

Avaliação da resistência do solo à penetração em razão de cargas aplicadas pelos rodados de duas máquinas florestais e pelo arraste de madeira

Haroldo Carlos Fernandes¹
Sebastião Eudes Lopes¹
Alcir José Modolo¹
João Cleber Modernel da Silveira¹
Paula Cristina Natalino Rinaldi¹

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência do solo à penetração devido às cargas aplicadas pelos rodados de duas máquinas florestais em relação ao arraste de madeira, em áreas com plantio de eucalipto. O estudo foi realizado em três níveis de profundidade, 0-15, 15-30 e 30-50 cm, com as máquinas trafegando uma e duas vezes carregadas. Utilizou-se o delineamento estatístico em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 3+1, sendo duas máquinas e três condições de tráfego e um tratamento adicional como controle. Os valores encontrados na profundidade de 0-15 cm evidenciaram a diferença entre os valores de resistência do solo à penetração dos rodados das máquinas em relação ao local de arraste de madeira. Não houve interação significativa entre os pontos de arraste e rodados com a condição de tráfego, uma e duas vezes carregados para essa profundidade.

Palavras chave: Colheita florestal, compactação do solo, arraste de madeira.

ABSTRACT

Evaluation of soil penetration resistance as a function of wheel load of two forest machines and log dragging

The objective of this work was to evaluate soil penetration resistance due to the wheel loads of two forest machines in relation to log dragging in areas of eucalyptus plantation. The study was carried out at 3 depths, 0-15 cm, 15-30 cm and 30-50 cm, with traffic of loaded machines passing once and twice on the soil. The experiments were arranged in a randomized block design, in 2x3+1 factorial scheme; two machines and three traffic conditions, and a control treatment. Results found at the depth 0-15 cm confirmed the difference between the soil penetration resistance of machine wheels in relation to the place of log dragging. There was no significant interaction between the points of dragging and wheels with the traffic condition, one and two passes of loaded machines, for this depth.

Key words: Forest harvest, Soil compaction, Log dragging

¹ Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Av. P. H. Rolfs, s/n. Viçosa, MG. CEP 36570-000. Fone: (0xx31) 3899-1883. E-mail: haroldo@ufv.br.

INTRODUÇÃO

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 desse assunto no setor florestal. Os danos causados pela compactação em solos florestais diferem daqueles dos solos agrícolas, devido à espécie, tamanho, aos ciclos das culturas cultivadas e às máquinas utilizadas (Greacen & Sands, 1980).

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

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.

Lima *et al.* (2001) avaliaram o comportamento da resistência do solo à penetração em trilhas entre linhas de plantio de eucalipto, em razão 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.

O contato rodado/solo é extremamente complexo e depende de 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 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 ele ocorre de um pneu sobre o outro. A compactação sob rodados duplos será menor em profundidade, porém maior em extensão superficial, já que a área afetada será maior (Vieira, 1998).

Analisando a compactação de solos florestais, Silversides & 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, eles afirmam que a pressão sobre o solo não sofre alteração, pois o aumento na área de contato é proporcional ao acréscimo da carga. De acordo com esses autores, 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. Os autores constataram ainda 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 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.

Estudos de compactação do solo realizados por Greacen & 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 oriundas do peso da madeira, foram desprezadas. Esses mesmos autores 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 acontecer novamente após a nona. Os autores observaram que o número de passadas não influenciou significativamente os valores de resistência do solo à penetração.

Mediante o ocorrido, este trabalho objetivou avaliar os efeitos dos rodados de duas máquinas florestais (Clambunk e Track Skidder) e do arraste de madeira na resistência do solo à penetração em diferentes profundidades em áreas com plantio de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

O 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. O solo da região foi classificado pela Embrapa (1999) como sendo um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa.

As áreas de coleta 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, classificação Aw e precipitação média de 1.200 mm ano⁻¹.

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⁻¹, tendo como finalidade matéria-prima para produção de polpa de celulose.

