

SEBASTIÃO EUDES LOPES

COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE
MÁQUINAS DE ARRASTE DE MADEIRA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2003

SEBASTIÃO EUDES LOPES

COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE
MÁQUINAS DE ARRASTE DE MADEIRA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA EM: 25 de fevereiro de 2003.

Prof. Luciano Baião Vieira
(Conselheiro)

Prof. Carlos Cardoso Machado
(Conselheiro)

Prof. Mauri Martins Teixeira

Prof. Afonso Lopes

Prof. Haroldo Carlos Fernandes
(Orientador)

Ao meu pai.

À minha mãe Maria Luiza.

À minha esposa Cleide.

À minha filha Julia.

Aos meus irmãos.

AGRADECIMENTO

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola.

À empresa CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S.A., pela oportunidade de realizar este trabalho, e aos funcionários, pelo apoio logístico e companheirismo.

Ao professor Haroldo Carlos Fernandes, pela orientação e amizade, pelas sugestões e pelo apoio.

Aos professores Luciano Baião Vieira e Carlos Cardoso Machado, pela contribuição na redação deste trabalho, pelas sugestões e pela atenção.

Aos amigos da Cia. Suzano de Papel e Celulose, pelo aprendizado na área de colheita florestal.

Aos colegas de pós-graduação da área de mecanização, pelo incentivo e pela amizade durante todo o processo de realização do curso de mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola e aos técnicos do Laboratório de Mecanização Agrícola da UFV.

BIOGRAFIA

SEBASTIÃO EUDES LOPES, filho de Alevino Lourenço Lopes e Maria Luiza Firmino Lopes, nasceu em 26 de junho de 1968, em Cajuri - MG.

Em 1987, concluiu o curso de Técnico Agrícola pela Central de Ensino e Desenvolvimento Agrário de Florestal.

Trabalhou na divisão florestal da Cia. Suzano de Papel e Celulose no período de 2 de fevereiro de 1988 a 4 de abril de 2002.

Em 1994, ingressou na Universidade Braz Cubas, em Mogi das Cruzes - SP, graduando-se em Engenharia Industrial Mecânica em dezembro de 1999.

Concluiu, em dezembro de 2002, o curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” em Engenharia de Segurança do Trabalho, pela Universidade Federal de Juiz de Fora – MG.

Em abril de 2001, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na UFV.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Compactação do solo.....	4
2.1.1. Densidade, porosidade, teor de matéria orgânica e umidade do solo	5
2.1.2. Resistência mecânica do solo à penetração	7
2.2. Pressão aplicada ao solo pelos rodados dos tratores e trafegabilidade	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1. Características gerais da área de estudo.....	12
3.2. Sistema de colheita	12
3.3. Descrição dos equipamentos de extração	13
3.4. Seleção e demarcação das trilhas.....	13
3.5. Determinação dos níveis de compactação nas trilhas de tráfego.....	17
3.5.1. Amostra de solo	17

	Página
3.5.2. Determinação física das amostras de solo	19
3.6. Variáveis físicas do solo	20
3.6.1. Densidade do solo.....	20
3.6.2. Densidade das partículas.....	20
3.6.3. Porosidade do Solo	21
3.6.4. Umidade do solo	21
3.7. Pressão de contato dos rodados	21
3.8. Resistência do solo à penetração	21
3.9. Perfil penetrométrico	22
3.10. Delineamento estatístico.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1. Pressão de contato dos rodados	23
4.2. Perfil penetrométrico	24
4.3. Densidade do solo.....	26
4.4. Densidade das partículas.....	30
4.5. Porosidade do solo	30
4.6. Umidade do Solo	32
4.7. Resistência do Solo à Penetração	32
5. RESUMO E CONCLUSÕES	35
6. RECOMENDAÇÕES.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
APÊNDICE.....	42
APÊNDICE A.....	43

RESUMO

LOPES, Sebastião Eudes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2003. **Compactação de um latossolo submetido ao tráfego de máquinas de arraste de madeira.** Orientador: Haroldo Carlos Fernandes. Conselheiros: Luciano Baião Vieira e Carlos Cardoso Machado.

Este trabalho foi conduzido em áreas de operação de colheita florestal em povoamento de eucaliptos, pertencentes à CELULOSE NIPO BRASILEIRA – CENIBRA, localizada no município de Belo Oriente, no Estado de Minas Gerais, e teve como objetivos avaliar os níveis de compactação do solo causada por dois tipos de máquinas de arraste de madeira (Track Skidder e Clambunk) em áreas com plantio de eucaliptos; determinar a influência do número de passadas das máquinas sobre o grau de compactação; e delinear o perfil penetrométrico do solo entre as linhas de tráfego. A determinação dos níveis de compactação do solo foi feita mediante o comportamento das propriedades físicas do solo (densidade do solo, porosidade total, densidade das partículas e resistência do solo à penetração). As coletas de amostras de solo foram feitas em blocos instalados aleatoriamente dentro do talhão, nos locais por onde passaram os rodados dos equipamentos e onde não passaram. Foram coletadas amostras em três profundidades do perfil do solo: 0-15 cm, 15-30 cm e 30-50 cm. Os

resultados deste trabalho permitiram as conclusões descritas a seguir. O perfil penetrométrico do solo apresentou valores significativos de resistência, provocados pelo peso da madeira quando arrastado e pelos sulcos formados pelos rodados dos equipamentos. Para a densidade do solo na profundidade de 0-15 cm, o Clambunk, trafegando uma vez e duas vezes carregado, registrou valores de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,37 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente – estes valores inibem o crescimento do sistema radicular do eucalipto. O Track Skidder trafegando duas vezes carregado apresentou um valor de $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, registrando o mesmo efeito. Para a profundidade de 15-30 cm, o Clambunk, trafegando duas vezes, registrou o mesmo valor de $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ para a densidade do solo. As dimensões dos rodados e o número de esteiras utilizadas pelo Clambunk garantem uma pressão de contato com o solo menor em relação ao Track Skidder, reforçando o fato de que as dimensões dos rodados permitem melhor distribuição das pressões no solo. Apesar de os rodados do Clambunk apresentarem maior distribuição de peso, a carga transportada é maior quando comparada com a do Track Skidder e concentrada no seu eixo traseiro, o que implicou maior impacto nas propriedades físicas do solo. A densidade das partículas do solo não apresentou diferença significativa em relação à testemunha, registrando interação com a condição de tráfego na profundidade de 15-30 cm.

ABSTRACT

LOPES, Sebastião Eudes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2003.
Evaluation of a soil compaction due to forest drag machines traffic.
Adviser: Haroldo Carlos Fernandes. Committee Members: Luciano Baião
Vieira and Carlos Cardoso Machado.

This work was carried out in areas of forest harvest operation in eucalyptus settlement, belonging to CELULOSE NIPO-BRASILEIRA – CENIBRA, located in Belo Oriente, in the State of Minas Gerais. The objectives were to evaluate the soil compaction levels caused by two types of forest drag machines (Track Skidder and Clambunk) in areas with eucalyptus crop; to determine the influence on the compaction degree of the time number the machines passed through and to delineate the soil penetrometric profile across the traffic lines. The determination of the soil compaction levels considered the behavior of soil physical properties (soil density, total porosity, particles density and soil penetration resistance). The soil samples were collected in blocks installed randomly in the plot, in areas where the equipments wheels passed through and where they didn't. Samples were collected in three different soil profile depths: 0-15 cm; 15-30 cm and 30-50 cm. Considering the conditions in which the experiment was carried, the results obtained allowed the following

conclusions. The soil penetrometric profile showed that there is difference between the resistance values caused by the weight of the wood when dragged and the furrows formed by the equipments wheels. For soil density in the depth of 0-15 cm, the Clambunk, passing through once and twice carried, registered values of $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ and $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$ respectively, which inhibit eucalyptus root system growth. The Track Skidder, passing through twice carried, presented a value of $1,27 \text{ g.cm}^{-3}$, registering the same effect. For the depth of 15-30 cm, the Clambunk, passing through twice, registered the same value of $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$ for soil density. The Clambunk wheels dimensions and the number of mats guarantee a contact pressure soil smaller when compared to the Track Skidder. Reinforces the fact that the wheels dimensions allow a better distribution of the pressures on the soil. In spite of the Clambunk wheels present larger weight distribution, the transported load is larger when compared to the Track Skidder and concentrated in its back axis, what implicates larger impact on the soil physical properties. The soil particles density didn't present significant difference in relation to control treatment and registered interaction with factor condition in the depth of 15-30 cm, being machines traffic condition that of largest effect on the particles density. The soil penetrometric profile showed that there is difference between the resistance values caused by the weight of the wood when dragged and that due to the furrows formed by the equipments wheels. In this case was registered the

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e a crescente demanda por alimentos, o processo de degradação dos recursos naturais tem se intensificado, tornando-se uma preocupação em todo o mundo. O uso sistemático de práticas inadequadas, como o desmatamento indiscriminado, as queimadas e a excessiva mobilização do solo, contribuiu para que as áreas agricultáveis fossem se degradando pouco a pouco. O aumento significativo do uso de máquinas na produção agrícola e florestal trouxe vários problemas de ordem ambiental nos recursos hídricos e edáficos. As normas sobre a preservação dos recursos naturais estão obrigando as empresas do setor a manifestar interesse na identificação, quantificação e minimização dos efeitos de suas atividades sobre o meio ambiente, ou seja, as empresas terão que conduzir suas atividades de maneira condizente com o desenvolvimento florestal sustentável.

