.

As características referentes a fertilidade do solo nos perfis avaliados não apresentaram diferenças significativas em relação a condição anterior, exceto no

conteúdo de carbono orgânico encontrado em maior quantidade, provavelmente devido a concentração de galhos e acículas nesta área.

A coleta de solo feita através de anéis volumétricos também foram submetidas a análise de fertilidade e granulometria, onde não foi constatado diferença na classificação textural até a profundidade de 30 cm, em áreas próximas ao perfil profundo, mantendo a classificação argila-siltosa. Em coletas feitas próximo à grade foi observado variação na textura a partir de 30 cm, que passa para a classe textural argila, que se deve ao substrato argilito (Anexo 6).

4.2.1 Resistência mecânica do solo, na área de grade desgalhadora

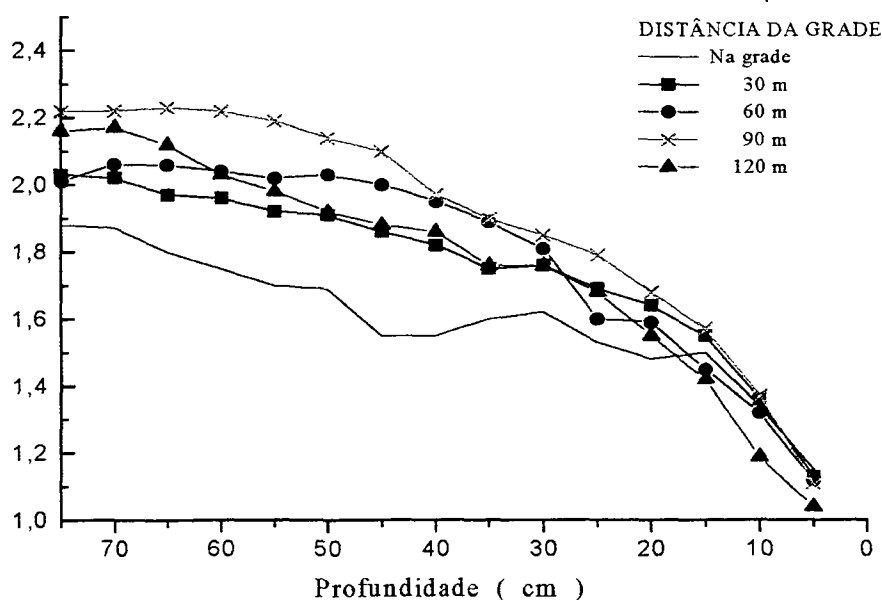
Os valores de resistência mecânica do solo obtidos na área de grade desgalhadora, não apresentaram diferenças significativa entre as repetições (redes) nos cinco blocos avaliados, sem a variação entre as repetições, os blocos foram submetidos a análise estatística em função da distância da grade desgalhadora e da profundidade, considerando-se uma probabilidade de 95%, apresentando os seguintes resultados.

TABELA 8 – ANOVA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO NA ÁREA DE GRADE:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Profundidade	271.025	14	19.359	0.000
Distância	37.370	4	9.343	0.000
Prof. x Dist.	31.099	56	0.555	0.007

Os resultados da análise estatística nesta área sugerem que a resistência mecânica varia de forma significativa em função da profundidade avaliada e a medida em que se distancia da área de grade desganhadora, no entanto a interação entre as variáveis demonstra que há outros fatores que estão interagindo no comportamento da resistência mecânica nesta área.

FIGURA 23 - RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO EM PROFUNDIDADE NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA

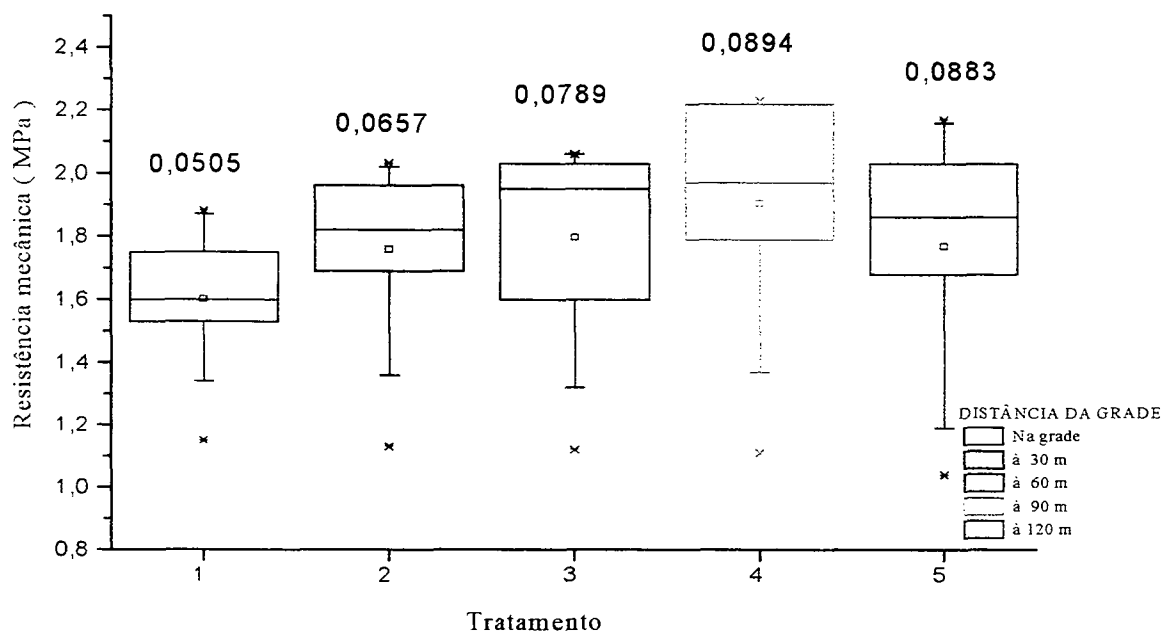


O comportamento da resistência mecânica do solo à penetração na área de grade desganhadora (Figura 23) demonstra um aumento nos valores em MPa, a medida em que se distancia da área de grade desganhadora e em profundidades superiores à 50 cm. A interação constatada na análise estatística demonstra que existem outros fatores, que não foram avaliados e estão colaborando com o aumento da resistência mecânica nesta área. Os fatores que podem estar interagindo neste processo podem ser a intensidade de tráfego que não foi avaliada nesta etapa, a diversidade de máquinas que trafegam nesta área, a variabilidade espacial do solo no momento da amostragem, entre outros fatores. Apesar da intensidade de tráfego que está sujeita esta área, os

valores de resistência mecânica do solo à penetração encontrados foram baixos, ocorrendo predominantemente no intervalo entre 1 e 2 MPa, o que representa uma condição limitante mas não restritivo ao desenvolvimento de algumas espécies. A quantidade de galhos e acículas concentrado nesta área contribuiu para aliviar as tensões provocadas pelo tráfego, amortecendo e distribuindo o efeito da carga.

Os valores de resistência mecânica acima de 2 MPa, encontram-se em profundidades superiores à 45 cm, onde o subsolador não é capaz de amenizar o problema. Comparando o primeiro bloco na grade com a distância de 90 m constatamos um aumento de 35,5 % da resistência mecânica em 45 cm de profundidade, 30 % em 120 m considerando a mesma profundidade. A condição mais prejudicial foi à 90 m da área de grade, chegando à 2,25 MPa, valor superior ao encontrado em condições simuladas com tráfego intenso (2,1 MPa). As alterações no comportamento da resistência mecânica do solo estão diretamente envolvidas com as mudanças nas características pedológicas, constatada durante a classificação dos perfis nesta área.