O experimento foi conduzido utilizando-se um trator Arrastador (Clambunk) com esteiras nos rodados pneumáticos, modelo 1710, potência de 210 hp (156,7 kW), massa de 20,8 t, equipado com lâmina frontal (Buldozer), conforme mostra a (Figura 1a), e um trator Arrastador com esteiras de metal (Track-Skidder), modelo 527, potência de 150 hp (112 kW), massa de 21,5 t, equipado com lâmina frontal (Buldozer), arco acumulador da marca ESCO, com área útil de 0,93 m², montado em braço articulado (Swing Boom), conforme Figura 1b.

O experimento foi conduzido dentro de um talhão com área de 70,75 ha. Para seleção e demarcação das trilhas de tráfego, sortearam-se antecipadamente os locais, relacionando o número de passadas (testemunha,

vazia, carregada uma vez e carregada duas vezes) com o tipo de máquina. O Track Skidder foi denominado máquina 1 (M1) e o Clambunk, máquina 2 (M2). Os tratamentos foram definidos conforme a seguir: T1 = M1 vazia; T2 = M1 carregada uma vez; T3 = M1 carregada duas vezes; T4 = M2 vazia; T5 = M2 carregada uma vez; T6 = M2 carregada duas vezes; e T7 = Testemunha - linha sem tráfego.

Utilizou-se o delineamento estatístico em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 3 + 1, sendo duas máquinas e três condições de tráfego (número de passadas) e um tratamento adicional como controle. O estudo foi realizado em três níveis de profundidade, 0-15 cm, 15-30 cm e 30-50 cm. Empregou-se o programa estatístico SAEG, versão 8.0, sendo os dados submetidos às análises de variância e 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.

Os blocos foram instalados aleatoriamente dentro do talhão com dimensões de 50 m de comprimento por 50 m de largura, 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.

A Tabela 1 relaciona as características das trilhas de tráfego e os tratamentos estudados. A análise granulométrica foi realizada conforme Embrapa (1997). Os valores estão apresentados na Tabela 2.

A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico padrão, conforme Embrapa (1997).

A área de contato da esteira com o solo foi demarcada em função da largura da esteira e pela distância entre os eixos da roda-guia e da roda motriz (Mialhe, 1980). Foram consideradas duas esteiras para o Track Skidder e quatro para o Clambunk.

A resistência do solo à penetração foi determinada por meio de um penetrógrafo da marca SOIL CONTROL, mode-



Figura 1. (a) Arraste da madeira realizado pelo Clambunk e (b) pelo Track Skidder

Tabela 1. Características das trilhas em função das condições de tráfego

Bloco	Declividade (graus)	Área (ha)	Condição1	Condição2	Condição3
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

Tabela 2. Análise granulométrica do solo em função dos blocos estudados

Bloco	Profundidade da amostra (cm)	Composição granulométrica (%)			
		Areia	Silte	Argila	Classificação textural
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

lo 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 estabelecidos 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).

Para a determinação da diferença entre as cargas aplicadas pelos rodados direito, esquerdo e pontos de arraste da madeira, consideraram-se os sulcos formados pelos rodados das máquinas e o arraste da madeira, conforme é mostrado na Figura 2. O estudo foi realizado em três intervalos de profundidade (0-15, 15-30 e 30-50 cm). Os pontos de amostragens foram os rodados direito, esquerdo e dois pontos no local de arraste da madeira, sendo esses coletados em quatro pontos espaçados ao longo dos sulcos e transversais ao sentido do arraste da madeira, distantes 0,7 m entre si.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pressão de contato dos rodados

Os valores médios de pressão de contato do Clambunk e Track Skidder estão apresentados na Tabela 3.



Figura 2. Pontos de amostragem nos sulcos formados pelos rodados das máquinas e do arraste da madeira.

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

Característica dos equipamentos	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 o 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 pressão de contato menor, devido ao número e às dimensões de seus pneus.

Umidade do solo

A umidade média do solo para as profundidades 0-15, 15-30 e 30-50 cm foi de 33,0, 30,25 e 29,75%, respectivamente. Os valores médios não apresentaram diferenças significativas nas diferentes profundidades.