As operações mecanizadas de colheita florestal se intensificaram no início da década de 90. Desde então, o sistema de colheita florestal tem levado o solo a um processo acelerado de degradação, principalmente devido ao aumento do tráfego das máquinas sobre o solo, resultando em desequilíbrio de suas características físicas, químicas e biológicas, afetando progressivamente o seu potencial produtivo.

O tráfego de máquinas em uma floresta resulta em alguns impactos no ecossistema, ocasionando danos às árvores remanescentes, prejuízos à capacidade de rebrota das cepas e influência na qualidade dos recursos hídricos e na compactação do solo florestal.

Além desses impactos sobre os recursos naturais, as empresas se preocupam também com uma redução na produtividade das áreas sob tráfego intenso, demonstrando que o uso sustentável do solo está relacionado com a questão do tráfego de veículos durante as operações de colheita, o que de certa forma garante a sobrevivência da empresa num mercado altamente competitivo e globalizado.

A premissa do setor florestal é efetuar as operações de colheita de madeira com máquinas que minimizem os impactos nas condições físicas do solo e reduzam a necessidade do preparo para novos plantios, sem interferir na produção da floresta.

O tráfego intenso de máquinas promove a compactação do solo, reduzindo a produtividade da floresta e aumentando os níveis de erosão. O controle da erosão é fator crucial para o uso sustentado do solo, e a produtividade, fator de sobrevivência econômica de qualquer empresa.

Com a contínua rejeição mundial pela madeira colhida nas florestas naturais, a busca por outras fontes de madeira cresceu. Plantações de eucalipto estão crescendo em vários países, perfazendo atualmente cerca de 28% dos 50 milhões de hectares de áreas plantadas com outras espécies no mundo. O setor florestal brasileiro vivencia, nos últimos anos, uma evolução tecnológica movida por demandas ocasionadas por diferentes oportunidades econômicas: o mercado de madeira se desenvolve e exige o aproveitamento das florestas plantadas em diversos produtos.

Mediante a importância do setor florestal para a economia do país e considerando a escassez de pesquisas no Brasil que indiquem a influência da compactação do solo no desenvolvimento florestal e na rebrota, assim como da relação com o sistema de colheita florestal, que são considerados fontes importantes para um manejo adequado das condições físicas do solo, melhorando

a produtividade da floresta e atendendo as exigências ambientais, este trabalho procurou atingir os seguintes objetivos:

- Avaliar os níveis de compactação do solo causados por dois tipos de máquinas de arraste de madeira (Track Skidder e Clambunk) em áreas com plantio de eucalipto.

- Determinar a influência do número de passadas das máquinas sobre o grau de compactação.

- Delinear o perfil penetrométrico do solo transversalmente às linhas de tráfego, para verificar os pontos de maior incremento na compactação do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Compactação do solo

A compactação do solo pode ser definida como a ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução de seu índice de porosidade, que pode ser definido com a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (CAMARGO, 1983; SEIXAS, 1988). Os espaços porosos perdidos com o efeito da compactação são na maioria macroporos, que são importantes na movimentação de água e ar pelo solo.

O comportamento do solo, com relação à compactação em decorrência do tráfego de máquinas, vem sendo estudado com frequência no setor agrícola, porém são poucas as pesquisas que tratam deste assunto no setor florestal. Os danos causados pela compactação em solos florestais diferem daqueles dos solos agrícolas devido a espécie, tamanho, ciclos das culturas cultivadas e máquinas utilizadas (GREACEN e SANDS, 1980). Os autores relatam que o peso das árvores e das máquinas utilizadas no processo de colheita contribui para o aumento da compactação do solo.

As características físicas e químicas do solo são diretamente afetadas pelo tipo de manejo a que ele é submetido. KONDO e DIAS JÚNIOR (1999) consideram que o sistema de manejo do solo altera as propriedades físicas e

mecânicas do solo com diferentes níveis de compactação, em função da umidade, dos diferentes tipos de solos e da época de realização das operações mecanizadas. O tráfego intenso de veículos pesados modifica a estrutura do solo, causando rompimento de suas resistências naturais, que se encontram interligadas por forças de atração e repulsão, alterando o fluxo de água no solo, reduzindo a produtividade da floresta e aumentando os níveis de erosão, já que geralmente reduz a taxa de infiltração, aumentando o escoamento superficial, uma vez que a velocidade da água no perfil do solo depende do tamanho dos poros (SEIXAS, 2000).

O nível de compactação do solo florestal em trilhas de tráfego florestal foi estudado por FERNANDES (1996), que encontrou maior incremento na densidade do solo para o Guincho Arrastador e o Harvester na profundidade de 0-15 cm. O autor concluiu que em todas as situações analisadas o Forwarder provocou menor compactação do solo em relação às operações de corte realizadas pelo Harvester e retirada das toras de eucalipto pelo Guincho arrastador.

2.1.1. Densidade, porosidade, teor de matéria orgânica e umidade do solo

A compactação é o aumento da densidade do solo em função dos arranjos das partículas primárias (argila, silte e areia). Quando o solo é submetido a um esforço cortante e/ou de pressão, há redução do espaço poroso, aumentando sua densidade. Normalmente, os solos formados por partículas pequenas, e de diferentes tamanhos, são mais facilmente compactados, porque as partículas pequenas podem ser encaixadas nos espaços formados entre partículas maiores, formando camadas de impedimento com baixa macroporosidade (CAMARGO, 1983).

Devido à redução da quantidade de macroporos, responsáveis pela aeração do solo, a proporção de microporos aumenta, aumentando a retenção da umidade e reduzindo a taxa de difusão de oxigênio, prejudicando assim o desenvolvimento das plantas. Diante disso, MANTOVANI (1987) considera a

porosidade de grande significado nos estudos referentes à compactação do solo, em virtude da relação direta entre a quantidade de solo disponível para as raízes das plantas e a quantidade de água e de ar que elas requerem para o bom desenvolvimento.

Estudando a compactação do solo causada por tráfego de máquina com base na variação da sua densidade, HASSAN e SIROIS (1985) constataram aumento significativo a partir de 10 cm de profundidade, afirmando que a compactação se deveu às cargas aplicadas pelos rodados dos equipamentos de colheita e arraste de madeira.

O efeito da compactação no desenvolvimento das plantas é percebido quando a raiz encontra resistência mecânica ao seu crescimento. Segundo CAMARGO (1983), esse impedimento ocorre quando o diâmetro da raiz é superior ao do poro no solo; se a raiz não romper esse impedimento, seu sistema radicular ficará denso e raso.

DIAS JÚNIOR e PIERCE (1996) consideram que as operações motomecanizadas utilizadas na colheita causam prejuízos ao desenvolvimento das plantas, pelo fato de provavelmente não haver um controle rígido da umidade do solo ou capacidade de suporte de carga no momento de realização das operações. Para os autores, o conhecimento sobre a umidade do solo é de grande importância, pois o teor de água no momento em que o solo está sendo compactado tem grande influência na redução e na redistribuição do espaço poroso. Os solos com baixos teores de água têm maior resistência à compactação. SEIXAS (2000) observou que o aumento da umidade resulta em redução da densidade, causando destruição na estrutura do solo. Ele afirma que os efeitos do conteúdo de água se alteram com as características do solo e o esforço de compactação aplicado sobre este. Se a umidade aumenta, a resistência à compactação diminui, por causa de uma maior lubrificação das partículas do solo.

Os efeitos do tráfego durante a colheita na compactação do solo, analisado segundo SEIXAS et al. (1998), trouxeram reduções significativas na compactação, quando o Forwader trafegou sobre camada de resíduos da colheita

de madeira. Foi detectado, de acordo com os autores, que os resíduos florestais com densidades de 10 e 20 kgm⁻² reduziram em média cerca de 40 pontos percentuais no incremento da densidade do solo observado em parcelas sem cobertura.

A compactação junto à superfície do solo, na região onde são colocadas as sementes, é prejudicial em razão das alterações nas propriedades físicas do solo, ou seja, modifica o comportamento térmico e altera a umidade e a resistência mecânica. VIEIRA (1981) relata a importância da umidade, da temperatura do solo e do estreito contato da semente com o solo no desenvolvimento das culturas em plantio direto, principalmente na germinação e emergência.

2.1.2. Resistência mecânica do solo à penetração

Estando o solo compactado, a resistência mecânica aumenta, reduzindo a porosidade total em função da perda dos espaços vazios. A resistência do solo à penetração é um parâmetro dinâmico, que depende da densidade do solo, do teor de umidade e do tipo de solo. A textura do solo tem influência nos valores da resistência do solo à penetração; o teor de água existente no solo é fator crucial para a determinação dos valores de resistência. Diversos autores mostram que os valores de resistência à penetração são diferentes quando avaliados com teores de água diferentes.

De acordo com MIRANDA (1986), os valores de resistência à penetração ao longo do perfil do solo, antes e depois do preparo, constituem um meio para verificar o grau de mobilização do solo, identificar camadas adensadas, determinar a eficiência de equipamentos e avaliar o potencial para o desenvolvimento de raízes. O autor considera a resistência do solo à penetração um parâmetro muito utilizado, por ser um método bastante prático e pela facilidade de coleta no campo, possibilitando grande número de pontos de amostragem. Como desvantagens podem ser citadas a falta do controle de umidade e a presença de raízes e pedras, que podem afetar as leituras.

A resistência média é denominada índice de cone e determinada até à profundidade de interesse. Para avaliar a resistência mecânica do solo à penetração, são utilizados os penetrógrafos, que podem ser de dois tipos: estático, que é pressionado à velocidade constante no solo; e de impacto, que é introduzido no solo pelas batidas de um peso (BALASTREIRE, 1987; VIERA, 1992).