FIGURA 24 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO, POR DISTÂNCIA:



Os valores médios de resistência mecânica do solo em função da distância (Figura 24) demonstram que o bloco localizado na grade apresentou diferença estatisticamente significativa para as condições de resistência mecânica do solo em relação aos demais, com valores que variam de 1,1 MPa à 1,85 MPa, e resistência mecânica do solo em valores médios de 1,6 MPa, o que representou uma condição com pouca interferência do tráfego para esta área. Os valores de resistência mecânica do solo à penetração aumentaram a medida que se distanciava da grade desganhadora, no bloco quatro (à 90 m da grade desganhadora) chegou à 2,25 MPa e a resistência mecânica do solo em média foi de 1,9 MPa. As mensurações nesta área foram feitas em condições de umidade semelhantes ao primeiro tratamento de simulação, ou seja, dois a três dias sem chuva.

As alterações observadas à 90 m da grade envolve não só a intensidade de tráfego, como também a heterogeneidade de algumas características do solo como: textura, consistência, estrutura, cor, conteúdo de carbono entre outras.

4.2.2 Densidade do solo (ρ_{ss}), na área de grade desganhadora

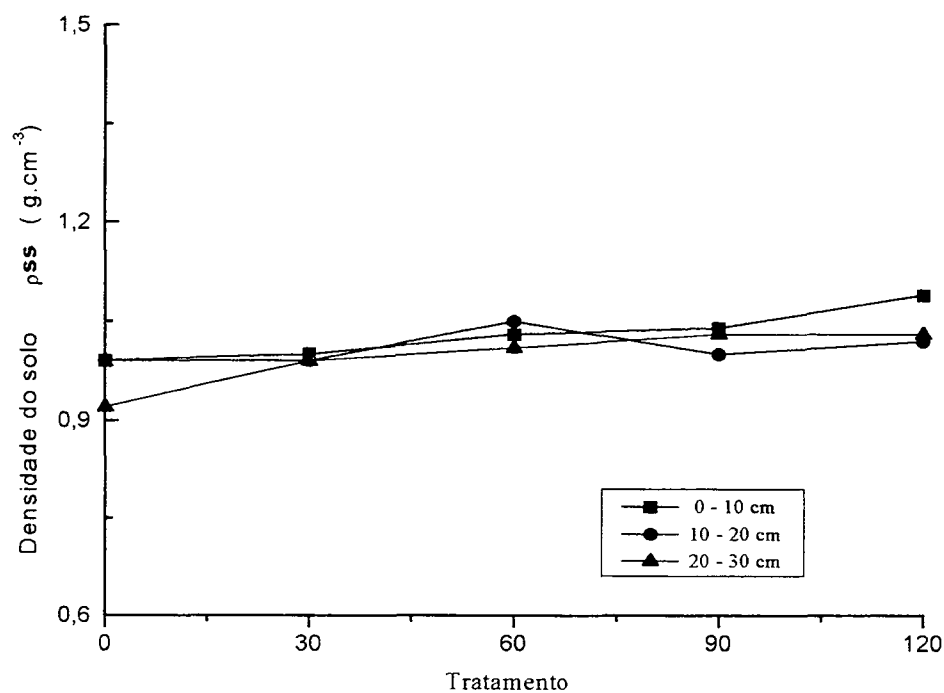
Os resultados de densidade do solo, obtidos em laboratório, também foram submetidos a análise estatística em função da distância da grade desganhadora e da profundidade de coleta de solo, considerando-se uma probabilidade de 95%, os resultados foram os seguintes.

TABELA 9 - ANOVA DA DENSIDADE DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Distância	0.049	4	0.012	0.003
Profundidade	0.010	2	0.005	0.000
Dist. x Prof.	0.020	8	0.002	0.047
Resíduo	0.116	45	0.003	

O comportamento da densidade do solo na área de grade não apresentou variação significativa em relação a profundidade, apenas em relação à distância. A interação entre as variáveis demonstra a interferência outras variáveis no comportamento da densidade do solo para estas condições, provavelmente devido aos mesmos fatores citados anteriormente.

FIGURA 25 - DENSIDADE DO SOLO NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA



Os valores de densidade do solo observado na condição de grade (Figura 25), variaram de $0,90 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,10 \text{ g cm}^{-3}$, assim como os resultados de resistência mecânica estes valores são considerados baixos uma vez que a área de grade representa o ponto crítico nas operações de colheita de madeira neste sistema. A densidade do solo foi medida até a profundidade de 30 cm, onde apresentou o maior aumento observado para esta propriedade sendo 9 %, à 120 m da grade desgalhadora, quando comparado ao primeiro bloco.

O aumento da resistência mecânica do solo mostrou-se de forma significativa em profundidades superiores a 50 cm, portanto a densidade do solo assim como as demais propriedades físicas determinadas em laboratório, podem ter apresentado efeitos mais expressivo em maiores profundidades.

A ocorrência de um aumento na densidade do solo, assim como da resistência mecânica a medida em que se distancia da grade, provavelmente seja devido a mudança das características de solo, citada anteriormente.

4.2.1 Porosidade total do solo (α), na área de grade desgalhadora:

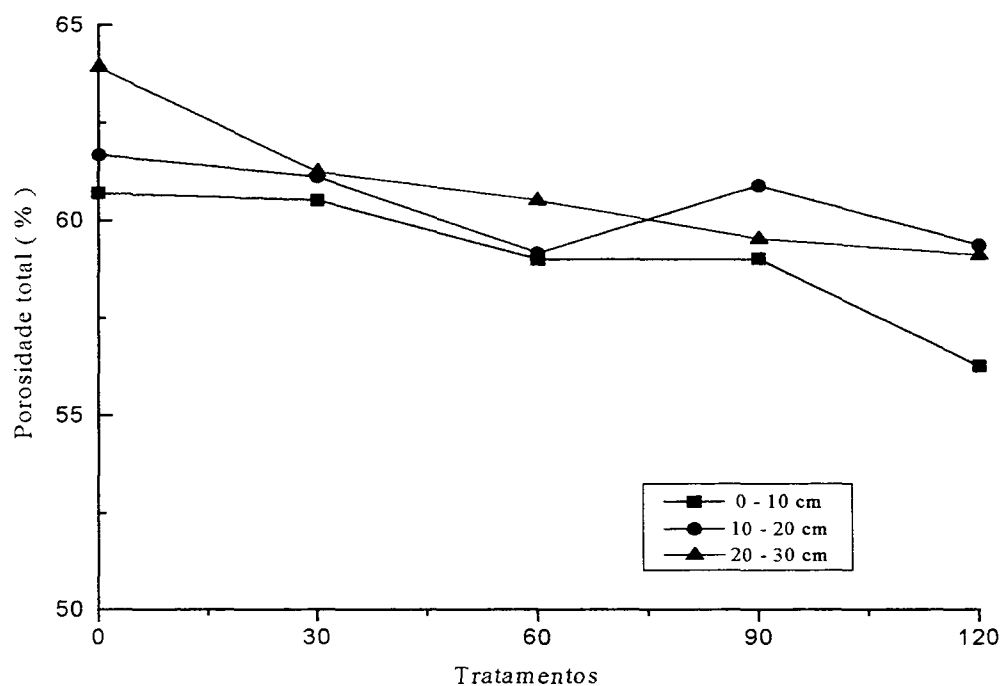
A porosidade total do solo assim como a densidade do solo, foi submetida a análise estatística em função da distância e da profundidade de coleta do solo, considerando-se uma probabilidade de 95%, e os resultados foram os seguintes.

TABELA 10 - ANOVA DA POROSIDADE TOTAL DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Distância	100.069	4	25.017	0.007
Profundidade	30.889	2	15.444	0.095
Dist. x Prof.	28.200	8	3.525	0.799
Resíduo	279.808	45	6.218	

A porosidade total do solo sofreu interferência tanto em relação a distância como em função da profundidade de coleta do solo, considerando-se uma probabilidade de 95 %, os valores encontrados para este parâmetro não apresentaram limitações nesta área, assim como os demais.

