

**MODELAGEM E QUANTIFICAÇÃO DA
COMPACTAÇÃO DE LATOSSOLOS
CULTIVADOS COM EUCALIPTO**

ARYSTIDES RESENDE SILVA

2006

ARYSTIDES RESENDE SILVA

**MODELAGEM E QUANTIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE
LATOSSOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Silva, Arystides Resende

Modelagem e quantificação da compactação de latossolos cultivados
com eucalipto / Arystides Resende Silva. -- Lavras : UFLA, 2006.

85 p. : il.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Compactação do solo. 2. Mecanização florestal. 3. Resíduo florestal. 4.
Pressão de preconsolidação. 5. Compressibilidade. 6. Eucalipto. 7. Latossolo. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.43

ARYSTIDES RESENDE SILVA

**MODELAGEM E QUANTIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE
LATOSSOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 14 de março de 2006

Professor Dr. Álvaro Pires da Silva	ESALQ-USP
Pesquisador Dr. Fernando Palha Leite	CENIBRA
Professor Dr. Geraldo César de Oliveira	UFG
Professor Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

“É nas experiências da vida que o homem evolui”

*Aos meus pais, Francisco (in memoriam) e Maria Espírito Santo,
pelo carinho, amor , compreensão, educação e exemplo de vida
e por estarem sempre presentes em minha vida,
e a meus irmãos e a toda minha família,*

OFEREÇO

*À minha esposa, Helismara pelo carinho, amor ,
compreensão, apoio e companheirismo durante
todo o curso e por estar sempre presente
nos momentos de alegria
e de dificuldades,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e oportunidades.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior pelos ensinamentos, orientação, inestimável apoio e amizade ao longo do Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A Celulose Nipo-Brasileira S.A (CENIBRA), pelo apoio para a realização deste projeto, não medindo esforços para a realização deste trabalho.

Ao Pesquisador Dr. Fernando Palha Leite, pelo auxílio na execução deste trabalho e pela participação na banca examinadora, críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Dr. Mozart Martins Ferreira pelos ensinamentos e amizade e pela participação da banca examinadora, críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Dr. Geraldo César de Oliveira pelos ensinamentos, amizade e apoio, por participar da banca examinadora e pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Álvaro Pires da Silva pela disponibilidade, participação da banca examinadora, críticas e sugestões.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

A todos os funcionários do Departamento de Ciência do Solo que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, especialmente a Dulce Claret Monteiro Moraes, Delanne Ribeiro e Joyce Aparecida Rezende pelo companheirismo e ajuda.

A toda a equipe técnica da CENIBRA, especialmente ao Sr. Gilson Gaudereto, pelo desprendimento e compromisso durante a condução do experimento.

A Iracema Lara Castanheira, pelas caronas diárias de Bom Sucesso à Lavras.

A todos os colegas da Pós-Graduação, principalmente a Cezar, Ivoney, Gislene, Bruno Pires, Bruno Ribeiro, Adriana Lima, Alexandre Barberi, Rafaela, José Geraldo, Daniela Zuliane, Alexandre Romeiro, Adriana Monteiro, Alessandra, Geila, Fabrício, Giovana, Amaury, Evaldo e Enio pela indispensável ajuda e apoio.

A todos colegas da graduação, principalmente Carloeme, Miriam, Ciro Augusto, Luís e Thiago.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

E, por último, mas não menos importantes, aos meus pais Francisco (in memoriam) e Maria Espírito Santo, aos meus irmãos e familiares, à tia Resani, pelo amor, carinho, compreensão e força nos momentos difíceis, aos meus sogros Osmar e Helaine, e especialmente à minha esposa Helismara, pelo companheirismo e por estar sempre presente nos momentos de alegria e de dificuldades.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1.....	01
1 INTRODUÇÃO.....	02
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	04
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	09
CAPÍTULO 2: Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo.....	14
Resumo.....	15
Abstract.....	16
1 Introdução.....	17
2 Material e métodos.....	19
3 Resultados e discussão.....	23
4 Conclusões.....	29
5 Referências bibliográficas.....	30
CAPÍTULO 3: Avaliação do efeito da camada de resíduos florestais na pressão de preconsolidação de dois Latossolos.....	33
Resumo.....	34
Abstract.....	35
1 Introdução.....	36
2 Material e métodos.....	38
3 Resultados e discussão.....	41
4 Conclusões.....	48

5 Referências bibliográficas.....	49
CAPÍTULO 4: Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do solo em diferentes sistemas de colheita florestal.....	53
Resumo.....	54
Abstract.....	56
1 Introdução.....	57
2 Material e métodos.....	59
2.1 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder, na Região de Santa Maria de Itabira, MG.....	59
2.2 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho, devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições de camadas de resíduos nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG.....	60
3 Resultados e discussão.....	64
3.1 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG.....	64
3.1.1 Efeito da intensidade de tráfego do Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG.....	64
3.1.2 Efeito da carga de tráfego do Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG.....	66
3.2 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho, devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições	

de disposição de resíduos nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista em MG.....	68
3.2.1 Resistência à penetração.....	75
4 Conclusões.....	80
5 Referências bibliográficas.....	81

RESUMO GERAL

SILVA, Arystides Resende. **Modelagem e quantificação da compactação de Latossolos cultivados com eucalipto**. 2006. 85 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. *