O penetrógrafo estático tem sido o mais usado e registra, continuamente, em gráfico, a resistência à penetração em relação à profundidade. Tais leituras são o resultado de vários processos em conjunto, como corte do solo, cisalhamento, fluxo plástico, compressão e fricção metal-solo (HILLEL, 1980).

LIMA et al. (2001) avaliaram o comportamento da resistência do solo à penetração em trilhas entre linhas de plantio de eucalipto, em função da profundidade e do teor de água no solo. O sistema de colheita avaliado foi composto de um trator florestal derrubador-amontoador (Feller Buncher), de pneus diagonais, e de um trator florestal arrastador (Skidder), com pneus de baixa pressão. Segundo esses autores, a resistência do solo à penetração variou após o tráfego dos equipamentos e a variação mais acentuada ocorreu na profundidade de 0-10 cm, sendo crescente com o aumento da profundidade.

2.2. Pressão aplicada ao solo pelos rodados dos tratores e trafegabilidade

O contato rodado/solo é extremamente complexo e depende de uma grande quantidade de parâmetros relativos a esse contato. As características dos rodados e da superfície do solo é que determinam a pressão a ser exercida e sua distribuição no solo (MIALHE, 1980).

Segundo Reaves e Cooper (1976), citados por FERNANDES (1996), o trator de pneu aplica pressões maiores na superfície e em profundidade do que a exercida por uma máquina de esteira com mesmo peso total. De acordo com SEIXAS (2000), a duplagem dos pneus reduz significativamente a compactação do solo para diferentes profundidades.

Uma das maneiras de reduzir os problemas de compactação pelos rodados de um trator é o uso de pneus duplos, mas esse procedimento não elimina totalmente o efeito da compactação, porque há efeitos de compactação de um pneu sobre o outro. A compactação sob rodados duplos será menor em profundidade, porém será maior em extensão superficial, já que a área afetada será maior (VIEIRA, 1998).

Analisando a compactação de solos florestais, SILVERSIDES e SUNDBERG (1989) concluíram que a área de contato do pneu com o solo sofre acréscimo quando se aumenta a carga sobre o rodado. No entanto, afirmam que a pressão sobre o solo não sofre alteração, pois o aumento na área de contato é proporcional ao acréscimo da carga.

RAGHAVEN et al. (1977) estudaram a distribuição e as pressões no solo provocadas pelos rodados e concluíram que a pressão é maior no centro da banda de rodagem, apresentando redução à medida que se aproxima das laterais. Esta distribuição é representada pelos referidos autores através de curvas com formato de bulbo, as quais, em solos secos, são circulares e em solos úmidos são elípticas, atingindo camadas mais profundas.

De acordo com SILVERSIDES e SUNDBERG (1989), independentemente das características do solo, 90% da carga dinâmica sobre o pneu é aplicada verticalmente sobre a superfície do solo; os outros 10% deslocam-se para as laterais. A pressão aplicada ao solo é igual a 1,1 vez a pressão interna de inflagem do pneu, em solos florestais.

BLACKWELL e SOANE (1981) concluíram que a forma mais efetiva de se reduzir a compactação necessita não somente do emprego mínimo de carga, mas de uma área máxima de contato dos rodados com o solo.

Estudos de compactação do solo realizados por GREACEN e SANDS (1980) em operações florestais mecanizadas na Austrália detectaram pressão entre 85 e 100 kPa para o Skidder. As medições foram realizadas dividindo-se a massa total da máquina pela área de contato com o solo; as interferências, como as causadas pelo movimento da máquina e as geradas pelo peso da madeira, foram desprezadas.

RAGHAVEN et al. (1977) constataram que o deslizamento dos pneus, tanto em tratores agrícolas quanto florestais, contribui para a compactação do solo. A pressão gerada no solo no deslizamento pode ser considerada maior do que a pressão dos rodados. As pressões dos rodados estão concentradas no solo sob a banda de rodagem. Segundo KOGER et al. (1984), o deslizamento do pneu influencia mais a compactação do solo do que o tamanho do pneu ou a pressão interna de inflagem.

GREACEN e SANDS (1980) determinaram a compactação do solo sob cargas de 16 toneladas a 50-60 cm de profundidade. O movimento do solo foi detectado a 1,20 m de profundidade. Eles concluíram que, para profundidades maiores ou iguais a 40 cm, o tráfego de máquinas com cargas elevadas é decisivo para a magnitude da compactação. Em profundidades menores, a redução da compactação pode ser obtida usando-se equipamentos com pneus de baixa pressão superficial.

O efeito do tráfego dos tratores florestais sobre o solo é maior nas primeiras passadas, e o aumento da densidade do solo nas trilhas de tráfego está relacionado com o número de passadas, os tipos de rodado, o teor de matéria orgânica do solo e o tipo de máquina utilizada no sistema de colheita (SEIXAS, 2000). A carga dinâmica, a pressão interna dos pneus e as múltiplas passadas afetam a densidade do solo, variando-a significativamente de acordo com o tipo de solo.

A influência do número de passadas dos rodados de um Forwarder no nível de compactação de um solo, analisado segundo a sua densidade, ocorreu, conforme FERNANDES et al. (1997), depois da primeira passada, voltando a ocorrer novamente após a nona. Os autores observaram que o número de passadas não influenciou significativamente os valores de resistência do solo à penetração.

LIMA (1998), avaliando os efeitos do tráfego de máquinas florestais no nível de compactação do solo na colheita de madeira, observou que antes do tráfego dos tratores na área de corte o solo apresentava-se com maior densidade, menor porosidade e menor condutividade hidráulica saturada do solo, no nível de

20-30 cm de profundidade. Em relação aos demais níveis estudados, o autor concluiu que o efeito do tráfego dos tratores no solo é maior nas primeiras passadas, estando relacionado com a operação de corte realizada pelo Feller Buncher, fato este detectado devido à sua movimentação com o cabeçote carregado, várias vezes em um mesmo local.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características gerais da área de estudo

Este trabalho foi conduzido em áreas de operação de colheita florestal em povoamento de eucaliptos, pertencentes à CELULOSE NIPO-BRASILEIRA – CENIBRA, localizada no município de Belo Oriente, no Estado de Minas Gerais.

As áreas de coletas de dados são caracterizadas pela topografia montanhosa, altitude variando entre 600 e 800 m, latitude de 19° 22' 17'' sul e longitude de 42° 28' 18'' WGr, clima subtropical úmido e precipitação média de 1.200 mm/ano.

Os povoamentos florestais são da espécie *Eucalyptus grandis*, com idade média de 10 anos, espaçamento de 3 x 3 m e produtividade média de 350 m³/ha, tendo como finalidade matéria-prima para produção de polpa de celulose.

3.2. Sistema de colheita

As árvores foram colhidas inteiras, sendo as operações de corte, extração e traçamento totalmente mecanizadas.

No corte das árvores foi utilizado um trator florestal cortador acumulador, com rodados de esteiras metálicas (Feller Buncher), modelo 608L, da

Timberjack. Após esta etapa, os feixes de árvores foram desganhados e destopados manualmente, com o uso de machadinhas. Na extração utilizou-se um trator arrastador com esteiras (Track Skidder) Caterpillar, modelo 527, para a retirada da madeira em locais de difícil acesso, com declividade de até 35°, e um trator arrastador (Clambunk), modelo 1710B, da Timberjack, com esteiras metálicas nos rodados pneumáticos.

Após a extração, utilizou-se um carregador florestal de esteira com uma garra traçadora, modelo 320, na operação de traçamento, sendo as toras traçadas em toretes de 2,70 m.

3.3. Descrição dos equipamentos de extração

O experimento foi conduzido com a utilização de dois tipos de máquina:

– Trator arrastador com esteiras de metal (Track-Skidder), modelo 527, Caterpillar (Figuras 1 e 2) – potência de 150 HP (112 kW), massa de 21,5 t, equipado com lâmina frontal (Buldozer), arco acumulador da marca ESCO e área útil de 0,93 m², montado em braço articulado (Swing Boom).

– Trator arrastador (Clambunk) com esteiras nos rodados pneumáticos (Figuras 3 e 4), modelo 1710, Timberjack Corporation – potência de 210 HP (156,7 kW), massa de 20,8 t, equipado com lâmina frontal (Buldozer); a área da garra é de 2,2 m², com capacidade de carga para 14,0 t.

Na Figura 5 é apresentada a disposição da madeira após o arraste realizado pelas máquinas.

3.4. Seleção e demarcação das trilhas

O experimento foi conduzido dentro de um talhão com área mecanizada de 70,75 ha. Para seleção e demarcação foram sorteadas antecipadamente as trilhas, relacionando o número de passadas (testemunha, vazia, primeira passada carregada e segunda passada carregada) com o tipo de máquina. O Track Skidder foi denominado máquina 1, e o Clambunk, máquina 2. Os tratamentos foram definidos conforme a seguir:



Figura 1 – Trator arrastador (Track Skidder).



Figura 2 – Arraste da madeira realizado pelo Track Skidder.



Figura 3 – Trator arrastador (Clambunk).



Figura 4 – Arraste da madeira realizado pelo Clambunk.



Figura 5 – Disposição da madeira após o arraste.