FIGURA 26 - POROSIDADE TOTAL DO SOLO NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA



O comportamento da porosidade total do solo (Figura 26), apresentou semelhança com as outras duas propriedades avaliadas, ou seja, houve uma redução da porosidade total a medida em que se distanciava da grade. Esta foi a propriedade física que menos sofreu alterações devido a intensidade de tráfego, ao compararmos a área de grade desganhadora com a condição de simulação vamos constatar que esta área apresenta melhores condições para a porosidade total do solo do que as condições sem tráfego nas três simulações de umidade, este comportamento provavelmente esteja relacionado com o maior conteúdo de matéria orgânica encontrado nesta área, como foi citado anteriormente. A área de grade não demonstrou restrições para esta propriedade física nas profundidades avaliadas, com variação de 56,4% à 64,0%.

5.2.4 Porosidade de aeração do solo (α_{ar}), na área de grade desganhadora

A porosidade de aeração do solo assim como a densidade do solo e a porosidade total, também foi submetida a análise estatística em função da distância e da profundidade de coleta de solo, considerando-se uma probabilidade de 95%.

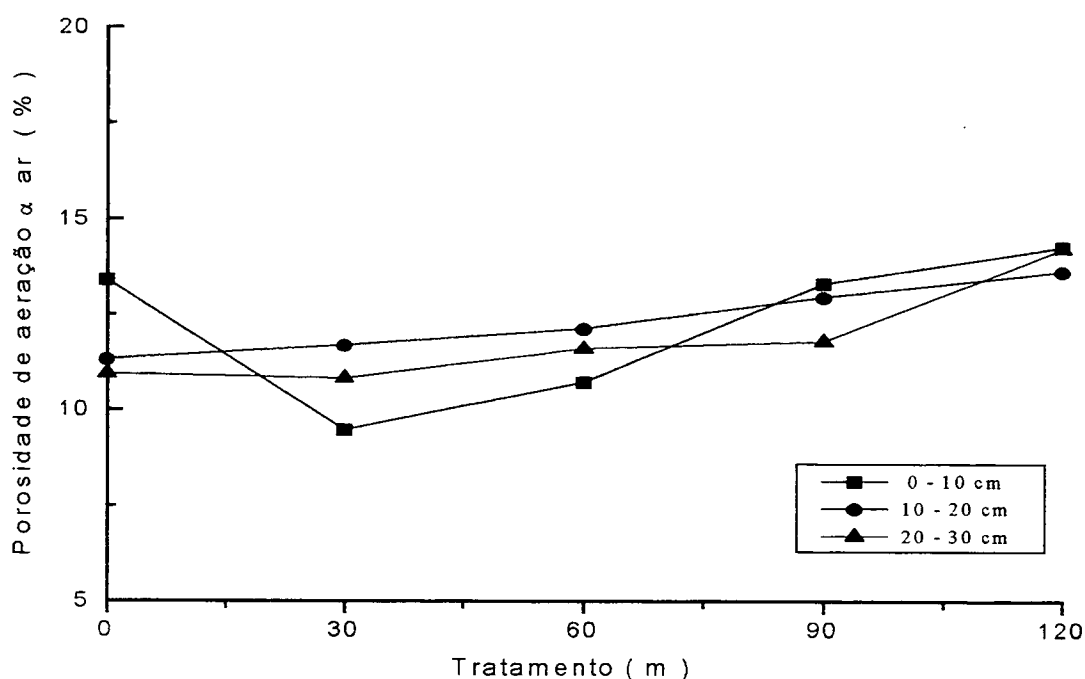
TABELA 11 - ANOVA DA POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO, NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA:

VARIÁVEL	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE "F"
Distância	78.848	4	19.712	0.018
Profundidade	2.334	2	1.167	0.822
Dist. X Prof.	31.492	8	3.936	0.720
Resíduo	267.011	45	5.934	

A análise estatística apresentou diferença significativa para a porosidade de aeração em função da distância, assim como as demais propriedades avaliadas, no entanto não demonstrou efeito significativo em relação a profundidade na área de grade desgalhadora.

A porosidade de aeração do solo apresentou um comportamento diferenciado em relação as demais propriedades avaliadas, melhorando sua condição de aeração a medida em que se distanciava da área de grade desgalhadora, a figura abaixo demonstra o comportamento da porosidade de aeração nas três profundidades avaliadas, a medida em que se distanciava da grade desgalhadora.

FIGURA 27 - POROSIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DE GRADE DESGALHADORA



O comportamento da porosidade de aeração na área de grade desgalhadora (Figura 27) evidencia que este parâmetro encontra-se na faixa de limitação na permuta de gases, compreendida entre 10 % e 25 %, exceto em 30 m de distância da grade, onde passa para a condição de deficiência de aeração, na profundidade de 0 – 10 cm, com decréscimo de 27% na porosidade de aeração.

A área de grade desgalhadora, apesar de apresentar uma condição intensa de tráfego, não apresentou alterações significativamente as propriedades físicas avaliadas, sendo que os valores nesta área não apresentaram condições restritivas a produção Do sítio para *Pinus sp.*, o fator que contribuiu para aliviar os efeitos da intensidade de tráfego se deve a presença acentuada de galhos e acículas nesta área.

Os resultados obtidos nesta condição do experimento nos permite concluir que os efeitos mais pronunciados estão relacionados com a variabilidade espacial encontrada nesta área, principalmente as características pedogenéticas do solo, afetando de forma mais expressiva a resistência mecânica do solo, parâmetro que atingiu maiores profundidades. As demais propriedades apresentaram-se de forma semelhante aos parâmetros observados na área de simulação, não apresentando valores críticos até a profundidade de 30cm, o que não descarta a possibilidade de apresentar valores considerados limitante em maiores profundidades.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas duas áreas experimentais nos permite concluir com base nos parâmetros físicos avaliados que:

- A ocorrência do tráfego provocou alterações nas propriedades físicas avaliadas principalmente durante as primeiras passadas de máquina.
- No entanto a intensidade do tráfego não afetou de forma significativa as propriedades físicas avaliadas.
- A compactação do solo devido a ocorrência do tráfego afeta 74,3 % do volume de solo compreendido até a profundidade de 120 cm, com valores de resistência mecânica superiores à 1 MPa, durante a primeira passada de máquina.
- Deste volume de solo afetado, 13,3 % é comprometido com compactação severa, com valores de resistência mecânica superiores à 2 MPa, se o tráfego for efetuado em condições de pouca umidade (teor de umidade do solo abaixo de 15%), 10 % do volume é comprometido se o tráfego for efetuado quando o solo apresentar um teor de umidade entre 15 % e 18% e aproximadamente 7 % do volume de solo é afetado pela compactação severa quando o tráfego for efetuado quando o solo apresentar um teor de umidade entre 18% e 23%.
- A ocorrência de volume de solos limitados pela compactação severa neste tipo de solo, ocorreu predominantemente em profundidades superiores à 50 cm, sem considerar a profundidade do sulco formado pelo rodado, que na condição de tráfego mais intensa chegou à 40 cm, portanto os parâmetros avaliados no rodado devem ser considerados com base na superfície original

do solo, com isso a compactação severa ocorrerá em profundidade equivalente à 90 cm.