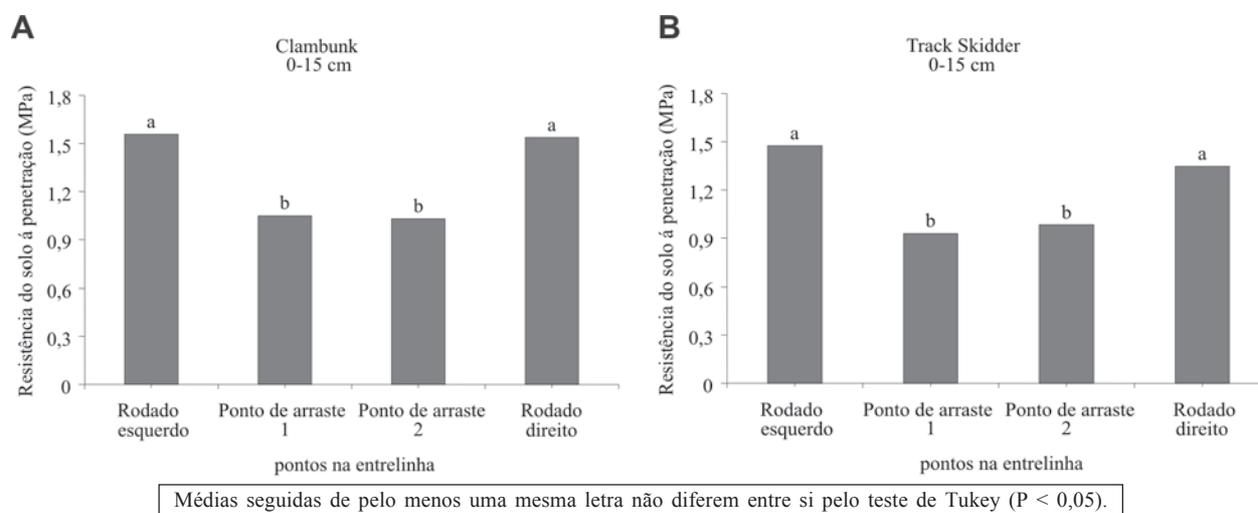
Resistência do solo à penetração devido às cargas aplicadas pelo arraste de madeira e dos rodados das máquinas

Os maiores efeitos da resistência do solo à penetração foram observados na profundidade de 0-15 cm, ficando evidente a diferença entre os valores de resistência do solo à penetração nos rodados das máquinas em relação ao local de arraste de madeira, (Figuras 3a e 3b). O número de passadas das máquinas não interferiu significativamente nos valores de resistência dos pontos de arraste e dos rodados. Os valores encontrados para esta profundidade estão de acordo com os encontrados por Fernandes *et al.* (1997), os quais consideraram que a primeira passada é responsável pelo maior efeito na compactação do solo, voltando esta a ocorrer após a nona passada. Os autores também observaram que o número de passadas não influenciou significativamente os valores de resistência do solo à penetração.

A Figura 4 mostra o comportamento do Clambunk na profundidade de 15-30 cm. Nesse perfil o número de passadas apresentou efeitos significativos, sendo duas vezes carregado o maior efeito. A resistência no rodado esquerdo teve valor diferente do valor observado no rodado direito, que mostrou semelhança com o ponto de arraste 2, fato este, ocorrido pela irregularidade do terreno.

O arraste da madeira e os rodados do Track Skidder não provocaram efeito significativo nos valores de resistência do solo à penetração para a profundidade 15-30 cm, demonstrando menor dano ao solo em relação ao Clambunk.

Como o volume de madeira arrastado pelo Clambunk foi superior ao arrastado pelo Track Skidder, esperava-se interferência desse volume nos valores de resistência do solo à penetração para todos os perfis do solo estudado;

**Figura 3.** Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelo rodado e pelo local de arraste das árvores, na profundidade de 0-15 cm, A) Clambunk e B) Track Skidder.