Tratamento 1 – Track Skidder, vazia (TS.V)

Tratamento 2 – Track Skidder, carregada uma vez (TS.C1)

Tratamento 3 – Track Skidder, carregada duas vezes (TS.C2)

Tratamento 4 – Clambunk, vazia (CL.V)

Tratamento 5 – Clambunk, carregada uma vez (CL.C1)

Tratamento 6 – Clambunk, carregada duas vezes (CL.C2)

Tratamento 7 – Tratamento adicional (linha sem tráfego - TEST)

Os blocos foram instalados aleatoriamente dentro do talhão com dimensões de 50 m de largura por 50 m de comprimento, totalizando uma área com 0,25 ha. Como os tratores não passavam mais que duas vezes na mesma trilha, definiu-se como sendo 2 o número máximo de passadas por uma mesma trilha. O Track-Skidder não obedece a uma linha definida de tráfego, devido ao baixo número de árvores arrastadas por viagem, o que dificulta a quantificação do percurso dentro do talhão; no entanto, para a coleta de dados não houve problema, por ter sido definido previamente o percurso.

O Quadro 1 relaciona as características das trilhas de tráfego e o tratamento estudado.

Quadro 1 – Características das trilhas de tráfego em função das condições de tráfego

Bloco	Declividade (graus)	Área (ha)	Condição 1	Condição 2	Condição 3
1	19	0,25	Vazia	1 vez carregado	2 vezes carregado
2	14	0,25	Vazia	1 vez carregado	2 vezes carregado
3	14	0,25	Vazia	1 vez carregado	2 vezes carregado
4	18	0,25	Vazia	1 vez carregado	2 vezes carregado

3.5. Determinação dos níveis de compactação nas trilhas de tráfego

A determinação dos níveis de compactação do solo foi feita mediante o comportamento das propriedades físicas do solo e de acordo com as passadas dos rodados das duas máquinas, nas trilhas utilizadas na retirada da madeira.

A compactação foi determinada por meio das variáveis físicas do solo: densidade do solo, porosidade total, densidade das partículas e resistência do solo à penetração.

3.5.1. Amostra de solo

O solo foi amostrado em locais sem o tráfego e depois das passadas dos rodados, onde se formaram os sulcos (Figura 6). Foram coletadas amostras em três profundidades do perfil do solo: 0-15 cm, 15-30 cm e 30-50 cm, em função dos números de passadas: vazio, uma passada carregado e duas passadas carregado, em quatro pontos espaçados de 10 m entre si e distribuídos ao longo da trilha, perfazendo um total de 120 amostras dentro de cada bloco.



Figura 6 – Trilha de arraste e os locais da retirada das amostras.

3.5.2. Determinação física das amostras de solo

As determinações físicas das amostras de solo foram realizadas no laboratório de solos da Celulose Nipo-Brasileira – Cenibra, em Belo Oriente – MG.

O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa. A análise granulométrica foi determinada segundo NBR-7181 da ABNT (1982). Os valores estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Análise granulométrica do solo em função dos blocos estudados

Bloco	Profundidade da amostra (cm)	Composição granulométrica (%)			Classificação textural
		Areia	Silte	Argila	
1	0-15	28	7	65	Muito Argiloso
	20-30	24	8	67	Muito Argiloso
	30-50	25	8	67	Muito Argiloso
2	0-15	30	4	66	Muito Argiloso
	20-30	22	5	73	Muito Argiloso
	30-50	23	5	72	Muito Argiloso
3	0-15	31	8	61	Muito Argiloso
	20-30	30	7	63	Muito Argiloso
	30-50	22	6	65	Muito Argiloso
4	0-15	30	6	63	Muito Argiloso
	20-30	28	7	64	Muito Argiloso
	30-50	26	5	69	Muito Argiloso

3.6. Variáveis físicas do solo

3.6.1. Densidade do solo

Foram coletadas amostras indeformadas, por meio do método do anel volumétrico (Ulland) em quatro pontos igualmente espaçados de 10 m entre si e distribuídos ao longo da trilha. As coletas foram realizadas em trilhas por onde as máquinas não passaram (testemunha) e nas trilhas após a passada dos rodados das máquinas, no centro dos sulcos. Após a coleta, as amostras foram colocadas em estufas, conforme método descrito em EMBRAPA (1979).

A densidade do solo foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$DS = \frac{MS}{VA} \quad \text{eq. 1}$$

em que

DS = densidade do solo (g cm^{-3});

MS = massa do solo seco em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$; e

VA = volume do anel (cm^{-3}).

3.6.2. Densidade das partículas

O método utilizado foi o do balão volumétrico de 50 mL (EMBRAPA, 1979), sendo determinado conforme a seguinte expressão:

$$DP = \frac{MS}{VS} \quad \text{eq.2}$$

em que

DP = densidade das partículas (g cm^{-3});

MS = massa do solo seco (20 g); e

VS = volume do solo ocupado pela parte sólida (cm^{-3}).

3.6.3. Porosidade do Solo

A porosidade foi determinada pelo método indireto:

$$POT = \left(1 - \frac{DS}{DP}\right) \times 100 \quad \text{eq.3}$$

em que

POT = porosidade total (%);

DS = densidade do solo (g cm^{-3}); e

DP = densidade das partículas (g cm^{-3}).

3.6.4. Umidade do solo

A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico descrito em EMBRAPA (1979).

3.7. Pressão de contato dos rodados

A área de contato da esteira com o solo foi determinada em função da largura da esteira, pela distância entre os eixos da roda-guia e a roda motriz (MIALHE, 1980).

3.8. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada por meio de um penetrógrafo da marca SOIL CONTROL, modelo SC-60, com uma haste de 600 mm de comprimento, 9,53 mm de diâmetro, equipada com um cone de 129,3 mm² de área da base, 12,83 mm de diâmetro e 30 graus de ângulo de vértice. O valor da resistência foi registrado em ficha própria, em virtude da profundidade de penetração.

Foram determinados valores em quatro pontos, espaçados ao longo da trilha e analisados em três intervalos de profundidades. A resistência do solo à penetração foi calculada por meio do índice de cone (IC), nos intervalos de 0-15, 15-30 e 30-50 cm para cada tratamento, conforme VIEIRA (1992).

3.9. Perfil penetrométrico

O perfil penetrométrico foi determinado entre as linhas de plantio, considerando os sulcos formados pelos rodados dos equipamentos, e na entrelinha, com largura de 2,8 m; os pontos de amostragem foram coletados em quatro pontos espaçados ao longo da trilha, transversais ao sentido das passadas e distantes aproximadamente 0,7 m.

O perfil penetrométrico foi analisado em três intervalos de profundidade (0-15, 15-30 e 30-50), através da resistência do solo à penetração, medida pelo índice de cone. Comparou-se o local de arraste das árvores na entrelinha com o sulco formado pelos rodados dos equipamentos nas condições de uma e duas vezes carregado. Para determinação do perfil penetrométrico foi utilizada a planilha eletrônica EXCEL.

3.10. Delineamento estatístico

Para a determinação da variação das propriedades físicas do solo pela sobreposição das passadas dos rodados dos dois tratores arrastadores, utilizou-se o delineamento estatístico em blocos casualizados, em esquema fatorial $2 \times 3 + 1$, sendo duas máquinas e três condições de tráfego, e um tratamento adicional como controle. O estudo foi realizado em três níveis de profundidade, 0-15, 15-30 e 30-50 cm. Usando o programa estatístico SAEG, versão 8.0, os dados foram submetidos às análises de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os dados foram submetidos ao teste de Dunnett, a 5% de probabilidade, para comparar os tratamentos com a testemunha.

Cada bloco foi demarcado em uma área de 0,25 ha, sendo 50 m de comprimento e 50 m de largura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Pressão de contato dos rodados

Os valores médios de pressão de contato do Clambunk e Track Skidder estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores da pressão aplicada ao solo pelo rodado das máquinas e volume de madeira arrastado

	Equipamentos	
	Track Skidder	Clambunk
Área de contato por esteira (m ²)	1,74 (x2)	1,95 (x4)
Pressão de contato (kPa)	61,86	26,67
Massa da máquina (t)	21,50	20,80
Área da pinça (m ³)	0,93	2,20
Volume médio arrastado (m ³)	8,80	21,0

O uso de esteira nos pneus do Clambunk ocorreu quando o equipamento teve dificuldades para se deslocar nas linhas de tráfego a fim de efetuar o arraste das árvores, devido à umidade do solo, ou quando se trabalhou em locais de difícil acesso; já no caso do Track Skidder as esteiras são fixas, o que facilita seu deslocamento em locais de difícil acesso.

Os valores encontrados demonstram que uso de esteiras nos pneus do Clambunk facilitou seu deslocamento e contribuiu na distribuição da carga no solo. Constatou-se que o volume transportado pelo Clambunk foi em média 2,5 vezes a carga do Track Skidder, com uma pressão de contato menor, devido ao número e às dimensões de seus pneus.

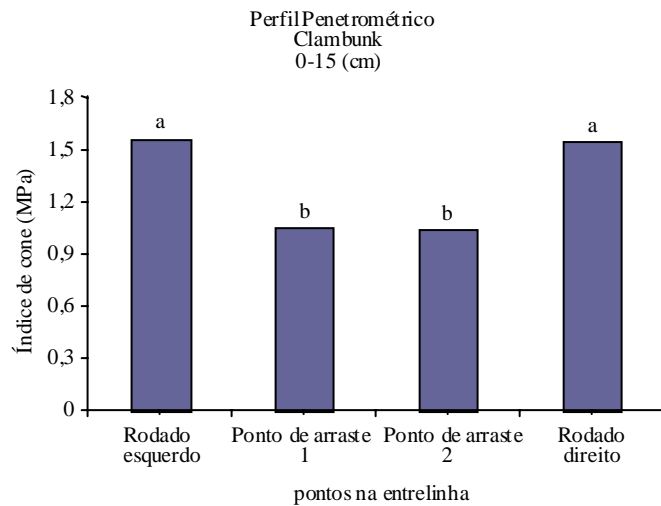
4.2. Perfil penetrométrico

O perfil penetrométrico do solo na profundidade de 0-15 cm evidenciou a diferença entre os valores de resistência do solo à penetração dos rodados das máquinas em relação ao local de arraste de madeira (Figuras 7 e 8). Não houve interação significativa entre os pontos de arraste e rodados com a condição de tráfego, uma e duas vezes carregado, para essa profundidade.