- O volume de solo afetado pela compactação severa poderá ser maior se o tráfego for efetuado na capacidade de campo, que para este tipo de solo varia de 30% à 36 %.
- Os tratamentos de umidade foram efetuados em condições de umidade inferior a capacidade de campo, portanto não chegou a atingir o ponto ideal para compactação neste solo.
- Os solos avaliados com textura predominantemente argilosa apresentaram compactação moderada de origem natural a partir de 15 cm, apresentando valores de resistência mecânica de 1,7 MPa fora do rodado, em uma profundidade de 80 cm.
- Foram constatados valores de resistência mecânica de 2,1 MPa no rodado em profundidades corrigidas equivalente à 100 cm, e na área de grade em profundidades superiores à 50 cm.
- Foram observados mineral de argila do tipo 2:1, que confere a estes solos um comportamento de alta coesão e plasticidade, e quando seco uma marcante contração.
- Os maiores valores de densidade do solo foram encontrados na área de simulação e em condições de menor umidade, chegando à $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$ no tratamento de tráfego intenso. Este parâmetro não apresentou restrições ao crescimento de plantas até a profundidade de 30 cm, nas duas áreas estudadas.
- A porosidade total do solo foi pouco sensível a ocorrência e intensidade do tráfego, bem como aos tratamentos de umidade.
- Os solos estudados apresentaram limitações naturais na porosidade de aeração do solo, com a ocorrência do tráfego passou para uma condição de

deficiência de aeração. As reduções na porosidade de aeração foram mais expressivas em condições de menor umidade.

- A área de grade apresentou diferença na resistência mecânica a medida em que se distanciava da grade desgalhadora em profundidades superiores à 40 cm, que coincide com as mudanças observadas nas características do solo.
- As duas áreas avaliadas apresentam-se na faixa de compactação moderada para este nível de umidade, com níveis aceitáveis de resistência mecânica até uma profundidade de 50 cm, não apresentou valores restritivos de densidade do solo para o desenvolvimento de plantas até a profundidade de 30 cm, não teve reduções significativas na porosidade total, somente na porosidade de aeração é que os valores atingiram a uma condição crítica.

6 RECOMENDAÇÕES

- Para que se preserve a qualidade do solo e mantenha-se a capacidade produtiva do mesmo é necessário o reconhecimento dos tipos de solos predominantes na região e produzir mapeamento dos mesmos nas áreas da empresa.
- Controle mensal da precipitação e sua relação com os níveis de umidade do solo, utilizando como base a capacidade de campo.
- Planejamento de intervenção na floresta de acordo com o nível de precipitação e tipo de solo apresentar-se próximo ou na capacidade de campo.
- Planejamento de corte em função do tipo de solo e dos níveis de umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BETTINGER, P.; ARMLOVICH, D. and KELLOGG, L. D. Evaluating area in logging trails with a geographic information system. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 37 (4), p. 1327-1330, 1994, USA.
- BOWEN, H.D. “Alleviating mechanical impedance”. **American Society Agriculture and Engineers**. St. Joseph. MI. USA, USAE. Mono. v. 4, p. 19-57, 1981.
- BRASIL, R. **Projeto Radam Brasil**. Departamento Nacional de Produção Mineral e Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro, 1978.
- CAMARGO, O. A. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba. Abril. p.132., 1997.
- CAMPBELL, D. J. Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 6, p. 113-139, 1994.
- CLAYTON, J. L.; KELLOGG, G. and FORRESTER, N. Soil disturbance-tree growth relations in central Idaho clearcuts. **Intermountain Research Station**. Forest Service. United States Department of Agriculture. Research note INT-372., 1987.
- CONWAY, S. “Logging practices – Principles of timber harvesting systems”. Miller Freeman Publications. Inc. USA. 1978.

- COSTANTINI, A.; DUNN, G..M. and GRIMMETT, J. L. Towards sustainable management of forest plantations in south-east Queensland. II: Protecting soil and water values during second rotation *Pinus* plantation management. **Australian Forestry**, vol. 60, n.4, p. 226-232, Aug. 1997.
- CORNS, I. G. W. Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. **Canadian Journal of Forest Research**, v.18, n.1, p. 75-84, jan 1988. Canadá.
- CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C. e FONTES, L. E. F. Vocabulário de Ciência do Solo, p. 90, Campinas / SP, 1993.
- DICKERSON, B. \P. Soil compaction after tree length skidding in northern Mississippi. **Soil Science Society of American**, v. 40, p. 965-966, 1976.
- DUFFY, P. D. and McCURKIN, D. C. Difficult eroded planting sites in north Mississippi evaluated by discriminant analysis. **Soil Science American Journal**, v. 38, p. 676-678, 1974.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento de Conservação de Solos. **Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado de Santa Catarina**, (no prelo), Rio de Janeiro.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento de Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, v. 1, Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Pesquisa de Florestas. **Zoneamento Ecológico para Plantios Florestais no Estado de Santa Catarina**, p. 113, Curitiba / Pr., 1988.

FENNER, P. “Relações entre o tráfego de veículos e as deformações físicas dos solos florestais. In: **IX Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**. Curitiba. 1996.

FERNANDES, H. C., ORLANDO, R.C. e LANÇAS, K. P. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do “forwarder” e do “harvester”. **Engenharia Agrícola**. Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, v. 5, n. 4, p. 276-280, 1997.

FROEHLICH, H. A. Soil compaction from logging equipment. Effects on growth of *ponderosa pine*. **Journal Soil Water Conservation**, n. 34, p. 276-278, 1979.

FROEHLICH, H. A.; MILES, D.W.R. and ROBBINS, R. W. Growth of young *Pinus ponderosa* and *Pinus contorta* on compacted soil in central washington. **Forest Ecology and Management**, v. 15, n. 4, p. 285-294, sept. 1986. Amsterdam.

GILL, W. R. Economic assessment of soil compaction. In: K. K. BARNES et al (eds). **Compaction of agricultural soils**. American Society of Agricultural Engineers, p. 431-458, ST. Joseph, Michigan, 1971.

GOMES, A. da S. e PENA, Y. A. Caracterização da compactação do solo através do uso de penetrômetro. **Informe Lav. Arrozeira**, v. 49, n. 426, mar./jun, 1996. Porto Alegre / RS.

- GRACEN, E. L. and SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soils Research**, n. 18, p. 163-189, 1980.
- GUIMER, D. Y. & WILLBURN, G.V. "Logging with heavy – lift air ships. **FERIC - Vancouver Technical Report**. No. TR-58, p.115, 1984.
- GUPTA S.C. and RAPER R. L. Prediction of soil compaction under vehicles. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 3, p. 71-90, 1994.
- HATCHELL, G. E. , RALSTON, C.W. and FOIL, R. R. Soil disturbance in logging. **Journal Forestry**, n. 68, p. 772 – 775, 1970.
- HATCHELL, G. E. and RALSTON, C. W. Natural recovery of surface soil disturbed in logging. U. S. Forestry Service. Tree plant notes, n. 22, p 5 – 9, 1971.
- HEILMAN, P. and LEBERT M. Root penetration of *Douglas Fir* seedlings into compacted soil. **Forestry Science.**, v. 27, p. 660 – 666, 1981.
- HERBAUTS, J.; EL BAYAD, J. and GRUBER, W. Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. **Forest Ecology and Management**, n. 87, p. 193-207, 1996. Amsterdam.
- HILDEBRANDT, E. E. "The influence of soil compaction on soil ductions in forest sites. **Forstwiss centralbl**. No. 102-2., p. 111-125., 1983.

- HILDEBRANDT, E. E. & SHACK-KIRCHNER, H. "The influence of compaction on soil structure and soil functions in forest sites. In: **X Seminário de Atualização em Sistemas de Colheita de Madeira e Transporte Florestal**. Curitiba. 1998.
- HORN, R. and LEBERT M. Soil compactability and compressibility. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 3, p. 45-69, 1994.
- HORTON, R.; ANKENY, M.D. & ALLMARRAS R.R. Effects of compaction on soil hydraulic properties. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 7, p.141-165, 1994.
- JAKOBSEN, B. F. Persistence of compaction effects in a forest Kraznozen. **Australian Journal Forestry Research**, v. 13, p. 305 – 308, 1983.
- KLOCK, G. O. Impact of five postfire salvage logging systems on soil and vegetation. **Journal Soil and Water Conservation**. n. 30 –2, p. 78-81, 1975.
- KOOISTRA, M. J. and TOVEY N. K. Effects of compaction on soil microstructure. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 5, p. 91-111, 1994.
- KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 2, p. 23-44, 1994.
- LANDFORD, B. L. & STOKES, B. J. Comparison of two thinning systems. Part I. Stand and site impact. **Forest and Products Journal**. n. 45-4, 74-9, 1995.