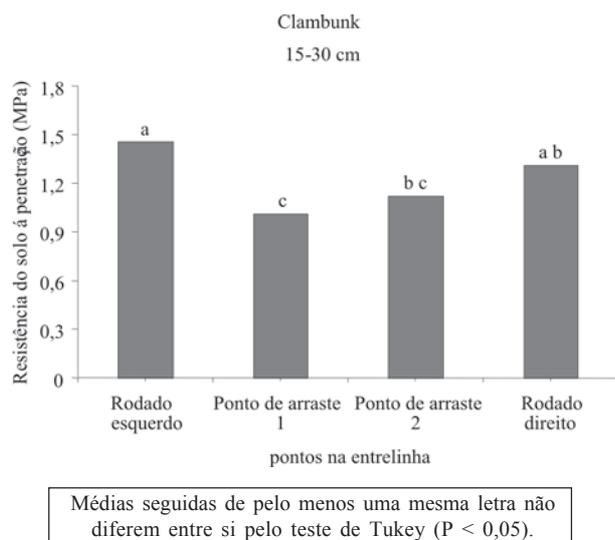


Figura 4. Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelo rodado e pelo local de arraste das árvores causadas pelo Clambunk, na profundidade de 15-30 cm.

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 que os pontos de arraste e o rodado direito, que não evidenciou diferenças em relação ao ponto de arraste 2 na resistência do solo à penetração. O comportamento na profundidade de 30-50 cm para o Clambunk foi semelhante ao observado no perfil de 15-30 cm. Houve comportamento semelhante para os rodados e os pontos de arraste, destacando-se a diferença do rodado esquerdo com os pontos de arraste. A resistência do solo à penetração no rodado direito não apresentou diferença em relação à do

esquerdo e ao ponto de arraste 2, conforme ilustrado pelas Figuras 5a e 5b.

Os resultados encontrados neste trabalho são semelhantes aos encontrados por Lima *et al.* (2001), que observaram variação da resistência do solo à penetração após o tráfego de equipamentos, tendo ocorrido variação mais acentuada na profundidade de 0-15 cm.

Resistência do solo à penetração

Os valores de resistência do solo à penetração para a faixa de 0-15 cm não foram significativamente diferentes entre a máquina e a condição em que estas trafegavam. Ao comparar tais valores com os da testemunha, os tratamentos T3, T5 e T6 tiveram diferenças significativas.

Na faixa de 15-30 cm de profundidade não houve interação significativa para os fatores máquinas e condição de tráfego. Quando comparado com a linha sem tráfego, apenas o T6 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 carregados, a de maior efeito, conforme mostra a Tabela 4. Quando comparado com a testemunha, o T6 novamente foi o que mostrou diferença significativa, isto é, o Clambunk trafegando duas vezes carregado na mesma trilha afetou a resistência do solo à penetração.

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 6.

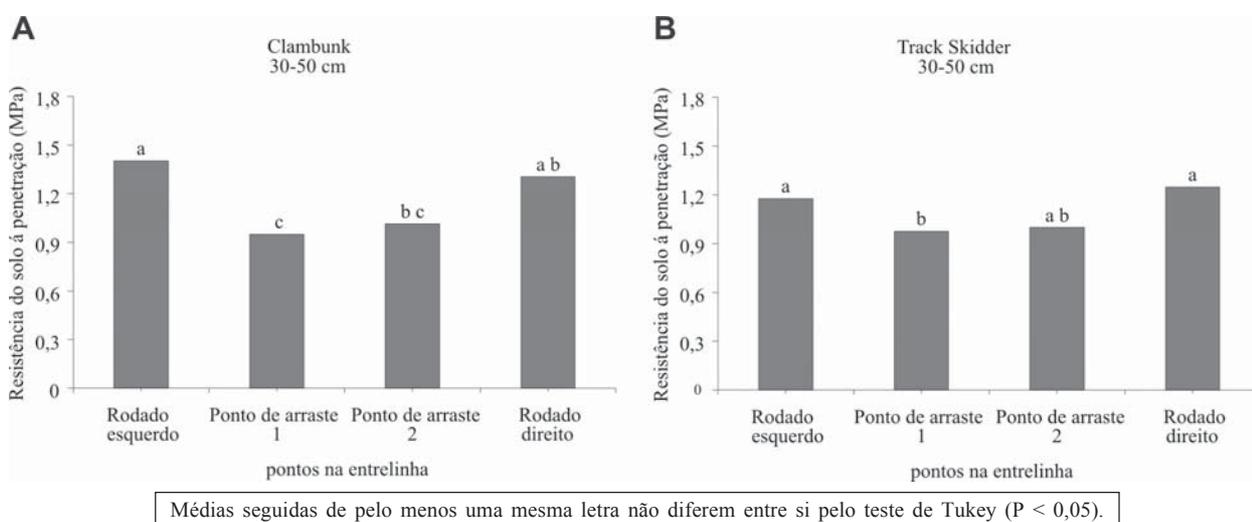
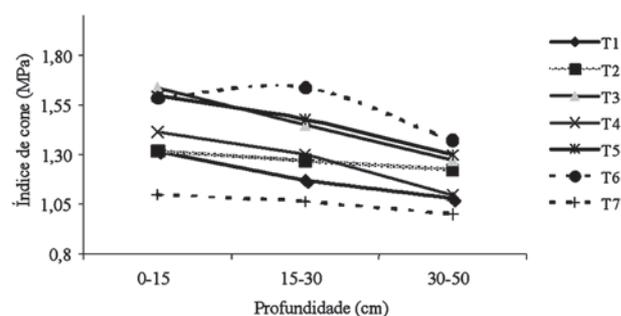