Na Figura 9 é representado o comportamento das máquinas para o perfil de 30-50 cm. Neste perfil o tráfego do Clambunk apresentou efeitos significativos, sendo duas vezes carregado o maior efeito. O arraste da madeira e os rodados do Track Skidder não registram efeito significativo nos valores de resistência do solo à penetração nessa profundidade.

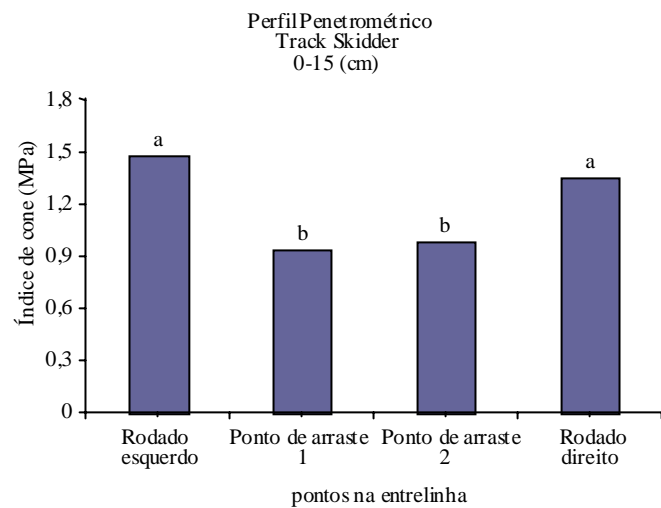
Como o volume de madeira arrastado pelo Clambunk foi superior ao arrastado pelo Track Skidder, esperava-se uma interferência desse volume nos valores de resistência do solo à penetração para todos os perfis do solo estudado; no entanto, esse comportamento foi observado apenas para essa profundidade.

Para 30-50 cm de profundidade, o rodado esquerdo do Track Skidder apresentou maior efeito sobre os pontos de arraste e o rodado direito, que não evidenciou diferença para o ponto de arraste 2. O perfil do Clambunk apresentou semelhança nas profundidades de 15-30 e 30-50 cm; os valores registraram um



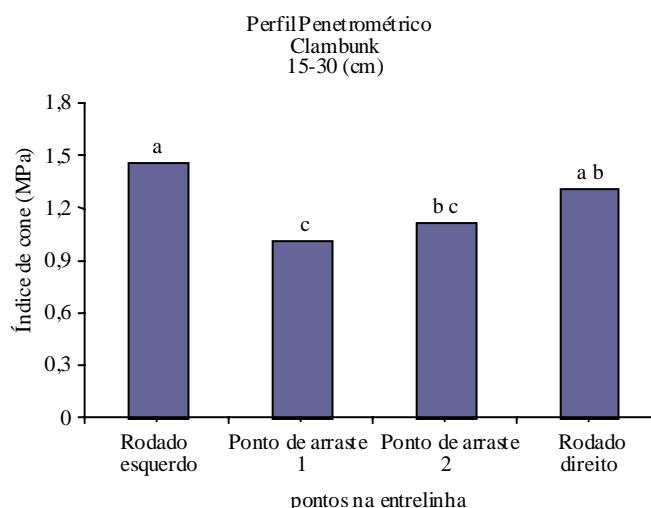
Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Figura 7 – Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelos rodados e o local de arraste das árvores.



Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Figura 8 – Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelos rodados e o local de arraste das árvores.



Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

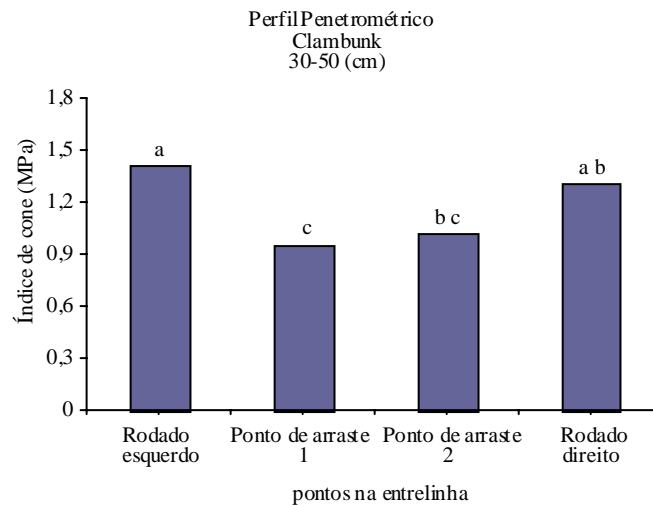
Figura 9 – Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelos rodados e o local de arraste das árvores.

comportamento semelhante para os rodados e os pontos de arraste, destacando a diferença do rodado esquerdo com os pontos de arraste. O rodado direito não apresentou diferença em relação ao rodado esquerdo e ao ponto de arraste 2, conforme ilustrado pelas Figuras 10 e 11. Todos os valores da interação entre os fatores estão nas análises de variância apresentadas no Apêndice.

4.3. Densidade do solo

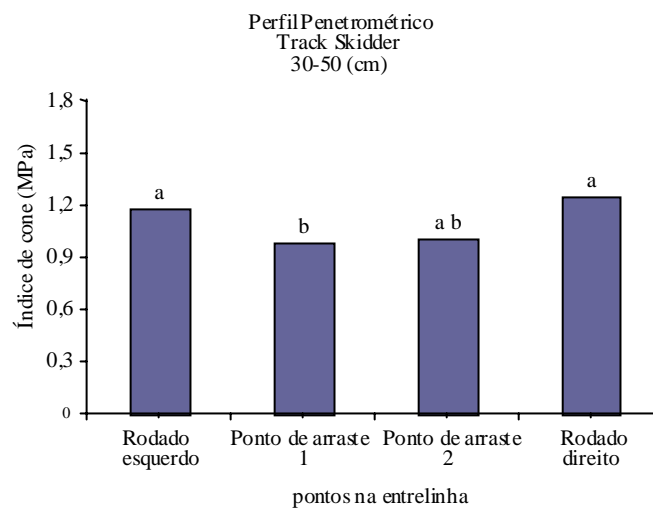
Nas profundidades do solo analisadas não foram registradas interações significativas para os fatores máquinas e condição de tráfego. Os efeitos causados pelo tráfego das máquinas na compactação do solo foram evidenciados quando se compararam os tratamentos (locais de tráfego) com a testemunha (locais sem tráfego).

Na profundidade superficial do solo (0-15 cm) representado pela Figura 12, apenas o TS.V não registrou efeito nos valores de densidade do solo.



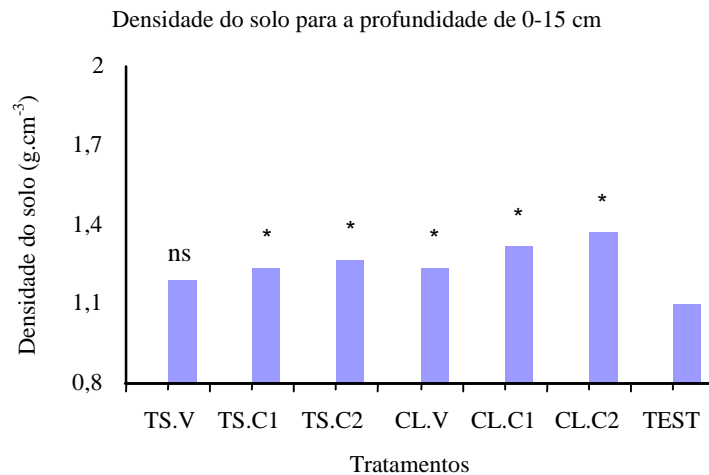
Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Figura 10 – Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelos rodados e o local de arraste das árvores.



Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Figura 11 – Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelos rodados e o local de arraste das árvores.



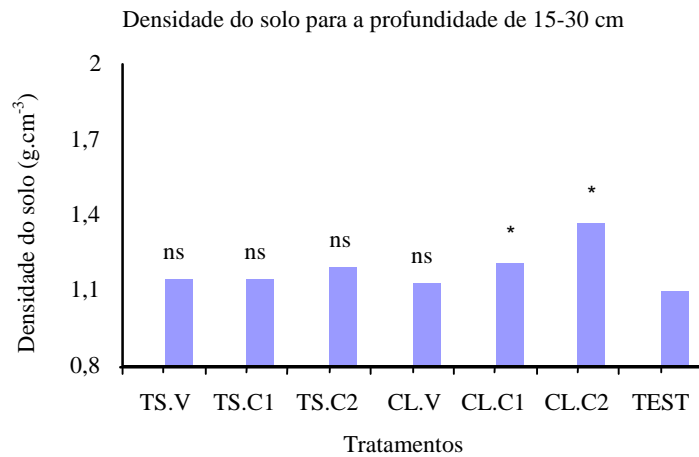
(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 12 – Valores médios de densidade do solo na profundidade de 0-15 cm.