- MAC DONAGH, P. M. Avaliação técnico-econômica da extração de *Pinus sp.* Utilizando tratores com garra no sul do Brasil. Curitiba, 1994. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná.
- MAKKONEM, I. "Choosing wheeled shortwood forwarder. **FERIC – Technical Note**. no. 136 e **FERIC – Chaire**. p.12, Quebec. Canadá. 1989.
- MALINOVSKI, J. R. "Considerações básicas no planejamento da colheita de madeira. In: **III Curso de Atualização Sobre Sistemas de Exploração e Transporte Florestal**. Curitiba. 1981.
- MALINOVSKI, RAFAEL A. e MALINOVSKI, J. R. Evolução dos sistemas de colheita de pinus na região sul do Brasil. 138 p., Fupef. Curitiba, 1998.
- MALINOVSKI, RICARDO A. "Os impactos da colheita mecanizada de madeira sobre o povoamento remanescente". In: 6° EVINCI – Evento de Iniciação Científica da UFPR. p. 213, Curitiba 7 e 8 de outubro. 1998.
- MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA, Ministério das Minas e Energia. Secretaria da Ciência e Tecnologia, Minas e Energia. Coordenadoria dos Recursos Minerais, escala 1: 500.000, 1986.
- MATA, J. D. V. Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada sob dois sistemas de preparo, cultivado com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. Piracicaba, 1997, 73 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo.

- Mc.CARY, J. "Steady pace – Timber harvesting". Montgomery. Alabama. p. 12-40, March. 1991.
- McKEE, Jr., W. H.; HATCHELL, G. E.; TIARKS, A. E. Managing site damage from logging. **Southeastern Forest Experiment Station**. United States Department of Agriculture Forest Service. Asheville, North Carolina. General technical SE-32, p.1-22, oct. 1985.
- McLEOD, A. and HOFFMAN, E. The effect of landing construction on some forest soil properties: A case study. *Economic & Regional Development Agreement*. Canadá, n. 3, p. 1-6, oct. 1987.
- Mc NEEL, J. F. and BALLARD Analysis of site stand impacts from thinning with a harvester-forwarder system. **J. Forestry Eng.** v. 4, no. 1, p. 23-29, 1992.
- MEGHAHAN, W.F. & KIDD, W.J. Effects of logging and logging roads on erosion and sediments deposition from steep terrain. **Journal of Forestry**. n. 10 – 3, p. 136-41, 1972.
- MILLER, J. H. and SIROIS, D. L. Soil Disturbance by Skyline Yarding vs. Skidding in a Loamy Hill Forest. **Soil Science Society of América Journal**, v.50, n. 30, p. 1579-1583, nov-dec 1986. New Orleans, Louisiana.
- NAMBIAR, E. K. S. Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science. **Soil Science Society American Journal**, v. 60, p. 1629-1642, 1996.

- NICHOLS, M. T.; LEMIN JR., R.C. and OSTROFSKY W. D. The impact of two harvesting systems on residual stems in a partially cut stand of northern hardwoods. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 2, feb., 1994. Canadá.
- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G. e PAULA, M. B. de Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropecuário**. EPAMIG, v. 19, n. 191, p. 46-48, 1998. Belo Horizonte / MG.
- PETRY, T. O. Soil compaction and *loblolly pine* growth. US. Forestry Service. **Tree plant notes**, n. 67, p. 9, 1964.
- PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos, p. 446, Curitiba, 1996.
- RAB, M. A. Changes in physical properties of a soil associated with logging of *E. regnans* forests in Southern Australia. **Forest Ecology and Management**. v.70, 1-3, p.215-229, 1994.
- ROESLER, E. X. e MOREIRA, A. M. Sistemas de preparo do solo após colheita florestal mecanizada de *Pinus taeda*. **X Seminário de Atualização em Sistemas de Colheita de Madeira e Transporte Florestal**. Anais, p. 197-215, Curitiba, 1998.
- SANDS, R. Physical changes to sandy soils planted to *radiata pine* proceeding. **IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity**. Seattle, Washington., p. 146-152, 1982.

- SAUTER, U. H. "Modern highly mechanized wood harvesting systems. Comparison for long and short wood cutting system using harvesting for thinning conifer stand in regard of stand damages, performance and volume out put. In: **IX Seminário de Atualização Sobre Sistemas de Colheita de Madeira**. Curitiba. 1996.
- SEIXAS, F., RUMMER R. & STOKES, B.J. A colheita de madeira nos Estados Unidos: a busca do manejo sustentado em equilíbrio com o meio ambiente. In: **IX Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**. p. 73-94, Curitiba, 1996.
- SILVA, A. P. and KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 3, p. 877-888, South Segoe Rd., Madison, USA, may- june 1997.
- SOANE, B. D. and OUWERKERK, C. Van Soil compaction problems in world agriculture. **Soil Compaction in Crop Production**. Elsevier Science, cap. 1, p. 1-21, 1994.
- SMITH, C. W. Assessing compaction susceptibility of forestry soils. Institute for Commercial Forestry Research. **Bulletin Series**, n. 8/95, p. 1-12, South Africa.
- SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A. and LORENTZ, S. Assessing compaction susceptibility of South African Forestry soils. I. The effect of soil type water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil & Tillage Research**, v. 41, p. 1-2, p. 53-73, 1997. Amsterdam.

STEINER, M. and SÖHNE W. Berechnung der tragfähigkeit von ackerschlepperreifen sowie des kontaktflächenmitteldruckes und des rollwiderstandes auf starrer fahrbahan. (Calculation of the load capacity of tractor tires as well as the medium pressure in the contact area and the rolling resistance on a rigid surface). *Grundl. Landtech.*, v. 29, p. 145-152, German.

STOKES, B.J. Harvesting developments in the South. In: *Proceedings of the 21 th annual hardwood symposium, Hardwood research Council*. p. 59-71, may 24-26, 1993. Cashiers, N.C.

STOLF, R. Fórmula de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em forças / unidade de área. In: **19 Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Anais. SBEA, p. 823-836, 1990. Piracicaba.

USDA, In: **National Soil Survey Handbook**, "Bulk density, One-tenth Bar or One-third Bar. Internet <http://webofscience.fapesp.br/CIW.cgi?&new>. USA, 1999.

WARKOTSCH, W. The impact of harvesting operation on timber quality: causes and remedies. **South African Forestry Journal**, n. 169, jun. 1994. Pretoria, Africa do Sul.

WARKOTSCH, W.; HUYDDTEEN, L. VAN and OLSEN, G. L. Identification and quantification of soil compaction due to various harvesting methods – A case study. **South African Forestry Journal**, n. 170, sept. 1994, Pretoria, Africa do Sul.

- WÄSTERLUND, I. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. **Scandinavian Journal Forestry Research**. n. 7, p. 135-42, 1992.
- WERT, S. and THOMAS, B. R. Effects of skid roads on diameter, height and volume growth in Douglas – fir. **Soil Science Society of American Journal**. n. 45, p. 629-932. 1981.
- WHITMAN, A. A.; BROKAW, V. L. and HAGAN J. M. Forest damage caused by logging of mahogany (*Swietenia macrophylla*) in northern Belize. **Forest Ecology and Management**, v. 92, 1-3, p. 87-96, 1997. Amsterdam.
- WOOLDRIDGE, D.D. Watershed disturbance from tractor and skyline crane logging. **Journal Forestry**. n. 58 – 5, p. 369-72, 1960.
- WORRELL, R. and HAMPSON A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils, a review. Institute of Chartered Foresters. **Forestry**, v. 70, n.1, 1997.
- WRONSKI, E. B. Impact of tractor thinning operations on soil and tree roots in a karri forest. **Australian Forestry Research**. n.14, p. 319-32, Western Australia. 1984.