Figura 5. Valores de resistência do solo à penetração entre os sulcos formados pelo rodado e pelo local de arraste das árvores, na profundidade de 30-50 cm, a) Clambunk e b) Track Skidder.

Tabela 4. 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
Duas vezes carregada	1,3245 A
Uma vez carregada	1,2635 AB
Vazia	1,0902 B

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

**Figura 6.** Valores médios de índice de cone para tratamentos e testemunha

CONCLUSÕES

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 peso da madeira arrastada pelo Track Skidder não interferiu na resistência do solo à penetração.

REFERÊNCIAS

- Camargo AO (1983) Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas: Fundação Cargil. 44 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro. 421 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1997) Centro Nacional de Ciência do solo. Manual de métodos de análise de solos. 2nd ed. Rio de Janeiro. 212p.
- Fernandes HC (1996) Máquinas de exploração: compactação das trilhas e dias potencialmente útil para o trabalho. Tese de doutorado. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 145 p.
- Fernandes HC, Orlando RC & Lanças KP (1997) Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do “Forwarder” e do “Harvester”. Engenharia na Agricultura, 5:276-280.
- Greacen EL & Sands R (1980) Compaction of forest soils, a review. Australian Journal of Soil Research, 17:163-89.
- Koger JL, Burt EC, Trowse AC & Bailey AC (1984) Skidder tire size vs soil compaction in soil bins. Transactions of the Asae, 28:665-669.
- Lima JSS, Souza AP, Machado CC, Oliveira PC & Martins Filho S (2001) Estudo do comportamento da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego na colheita de madeira. In: 5^o Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte de Madeira Florestal, Porto Seguro. Anais, VIÇOSA/SIF. p. 281-289.

Mialhe LG (1980) Máquinas motoras na agricultura, São Paulo: EPU, 195p.

Miranda NO (1986) Alterações físicas nos solos podzólico vermelho amarelo e latossolo vermelho escuro submetidos a diferentes condições de preparo reduzido. Tese de mestrado. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria. 64 p.

Seixas F (2000) Compactação do solo devido à colheita de madeira. Tese livre docência. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 75 p.

Seixas F (1988) Compactação do solo devido a mecanização florestal. Circular Técnica. IPEF, 163, p. 1-10.

Silversides CR & Sundberg U (1989) Operation efficiency in forestry. v. 2. Practive, Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 169 p.

Vieira LB (1998) Curso de mecanização agrícola. Engenheiros Mecânicos da Pirrelli Pneus S.A. Viçosa, Minas Gerais. 143p.

Vieira LB (1992) Análisis de los factores que influyen en el comportamiento de un motocultor con apero rotativo en el laboreo del suelo. Tese de doutorado. Madri: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 221 p.