A Figura 13 mostra que a 15-30 cm de profundidade os tratamentos CL.C1 e CL.C2 registraram alterações nos valores de densidade do solo, ou seja, o Clambunk carregado uma ou duas vezes interferiu na densidade do solo, sendo duas vezes carregado a de maior impacto.

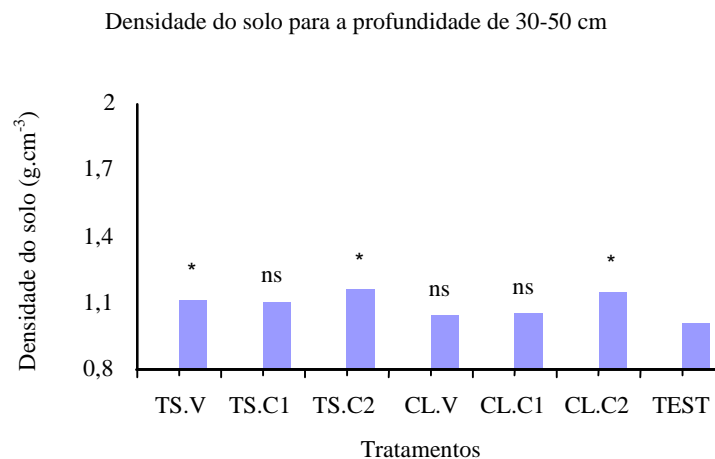
Para a profundidade de 30-50 cm, os tratamentos TS.C1, CL.V e CL.C1 não registraram efeitos significativos na densidade do solo, conforme mostra a Figura 14.

Pesquisas mostram que as raízes apresentam dificuldades de crescimento com valores de densidade na faixa de 1,25 a 1,35 gcm⁻³. Os valores encontrados neste trabalho mostram que os tratamentos TS.C2, CL.C1 e CL.C2 apresentaram, para a camada de 0-15 cm do solo, valores na faixa de inibição do crescimento do sistema radicular do eucalipto de 1,27, 1,32 e 1,37 gcm⁻³, respectivamente. Na faixa de 15-30 cm, apenas CL.C2 registrou valores prejudiciais, e para 30-50 cm nenhum valor prejudicial foi registrado. Os valores das análises de variância são apresentados no Apêndice.



(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 13 – Valores médios de densidade do solo na profundidade de 15-30 cm.



(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 14 – Valores médios de densidade do solo na profundidade de 30-50 cm.

4.4. Densidade das partículas

O tráfego das máquinas vazia e uma vez carregada não interferiu na densidade das partículas do solo, não havendo diferença significativa entre os valores dos tratamentos e os da testemunha. Registrou-se interação significativa no fator condição na profundidade de 15-30 cm. O efeito do fator condição de tráfego das máquinas nos valores de densidade das partículas está representado no Quadro 3.

Quadro 3 – Comparação do efeito simples para o fator condição dos valores médios de densidade de partículas na profundidade de 15-30 cm

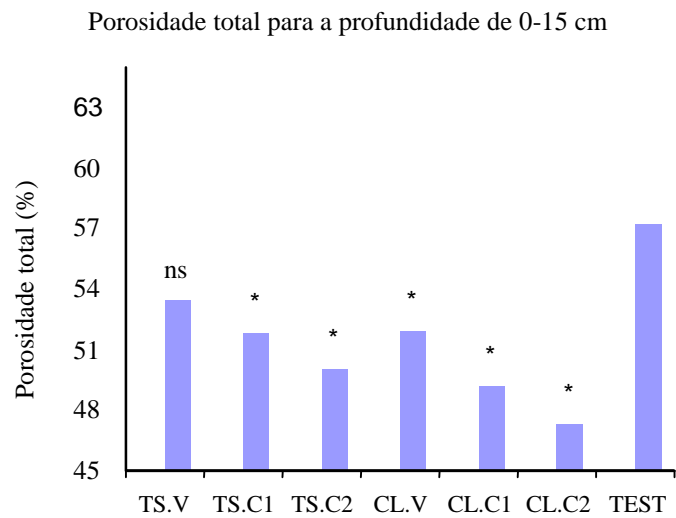
	Condição de tráfego da máquina		
	2 vezes carregada	1 vez carregada	Vazia
Médias	2,59 a	2,57 a	2,25 b

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

4.5. Porosidade do solo

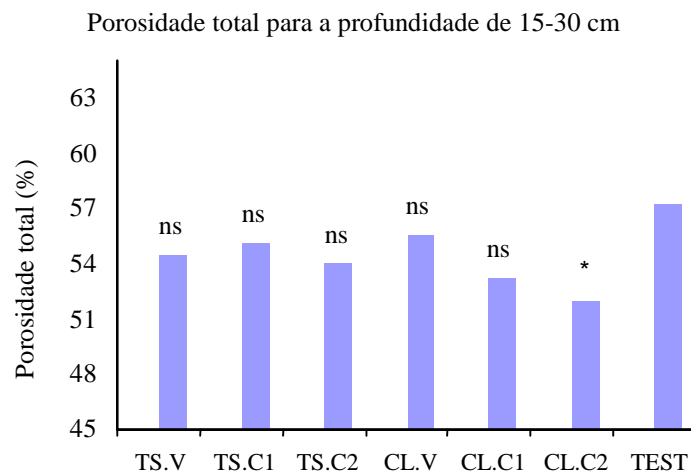
Os valores de porosidade do solo na profundidade de 0-15 cm apresentaram diferenças significativas quando comparados os tratamentos com a testemunha. Apenas no tratamento TS.V não se registrou diferença significativa, isto é, somente o Track Skidder trafegando vazio não mostrou efeito sobre o índice de porosidade do solo em relação à testemunha. Na profundidade de 15-30 cm não houve interação entre os fatores em estudo. Quando comparados com a testemunha, apenas o tratamento CL.C2 diferiu estatisticamente, conforme ilustrado pelas Figuras 15 e 16.

Na Figura 17 é mostrado que na profundidade de 30-50 cm não houve interação entre os fatores em estudo. Quando comparados com o tratamento



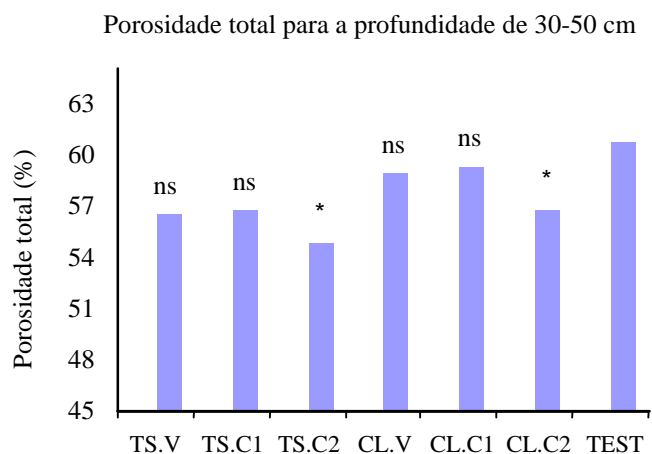
(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 15 – Valores médios de porosidade total na profundidade de 0-15 cm.



(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 16 – Valores médios de porosidade total na profundidade de 15-30 cm.



(ns) não-significativo ou (*) significativamente diferente do controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Figura 17 – Valores médios de porosidade total na profundidade de 30-50 cm.

testemunha, CL.C1 e CL.C2 diferiram estatisticamente, apresentando valores que afetam o desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto. Os valores da porosidade do solo estão de acordo com os encontrados para a densidade do solo, uma vez que o aumento da densidade reduz o índice de porosidade do solo.

4.6. Umidade do Solo

A umidade do solo não apresentou diferença significativa nas diferentes profundidades estudadas, como se pode observar pelos valores apresentados no Quadro 4 .

4.7. Resistência do Solo à Penetração

Os valores de resistência do solo à penetração para a faixa de 0-15 cm não apresentaram efeito significativo entre a máquina e a condição em que trafegavam. Ao comparar os valores com a testemunha, os tratamentos TS.C2, CL.C1 e CL.C2 mostraram diferenças significativas.

Quadro 4 – Valores médios da umidade do solo nos três níveis de profundidade

Profundidade (cm)	Tratamentos						
	TS.V	TS.C1	TS.C2	CL.V	CL.C1	CL.C2	TEST
0-15	32,2 a	31,0 a	31,7 a	32,5 a	31,5 a	30,5 a	33,0 a
15-30	29,75 a	29,5 a	29,4 a	30,0 a	29,75 a	30,25 a	30,25 a
30-50	28,5 a	28,4 a	28,77 a	28,87 a	28,36 a	29,75 a	29,75 a

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Na faixa de 15-30 cm de profundidade não houve interação significativa para os fatores máquinas e condição. Quando comparado com a linha sem tráfego, apenas o CL.C2 apresentou diferença significativa.

Para a faixa de 30-50 cm de profundidade a condição de tráfego das máquinas apresentou efeito significativo, ou seja, independentemente do tipo de máquina, sua condição afeta a resistência do solo à penetração, sendo a condição 3, duas vezes carregado, a de maior efeito, conforme mostra o Quadro 5. Quando comparado com a testemunha, o CL.C2 novamente foi o que apresentou diferença significativa, isto é, o Clambunk trafegando duas vezes carregado na mesma trilha afetou a resistência do solo à penetração.