ANEXO 1 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA

IDENTIFICAÇÃO: Perfil aberto na área de simulação de tráfego e umidade.

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo álico, Tb, com horizonte A moderado, textura média, substrato folhelhos e siltitos.

MUNICÍPIO: Otacílio Costa / SC.

LOCALIZAÇÃO: Segundo planalto catarinense, à 27° 25' de latitude e 50° 10' de longitude

SITUAÇÃO E DECLIVE: Trincheira aberta na porção intermediária da paisagem, com 20 à 25 % de declividade

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Arenitos avermelhados, arroxeados, amarelados e esbranquiçados, intercalados entre argilitos e siltitos avermelhados e arroxeados. Grupo Guatá, Formação Rio do Rasto, porção superior do Membro Morro Pelado (MAPA GEOL. SC, 1986)

MATERIAL DE ORIGEM: Material transportado da porção mais elevada da paisagem, intemperismo da rocha acima citada.

RELEVO: Local – ondulado e regional – fortemente ondulado.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Fase campo subtropical (EMBRAPA, 1988) e Floresta Ombrófila Mista (Projeto Radam Brasil).

USO ATUAL: Reflorestamento de *Pinus taeda*.

A 0 cm – 60 cm, bruno escuro (7,5 YR 4/4); franco argiloso, moderada, médias e grandes blocos sub angulares, muito duro, firme e ligeiramente plástico e pegajoso.

Bi 60 cm - 120 cm, bruno amarelado (10 YR 5/4); franco, moderada médias e grandes blocos sub angulares, ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

ANÁLISE FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Frações da amostra total (%)			Frações granulométricas da Terra fina (%)				% silte	Equivalente de umidade (%)
Simbolo	Profundidade (cm)	Calhau > 20 mm	Cascalho 20 - 2 mm	Terra fina < 2 mm	Arcia grossa 2-0,2mm	Arcia fina 0,2-0,02mm	Silte 0,02-0,002mm	Argila <0,002mm	% argila	
A	0 – 60	-	1,1	98,9	2,0	25,8	40,8	30,3	1,35	25
Bi	60-120	-	5,9	94,1	1,9	37,6	30,9	23,7	0,77	22

Horizonte	PH CaCl ₂	Complexo sortivo do solo (cmolc.dm ⁻³)							Valor V (sat.bases)	100 Al ⁺⁺⁺ / Al ⁺⁺⁺ + S	C %	P Mg/dm ³
		Ca ++	Mg ++	K +	Valor S	Al+++	H +	Valor T				
A	3,8	0,4	1,3	0,23	1,93	8,0	2,9	12,83	15,0	81	0,69	2,0
Bi	4,0	0,2	0,4	0,47	1,07	6,7	1,5	9,27	11,5	86	0,23	1,0

ANEXO 2 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA

IDENTIFICAÇÃO: Perfil raso aberto na área de grade, próximo à grade.

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo álico, Tb, com horizonte A moderado, textura argilosa, substrato folhelhos e siltitos.

MUNICÍPIO: Otacílio Costa / SC.

LOCALIZAÇÃO: Segundo planalto catarinense, à 27° 25' de latitude e 50° 10' de longitude

SITUAÇÃO E DECLIVE: Trincheira aberta na porção intermediária da paisagem, com 10 à 15 % de declividade

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Arenitos avermelhados, arroxeados, amarelados e esbranquiçados, intercalados entre argilitos e siltitos avermelhados e arroxeados. Grupo Guatá, Formação Rio do Rasto, porção superior do Membro Morro Pelado (MAPA GEOL. SC, 1986)

MATERIAL DE ORIGEM: Saprólitos da rocha acima citada.

RELEVO: Local – suavemente ondulado e regional – fortemente ondulado.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Fase campo subtropical (EMBRAPA, 1988) e Floresta Ombrófila Mista (Projeto Radam Brasil).

USO ATUAL: Reflorestamento de *Pinus taeda*.

A 0 cm – 12 cm, bruno acinzentado muito escuro (10 YR 3/2); argila; moderada, grandes blocos sub angulares; muito duro, muito firme, plástico e pegajoso.

Bi 12 cm - 30 cm, bruno amarelado escuro (10 YR 3/4); argila; moderada médias e grandes blocos sub angulares, muito duro, firme, plástico e pegajoso.

R 30 cm - 120⁺ cm, rocha variegada vermelho e amarelo

ANÁLISE FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Frações da amostra total (%)			Frações granulométricas da Terra fina (%)				% silte % argila	Equivalente de umidade (%)
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhau > 20 mm	Cascalho 20 - 2 mm	Terra fina < 2 mm	Areia grossa 2-0,2mm	Areia fina 0,2-0,02mm	Silte 0,02-0,002mm	Argila <0,002mm		
A	0 – 12	-	0,4	99,6	3,1	13,9	40,5	42,1	0,96	23
Bi	12 - 30	-	0,3	99,7	1,5	13,2	37,5	47,5	0,79	21

Horizonte	PH CaCl ₂	Complexo sortivo do solo (cmolc.dm ⁻³)							Valor V (sat.bases)	$\frac{100 \text{ Al}^{+++}}{\text{Al}^{+++} + \text{S}}$	C %	P Mg/dm ³
		Ca ++	Mg ++	K +	Valor S	Al+++	H +	Valor T				
A	3,8	0,4	0,4	0,20	1,00	11,0	6,1	18,1	5,5	92	1,44	3,0
Bi	3,9	0,3	0,5	0,06	0,86	8,3	5,5	14,6	5,2	91	0,98	1,0

ANEXO 3 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA

IDENTIFICAÇÃO: Perfil profundo aberto na área de grade, 90 m distante da grade .

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo álico, Tb, com horizonte A moderado, textura argilosa, substrato folhelhos e siltito.

MUNICÍPIO: Otacílio Costa / SC.

LOCALIZAÇÃO: Segundo planalto catarinense, à 27° 25' de lat. e 50° 10' de long.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Porção mais elevada da paisagem, 20 à 25 % de declividade.

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Arenitos avermelhados, arroxeados, amarelados e esbranquiçados, intercalados entre argilitos e siltitos avermelhados e arroxeados. Grupo Guatá, Formação Rio do Rasto, porção superior do Membro Morro Pelado (MAPA GEOL. SC, 1986)

MATERIAL DE ORIGEM: Saprólitos das rocha acima citada, com grande influência de siltitos avermelhados e arroxeados.

RELEVO: Local – suavemente ondulado e regional – fortemente ondulado.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Fase campo subtropical (EMBRAPA, 1988) e Floresta Ombrófila Mista (Projeto Radam Brasil).

USO ATUAL: Reflorestamento de *Pinus taeda*.

A 0 cm – 10 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; moderada grandes e médias blocos sub angulares; ligeiramente duro, friável plástico e pegajoso.

Bi 10 cm - 50 cm, bruno avermelhado (2,5 YR 4/4); argila; moderada grandes e médias blocos sub angulares, muito duro, muito firme, ligeiramente plástico e pegajoso.

C 50 cm - 170⁺ cm, vermelho escuro (2,5 YR 3/6); argila; moderada, grandes e médias blocos angulares, muito duro, extremamente firme, ligeiramente plástico e pegajoso.

ANÁLISE FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Frações da amostra total (%)			Frações granulométricas da Terra fina (%)				% silte % argila	Equivalente de umidade (%)
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhau > 20 mm	Cascalho 20 - 2 mm	Terra fina < 2 mm	Areia grossa 2-0,2mm	Areia fina 0,2-0,02mm	Silte 0,02-0,002mm	Argila <0,002mm		
A	0 – 10	-	0,3	99,7	1,0	3,6	52,8	42,3	1,25	22
B	10- 50	-	-	100	1,5	5,1	46,8	46,6	1,00	23
C	50 – 170	-	-	100	1,5	7,7	47,3	43,5	1,09	25

Horizonte	pH CaCl ₂	Complexo sortivo do solo (cmolc.dm ⁻³)							Valor V (sat.bases)	100 Al ⁺⁺⁺ / Al ⁺⁺⁺ + S	C %	P Mg/dm ³
		Ca ++	Mg ++	K +	Valor S	Al+++	H +	Valor T				
A	3,5	0,5	0,4	0,17	1,07	9,4	6,9	17,4	6,2	90	2,87	4,0
B	3,8	0,2	0,4	0,11	0,71	10,5	1,8	13,0	5,5	94	2,57	1,0
C	3,8	0,5	0,3	0,12	0,92	11,2	0,7	12,8	7,2	92	2,30	5,0

ANEXO 4 - LAUDO DE ANÁLISE TEXTURAL POR BLOCO, NA ÁREA DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E UMIDADE

IDENTIFICAÇÃO	AREIA GROSSA (%)	AREIA FINA (%)	ARGILA (%)	SILTE (%)	CLASSE TEXTURAL
Bloco I 0 - 10	1,5	25,0	38,2	35,3	Franco argilosa
Bloco I 10 - 20	1,0	25,0	40,6	33,4	Argilosa
Bloco I 30 - 40	1,5	23,0	40,9	34,6	Argilosa
Bloco II 0 - 10	1,5	29,6	37,8	31,1	Franco argilosa
Bloco II 10 - 20	1,5	28,6	39,3	30,6	Franco argilosa
Bloco II 30 - 40	2,0	25,0	37,5	35,5	Franco argilosa
Bloco III 0 - 10	1,5	25,0	32,9	40,6	Franco argilosa
Bloco III 10 - 20	2,0	21,5	35,7	40,8	Franco argilosa
Bloco III 30 - 40	1,5	26,5	40,9	31,1	Argilosa
Bloco IV 0 - 10	1,5	29,6	36,6	32,3	Franco argilosa
Bloco IV 10 - 20	1,5	25,5	25,2	47,8	Franco
Bloco IV 30 - 40	2,0	23,5	43,5	31,0	Argilosa

ANEXO 5 - LAUDO DE ANÁLISE DE FERTILIDADE POR BLOCO, NA ÁREA DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E UMIDADE

PARÂMETROS AVALIADOS	0 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 30 cm
pH em CaCl	3,80	4,00	3,80
Al ⁺³ cmolc/dm ³	8,0	6,7	11,2
H + Al cmolc/dm ³	10,9	8,2	11,9
Ca ⁺² + Mg ⁺² cmolc/dm ³	1,7	0,6	0,8
Ca ⁺² cmolc/dm ³	0,4	0,2	0,5
K ⁺ cmolc/dm ³	0,23	0,47	0,12
CTC	12,8	9,3	12,8
P mg/dm ³	2,0	1,0	5,0
C g/dm ³	1,2	0,4	0,1
M (%)	80,6	86,2	92,4
V (%)	15,0	11,5	7,2

ANEXO 6 - LAUDO DE ANÁLISE DE FERTILIDADE E TEXTURAL, NA ÁREA DE TRABALHO EFETIVO OU GRADE

PARÂMETROS AVALIADOS	0 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 30 cm
PH em CaCl	3,50	3,80	3,80
Al ⁺³ cmolc/dm ³	9,4	10,5	11,2
H + Al cmolc/dm ³	16,3	12,3	11,9
Ca ⁺² + Mg ⁺² cmolc/dm ³	0,9	0,6	0,8
Ca ⁺² cmolc/dm ³	0,5	0,2	0,5
K ⁺ cmolc/dm ³	0,17	0,11	0,12
CTC	17,4	13,0	12,8
P mg/dm ³	4,0	1,0	5,0
C g/dm ³	4,0	0,9	0,1
M (%)	89,8	93,7	92,4
V (%)	6,2	5,5	7,2
Classe textural *	Argila siltosa	Argila siltosa	Argila
Classe textural **	Argila siltosa	Argila siltosa	Argila siltosa

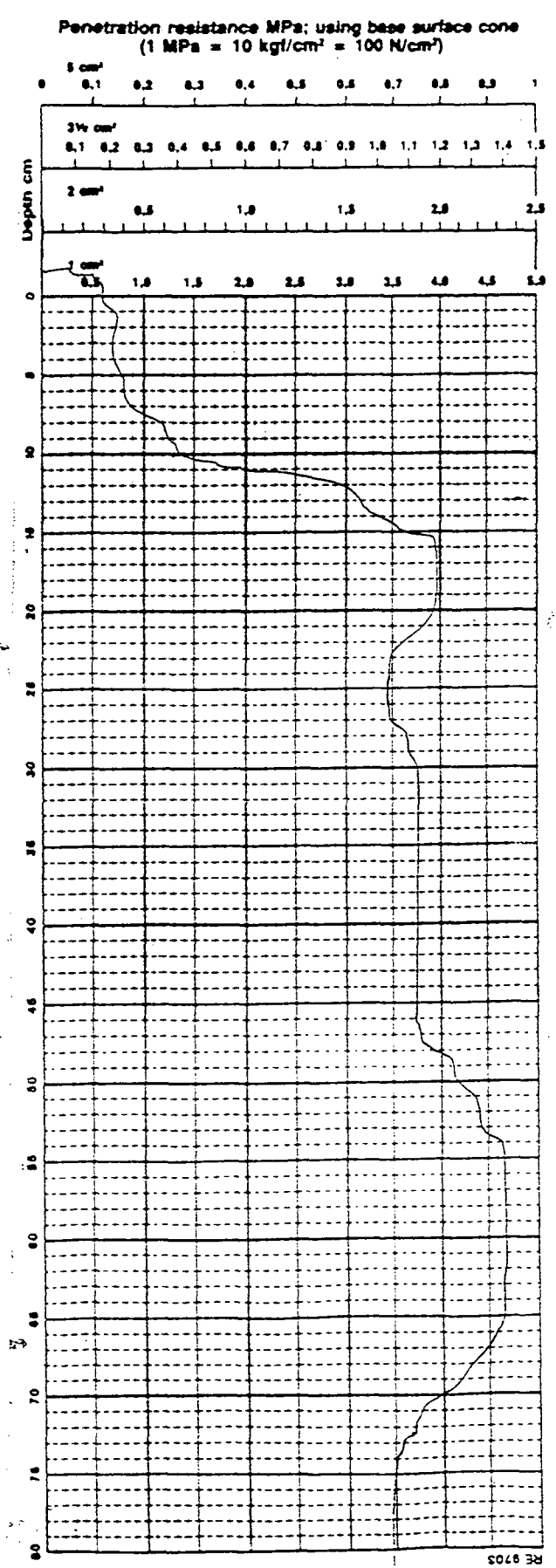
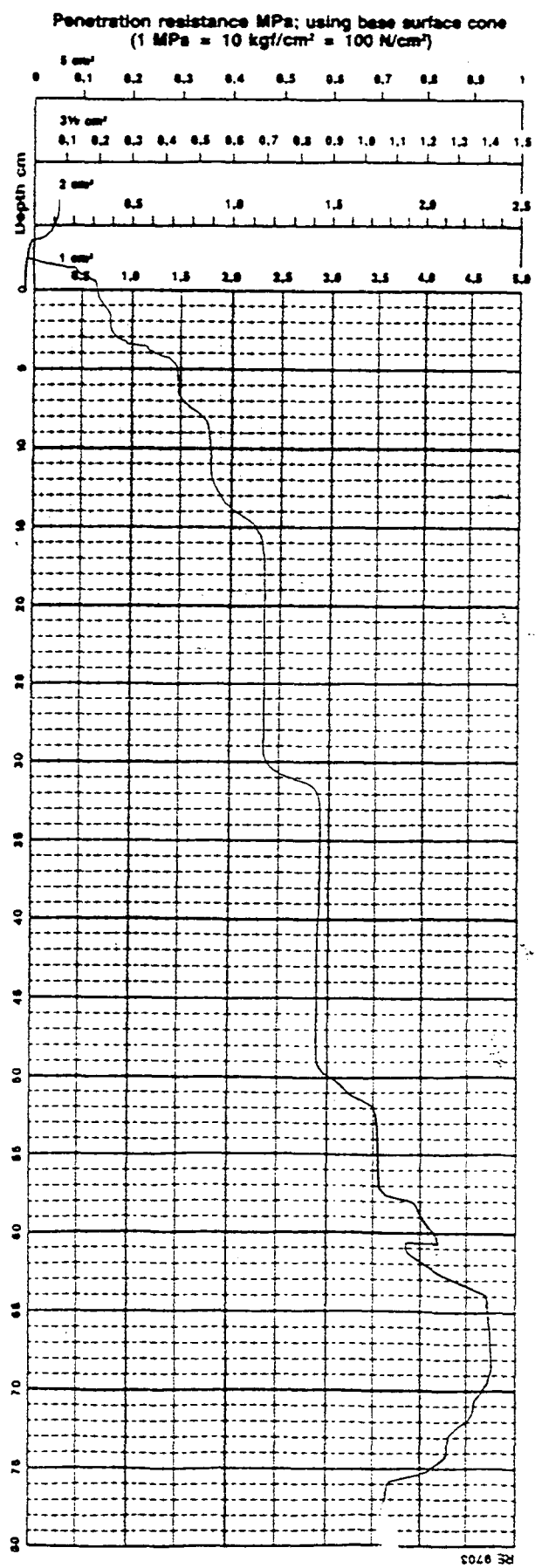
Obs.: * áreas próximo à grade, até 30 m (segundo bloco)