Quadro 5 – Comparação do efeito do fator condição nos valores médios de índice de cone na profundidade de 30-50 cm

Condição de tráfego da máquina	Médias
2 vezes carregada	1,3245 A
1 vez carregada	1,2635 A B
Vazia	1,0902 B

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Os valores teóricos de resistência do solo à penetração, para uma condição de umidade abaixo da faixa encontrada, considerada prejudicial ao desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto, é de 3,0 MPa, necessitando de maior atenção na faixa de 2,5 a 3,0 MPa. Todos os valores encontrados neste trabalho foram abaixo da faixa considerada prejudicial ao desenvolvimento do eucalipto, não significando que o tráfego dos equipamentos e o arraste das árvores nas condições em estudo não irão prejudicar o desenvolvimento desta planta, pois os resultados diferem dos encontrados para os valores de densidade do solo, os quais evidenciaram uma condição crítica de compactação em alguns tratamentos. Os dados estão de acordo com vários estudos que mostram que a resistência do solo à penetração aumenta com o aumento da densidade e diminui com o aumento da umidade do solo – os valores são apresentados no Apêndice. As diferenças entre tratamentos e testemunha para a resistência do solo à penetração, representada pelo índice de cone nos três níveis de profundidades, são mostradas na Figura 18.

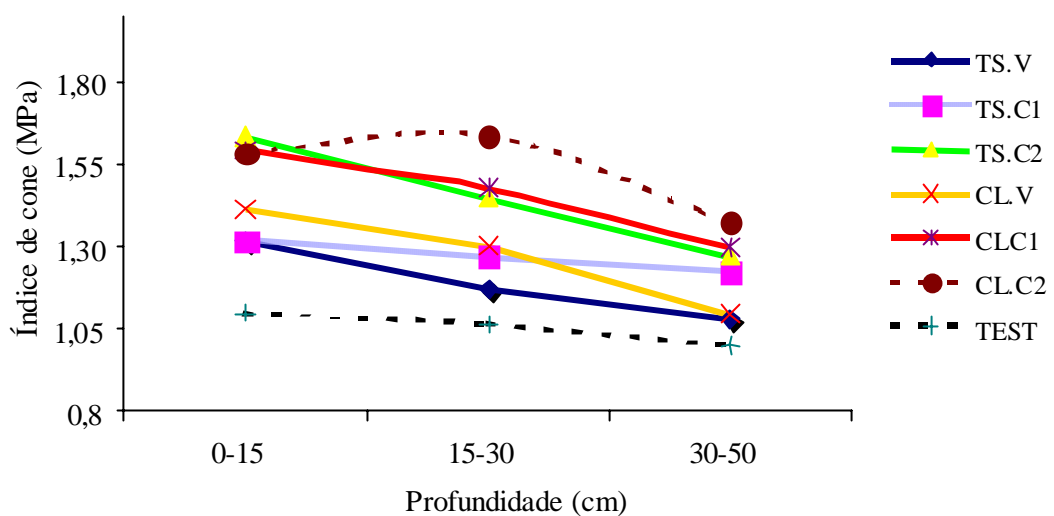


Figura 18 – Valores médios de índice de cone para tratamentos e testemunha.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi conduzido em áreas de operação de colheita florestal em povoamento de eucaliptos, pertencentes à CELULOSE NIPO-BRASILEIRA – CENIBRA, localizada no município de Belo Oriente, no Estado de Minas Gerais, e teve como objetivos avaliar os níveis de compactação do solo causada por dois tipos de máquinas de arraste de madeira (Track Skidder e Clambunk), em áreas com plantio de eucaliptos; determinar a influência do número de passadas das máquinas sobre o grau de compactação; e delinear o perfil penetrométrico do solo entre as linhas de tráfego.

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas e para as condições que em este trabalho foi conduzido, pode-se concluir que:

– O número de passadas das máquinas interfere no grau de compactação do solo para as condições estudadas.

– O tráfego dos equipamentos carregados – Track skidder duas vezes e Clambunk uma e duas vezes – para a profundidade de 0-15 cm apresentou valores dentro da faixa de inibição do crescimento do sistema radicular do eucalipto (densidade do solo de 1,27, 1,32 e 1,37 gcm⁻³, respectivamente), os quais estão de acordo com os encontrados por SEIXAS (2000).

– O tráfego do Clambunk carregado duas vezes registrou efeito na densidade em todos os perfis do solo estudado. Pode-se observar que a quantidade de madeira arrastada pelos equipamentos interferiu no grau de compactação do solo.

– Os valores de resistência do solo à penetração confirmaram aqueles encontrados para a densidade, mostrando que os tratamentos TS.C2 , CL.C1 e CL.C2 evidenciaram os maiores efeitos; por isso, pode-se concluir que o Track Skidder carregado duas vezes e o Clambunk carregado uma e duas vezes, nas condições em que se realizou o estudo, prejudicam o desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto.

– O perfil penetrométrico do solo mostrou diferenças entre os valores de resistência proporcionados pelo peso da madeira arrastada e os sulcos formados pelos rodados dos equipamentos. O perfil mostrou que o rodado esquerdo apresentou maior efeito na compactação do solo.

– O peso da madeira arrastada pelo Track Skidder não interferiu na resistência do solo à penetração, ou seja, o arraste de madeira não compactou o solo.

6. RECOMENDAÇÕES

Nas condições de umidade em que foi conduzido o trabalho, recomenda-se que o Clambunk não trafegue com sua capacidade de carga total.

O Track Skidder, por trafegar aleatoriamente dentro do talhão e com uma carga menor que a do Clambunk, deve ser utilizado em condições específicas, em locais de difícil acesso, conforme adotado pela empresa.

Sugere-se a continuidade deste trabalho para avaliar a interferência do tráfego dos equipamentos no grau de compactação em diferentes tipos de solo e umidade, a fim de obter uma correlação destas variáveis, criando uma base de dados capaz de contribuir para a definição do momento ideal de trabalho, sem que haja interferência nas propriedades físicas do solo, ou seja, produzir sem compactar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – análise granulométrica**: NBR 7181. Rio de Janeiro, 1982. 16p.
- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo, SP: Manole, 1987. 307 p.
- BLACKWELL, P. S.; SOANE, B. D. A method of predicting buck density changes in field soils resulting from compaction by agricultural traffic. **J. Soil Sci.**, p.51 – 65, 1981.
- CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. 44p.
- DIAS JÚNIOR, M.** Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um latossolo vermelho - amarelo situado em áreas experimentais da Cenibra. **Relatório do projeto de pesquisa. 23p. Lavras: 1999.**
- DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. Revisão de Literatura. **O processo de compactação do solo e sua modelagem**. R. bras. Ci. Solo, Campinas, v. 20, p. 175 –182, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Ciência do Solo. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: 1979. Não-paginado.
- FERNANDES, H.C.; ORLANDO, R.C.; LANÇAS, K.P. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do “Forwarder” e do “Harvester”. **Engenharia na Agricultura**, v.5, n.4, p.276-280, 1997.

- FERNANDES, H.C. **Máquinas de exploração: compactação das trilhas e dias potencialmente Útil para o trabalho.** Botucatu, SP: UNESP, 1996. 145p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual Paulista, 1996.
- GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils, a review. *Aut. J. Soil. Res.*, v 17, p 163-89,1980.
- GRABLE, A.R. *Effects of compaction on content and of air in soil.* In: ASAE: **Compaction of Agricultural Soil.** St. Joseph, 1971. p. 154-164.
- HARAN, A. E.; SIROIS, D. L. Transation and roling resistance of a dual-tired Skidder on wetland. **TRANSACTION of the ASE:** 28(5) 1038 – 1042,1985.
- HILLEL, D., **Fundamentals of soil phisics.** New York: Academic Press, p. 401-413, 1980.
- KONDO, M.K., DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.211-218, 1999.
- KOGER, J. L.; BURT, E. C.; TROUSE, A. C.; BAILEY, A. C. Skidder tire size vs. Soil compaction in soil bins. **TRANSACTIONS of the ASAE.** v.28, n.3 p. 665-669. 1984.
- LIMA, J.S.S.; SOUZA, A.P.; MACHADO, C.C.; OLIVEIRA, P.C.; MARTINS FILHO, S. Estudo do comportamento da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego na colheita de madeira. In: Simpósio Brasileiro de sobre colheita e transporte de madeira florestal, 5, 2001, Porto Seguro. **Anais...** Viçosa: SIF, 2001. p. 281-289.
- LIMA, J.S.S. **Avaliação da força de arraste, compactação do solo e fatores ergonômicos num sistema de colheita de madeira utilizando os tratores “feller-Buncher” e “Skidder”.** Viçosa, MG: UFV, 1998.128 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- MACHADO, C.C.; S.A., IGNACIO; A.B., VALE & H.S., SOUZA JR. **Efeito da extração de madeira com guincho arrastador na brotação do *Eucalyptus alba*.** SIF, Revista árvore, v.14, n.1, p. 55-60, 1990.
- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Inf. Agrope.,** v.13, n.17, p.52-5,1987.
- MATOS, A.T. **Manejo e conservação do solo.** Campos, Rio de Janeiro. Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF. 41 p. 1997.

- MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU, USP, 1980. v.2. p.149-195.
- MIRANDA, N. O. **Alterações físicas nos solos podzólicos vermelho-escuro submetidos a diferentes condições de preparo reduzido**. Santa Maria: UFSM, 1986. 64 p.
- MINETTE, L.J. **Avaliação técnica e econômica dos tratores florestais transportadores (Forwarders) na extração de madeira de eucalipto**. Viçosa, 1988. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.
- MORAES, M.H.; TAMBURUS, C.E. **Influência da compactação na densidade, porosidade, retenção de água e condutividade hidráulica de dois solos argilosos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus – Bahia. **Anais...**Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1993, p. 2235-2239.
- NOVAK, L.R. **Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de Latossolo Vermelho-Escuro Álico em dois níveis de umidade**. Viçosa, 1989. 58p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; BEAULINEU, B. **Prediction of clay soil compaction**. **J. Terramechanics**, v.14, n.1, p.31-8,1977.
- SEIXAS, F. Olho na Terra. **Revista Cultivar Máquinas**, ano II, n.7, p.15-17, 2002.
- SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. Piracicaba, 2000, 75p. Tese (Livre - docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São de Paulo.
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.; SOUZA, C. R. **Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte de madeira**. *Scientia florestalis*, n.54, p. 7-16, 1998.
- SEIXAS, F. **Compactação do solo devido a mecanização florestal**; *Cir. Tec. IPEF*, n163, p,1-10.1988.
- SHACKLETON, S. Plantações de eucalipto. **Timberjack News**, v.2, p.23, 2001.
- VALVERDE, S.R. **A contribuição do setor florestal para o desenvolvimento sócio – econômico:uma aplicação de modelos de equilíbrio multissetoriais**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade federal de Viçosa, 2000.

SILVERSIDES, C, R. e SUNDBERG, U. **Operation Efficiency in Forestry**. v. 2. Practive, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989, 169 p.

VIEIRA, L.B. **Curso de mecanização agrícola**. Engenheiros Mecânicos da Pirrell pneus S.A. Viçosa, Minas Gerais, Departamento de Engenharia Agrícola -UFV. 1998. 143p.

VIEIRA, L.B. **Análisis de los factores que influyen en el comportamiento de un motocultor con apero rotativo en el laboreo del suelo**. Madri: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 1992.221 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Escuela Técnica Superior de de Ingenieros agrónomos, 1992

VIEIRA, L.G.E. Desenvolvimento e produtividade das culturas: cultura do trigo. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no estado do Paraná**. Londrina: 1981. p.194-198. (Circular, 23).

APÊNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Track Skidder uma e duas vezes carregado na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	0,065	0,6469	0,126	*
POSI(P)	3	173,34	57,778	11,59	*
C*P	3	6,59	2,196	0,440	NS
BLOCO	3	10,45			
RESÍDUO	21	104,69	4,980		
TOTAL	31	295,708			

Quadro 2A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Clambunk uma e duas vezes carregado na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	0,51	0,51285	0,0894	NS
POSI(P)	3	205,58	57,778	11,96	**
C*P	3	0,88	2,196	0,0512	NS
BLOCO	3	69,31			
RESÍDUO	21	120,28	5,7274		
TOTAL	31	396,562			

Quadro 3A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Track Skidder uma e duas vezes carregado na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	20,90	20,8981	3,2888	NS
POSI(P)	3	77,28	25,7596	4,0536	NS
C*P	3	1,49	0,4980	0,0783	NS
BLOCO	3	41,03			
RESÍDUO	21	133,45	6,3547		
TOTAL	31	274,151			

Quadro 4A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Clambunk uma e duas vezes carregado na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	23,14	23,137	4,8998	*
POSI(P)	3	95,28	31,7586	6,7257	*
C*P	3	6,55	2,1844	0,4626	NS
BLOCO	3	42,28			
RESÍDUO	21	99,16	4,7219		
TOTAL	31	266,4084			

Quadro 5A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Track Skidder uma e duas vezes carregado na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	9,88	9,87901	2,6772	NS
POSI(P)	3	42,17	14,0555	3,8090	*
C*P	3	7,40	2,46807	0,6688	NS
BLOCO	3	35,77			
RESÍDUO	21	77,49	3,69001		
TOTAL	31	172,7084			

Quadro 6A – Análise de variância para os valores do perfil penetrométrico do solo para o tráfego do Clambunk uma e duas vezes carregado na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
COND(C)	1	5,20	5,20031	0,9911	NS
POSI(P)	3	115,73	38,5752	6,7257	**
C*P	3	12,60	4,1996	0,80043	NS
BLOCO	3	19,14			
RESÍDUO	21	110,18	5,24673		
TOTAL	31	262,851			

Quadro 7A – Análise de variância para os valores de densidade do solo na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0345042	0,0345042	8,06	*
COND (C)	2	0,0434084	0,0217042	5,07	*
M*C	2	0,0023083	0,0011541	0,27	NS
TRAT VS TEST	1	0,1015291	0,1015291	23,71	**
BLOCO	3	0,0220714	0,0073571	1,72	NS
RESÍDUO	18	0,0770786	0,0042821		
TOTAL	27	0,3394107			

Quadro 8A – Análise de variância para os valores de densidade do solo na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0054	0,0054	1,25	NS
COND (C)	2	0,0256334	0,0128167	2,96	NS
M*C	2	0,0061	0,00305	0,70	NS
TRAT VS TEST	1	0,0224023	0,0224023	5,18	*
BLOCO	3	0,0370678	0,0123559	2,86	NS
RESÍDUO	18	0,0778071	0,0043226		
TOTAL	27	0,1744106			

Quadro 9A – Análise de variância para os valores de densidade do solo na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0170667	0,0170667	4,35	NS
COND (C)	2	0,0271	0,01355	3,45	NS
M*C	2	0,0050333	0,0025166	0,64	NS
TRAT VS TEST	1	0,0325928	0,0325928	8,31	**
BLOCO	3	0,0202679	0,006756	1,72	NS
RESÍDUO	18	0,0706072	0,0039226		
TOTAL	27	0,1726679			

Quadro 10A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de densidade das partículas na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0063375	0,0003375	0,45	NS
COND (C)	2	0,0000583	0,0000291	0,02	NS
M*C	2	0,0019750	0,0009875	0,69	NS
TRAT VS TEST	1	0,0004006	0,0004006	0,28	NS
BLOCO	3	0,0004964	0,0001655	0,12	NS
RESÍDUO	18	0,0256286	0,0014238		
TOTAL	27	0,0348964			

Quadro 11A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de densidade das partículas na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0009375	0,0009375	1,58	NS
COND (C)	2	0,0164583	0,0082291	13,91	**
M*C	2	0,000625	0,0003125	0,53	NS
TRAT VS TEST	1	0,0000149	0,000149	0,25	NS
BLOCO	3	0,001325	0,0004417	0,75	NS
RESÍDUO	18	0,01065	0,0005917		
TOTAL	27	0,0300107			

Quadro 12A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de densidade das partículas na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	0,0002667	0,0002667	0,54	NS
COND (C)	2	0,0036583	0,0018292	3,72	NS
M*C	2	0,0063583	0,0031792	4,46	NS
TRAT VS TEST	1	0,0001167	0,0001167	0,24	NS
BLOCO	3	0,0010679	0,000356	0,72	NS
RESÍDUO	18	0,0088571	0,000492		
TOTAL	27	0,020325			

Quadro 13A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de porosidade do solo na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	31,71699	31,71699	6,28	*
COND (C)	2	64,7046	32,3523	6,41	*
M*C	2	1,355433	0,6777165	0,13	NS
TRAT VS TEST	1	153,08648	153,08648	30,31	**
BLOCO	3	34,59708	11,53236	2,28	NS
RESÍDUO	18	90,89963	5,0499794		
TOTAL	27	376,36021			

Quadro 14A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de porosidade do solo na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	4,995938	4,995938	0,90	NS
COND (C)	2	16,39923	8,199615	1,48	NS
M*C	2	11,76759	5,883795	1,06	NS
TRAT VS TEST	1	34,571232	34,571232	6,26	*
BLOCO	3	51,71819	17,239397	3,12	NS
RESÍDUO	18	99,46804	5,5260022		
TOTAL	27	218,92022			

Quadro 15A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de porosidade do solo na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	23,18699	23,18699	3,72	NS
COND (C)	2	33,12682	16,56341	2,66	NS
M*C	2	3,430404	1,715202	0,27	NS
TRAT VS TEST	1	46,168586	46,168586	7,41	*
BLOCO	3	31,55087	10,516957	1,69	NS
RESÍDUO	18	112,0886	6,227143		
TOTAL	27	249,55227			

Quadro 16A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de resistência do solo à penetração na profundidade de 0-15 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	5,597015	5,597015	0,92	NS
COND (C)	2	23,8513	11,92565	1,96	NS
M*C	2	8,48301	4,241505	0,70	NS
TRAT VS TEST	1	69,570075	69,570075	0,11	NS
BLOCO	3	31,8242	10,608067	1,74	NS
RESÍDUO	18	109,3661	6,0758944		
TOTAL	27	248,6917			

Quadro 17A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de resistência do solo à penetração na profundidade de 15-30 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	19,20671	19,20671	3,65	NS
COND (C)	2	36,80254	18,40127	3,50	NS
M*C	2	0,7104087	0,3552043	0,07	NS
TRAT VS TEST	1	35,062881	35,062881	6,67	**
BLOCO	3	20,44535	6,8151167	1,30	NS
RESÍDUO	18	94,62157	5,2567539		
TOTAL	27	206,84946			

Quadro 18A – Análise de variância para a interação máquina e condição de tráfego para os valores de resistência do solo à penetração na profundidade de 30-50 cm

FONTES DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADO	QUADRADO MÉDIO	F	SIG.
MAQ (M)	1	2,394016	2,394016	0,93	NS
COND (C)	2	23,62923	11,814615	4,57	*
M*C	2	0,737433	0,3687165	0,14	NS
TRAT VS TEST	1	17,408611	17,408611	6,73	*
BLOCO	3	9,509866	3,1699553	1,23	NS
RESÍDUO	18	46,53291	2,5851617		
TOTAL	27	100,21207			