** áreas distantes além de 30 m da grade.

ANEXO 7- MODELO DE GRÁFICOS OBTIDO COM USO DO PENETRÓGRAFO

Elekomp object III 60 mm
 nr. 13
 date R0

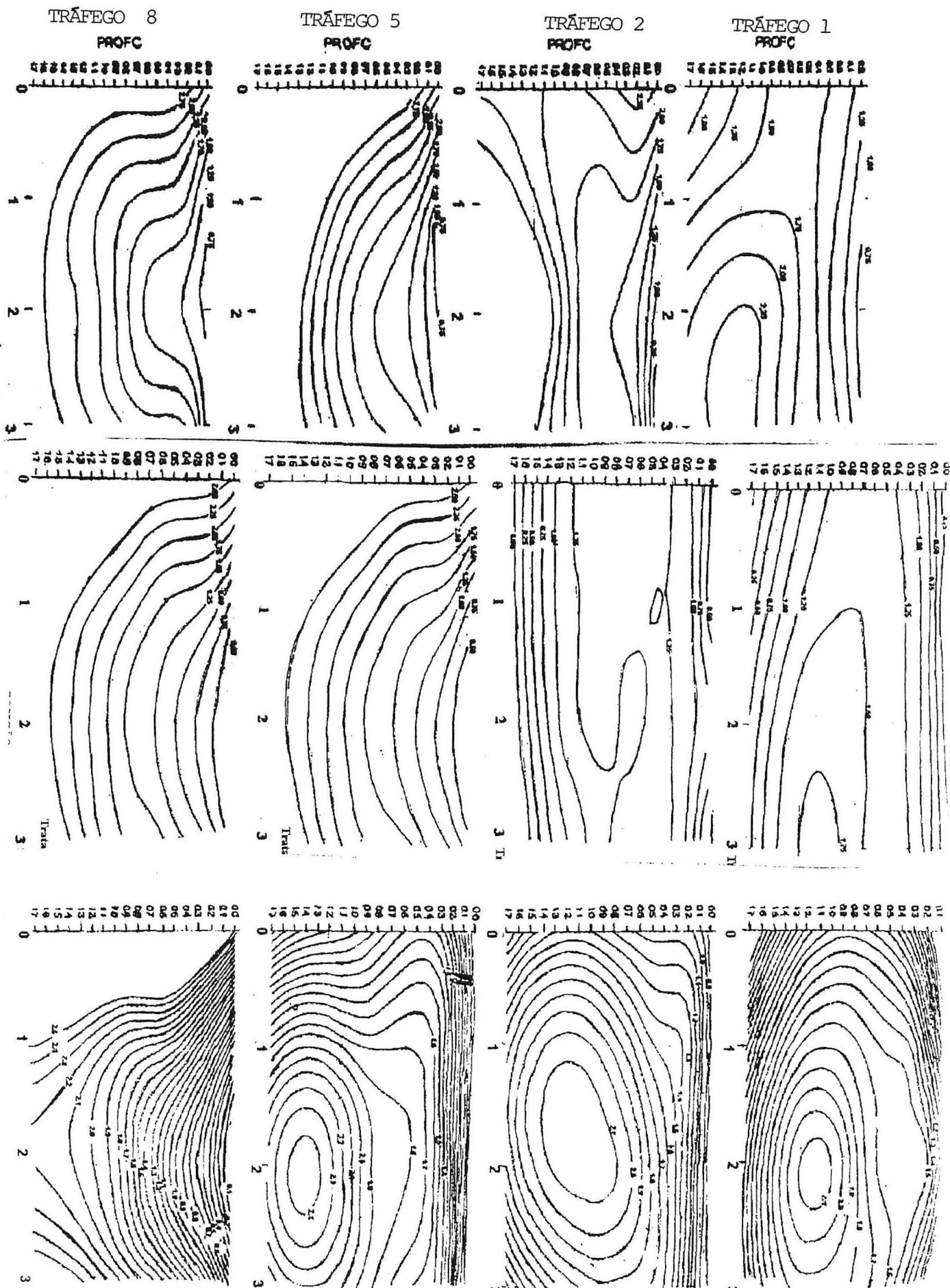
Elekomp object III 60 mm
 nr. 13
 date R1



RE 9703

RE 9703

ANEXO 8 – GRÁFICOS DE ISORESISTÊNCIA, PARA CÁLCULO DE ÁREA COMPACTADA PELO RODADO.



CONDICÃO NATURAL.

30 mm

60 mm

ANEXO 9 – AVALIAÇÃO EM % DE ÁREA COMPACTADA POR HECTARE.

DADOS:

ÁREA

- 1 ha , com espaçamento 2,50 m x 2,50 m
- Número de caminhos de máquina em 1 ha = 40
- Largura dos caminhos da máquina = 0,96 m
- Área de caminhos em 1 ha = 40 % ou 4000 m

PNEU (28L 26)

- Capacidade de carga = 4.285 kg;
- 14 lonas com 2 lonas de aço
- Pressão interna = 17 bar ou 25 libras
- Largura do pneu = 0,690 m à 0,732 m, média de 0,711m
- Largura da máquina = 2,95 m
- Sobreposição da largura do pneu = 0,25 m

VOLUME DE SOLO COMPACTADO, NOS TRATAMENTOS DE TRÁFEGO

TRATAMENTOS	Condição Natural		30 mm		60 mm	
	(%)		(%)		(%)	
Tráfego	> 1 MPa	> 2 MPa	> 1 MPa	> 2 MPa	> 1 MPa	> 2 MPa
1	74,3	13,3	74,3	10,0	74,3	7,0
2	75,0	6,7	66,7	9,3	73,3	6,7
3	75,0	11,7	70,0	7,3	70,0	7,3
4	66,7	8,3	68,3	7,3	70,0	8,3
5	71,7	6,7	67,3	13,3	71,7	6,7
6	70,0	11,7	67,3	8,3	70,0	7,3
7	70,0	10,0	71,7	6,7	60,0	7,0
8	56,7	8,3	63,3	9,0	58,3	3,3