As operações de colheita e baldeio da madeira envolvem tráfego intensivo de máquinas sobre o solo, as quais trafegam numa mesma linha várias vezes ou aleatoriamente. Além do número de passadas, a carga de madeira transportada também pode afetar a compactação do solo, quando as pressões aplicadas pelas máquinas excederem a sua capacidade de suporte de carga, alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve e reduzindo a produtividade. Procurando alternativas para minimizar o impacto do tráfego sobre a estrutura dos solos, estudou-se o uso de resíduos florestais para minimizar o impacto deste tráfego sobre a estrutura do solo. Os objetivos deste estudo foram: a) desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho-Amarelo situado na Região de Santa Maria de Itabira, MG e determinar, com o uso destes modelos, o efeito da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a estrutura do solo; b) avaliar o efeito da camada de resíduos em diferentes intensidades de tráfego sobre a pressão de preconsoidação de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho nas regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, respectivamente e c) avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos solos nas três Regiões deste estudo. Amostras indeformadas foram coletadas para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga e para a avaliação dos efeitos das diferentes intensidades de tráfego e cargas do Forwarder sobre a estrutura dos solos e também para avaliar o efeito das diferentes condições de resíduos sobre a pressão de preconsoidação. As amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial. Determinou-se também textura, matéria orgânica, densidade de partículas dos solos, densidade do solo, volume total de poros, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a resistência à penetração. Para a Região de Santa Maria de Itabira, todas as intensidades de tráfego causaram compactação do solo nas duas profundidades estudadas, sendo quatro passadas a que causou maior compactação do solo e à medida que a carga do Forwarder aumentou, a compactação também aumentou. O tráfego sobre os resíduos florestais atenuou a compactação nos solos estudados principalmente na condição de Galhada+Casca (GC). A pior situação foi a condição de Solo Sem Resíduos (SR), tanto na região de Belo Oriente quanto na de São João

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

Evangelista. À medida que aumentou a intensidade de tráfego de duas para oito vezes, ocorreu maior compactação do solo nas condições estudadas. A resistência à penetração determinada com o penetrômetro de impacto não foi sensível para separar o tipo de resíduo florestal.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Arystides Resende. **Pattern and quantification from compaction in the Latosols cultivated with eucalypt.** 2006. 85 p. Thesis (Doctorate in Soil and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras. Lavras, Minas Gerais. Brazil.*

The harvest operations and wood transport involves intensive traffic of machines on the soil, which may traffic in a same line several times, or randomly. Besides the passes number, the wood load transported also may affect the soil compaction, when the applied pressures for the machines exceed its bearing support capacity, altering the place where the root system grow and reducing the productivity. Seeking alternatives ways to minimize the traffic impact on the soil structure, it was surmised the possibility of forest residues use to minimize the traffic impact on the soil structure. The objectives of this study were: a) to develop the bearing capacity models for a Red-Yellow Latosol located in the Santa Maria de Itabira region - MG and to determine with the use of these models the effect of the traffic intensity and load of a Forwarder on the soil structure; b) to evaluate the effect of the residues layer in different traffic intensities on the preconsolidation pressure of a Yellow Latosol and of a Red Latosol in the Belo Oriente and São João Evangelista regions, respectively and c) to evaluate the soil physical and mechanical properties in the three studied regions. Undisturbed soil samples were collected to obtaining the bearing capacity models and to evaluate the traffic intensities and loads of a Forwarder on the soil structure and also to evaluate the effect of different residue conditions on the preconsolidation pressure. The undisturbed soil samples were used in the uniaxial compression test. It was also determined the texture, organic matter, soil particles density, soil density, total porosity, field capacity, permanent wilting point and the penetration resistance (RP). For the Santa Maria de Itabira region all the traffic intensities caused soil compaction in the two studied depths being four passes the one that caused larger soil compaction and as the Forwarder load increased the soil compaction also increased. The traffic on the forest residues lessened the soil compaction in the studied soils mainly in the condition of brushwood and bark (GC), being the worst situation the condition the soil without residues (SR), so much in the Belo Oriente region as in the São João Evangelista region. As the traffic intensity increased from two to eight passes, a

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

larger compaction occurred in the studied conditions. The PR determined with the impact penetrometer, was not sensitive to separate the forest residue type.

CAPÍTULO 1

MODELAGEM E QUANTIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE LATOSSOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO

1 INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da demanda por produtos florestais, nas últimas décadas, tem sido acompanhado por uma modernização das operações de colheita florestal. Essa modernização está associada ao uso de novas tecnologias voltadas para utilização de máquinas que podem aplicar altas pressões sobre o solo (Horn, et al., 2004), principalmente durante a colheita e baldeio, causando modificações nas propriedades físicas dos solos, podendo resultar em sua compactação (Czyz, 2004; Dias Junior et al., 2005).

A compreensão e a quantificação dos impactos causados pela compactação do solo têm sido uma constante preocupação dos pesquisadores quando se considera a crescente mecanização associada ao aumento nas capacidades operacionais das máquinas, a intensidade de tráfego nas áreas (Raper, 2005; Hanza & Anderson, 2005) e, principalmente, quando essas operações são realizadas em condições inadequadas de umidades (Dias Junior et al., 2005; Raper, 2005).

Os impactos do tráfego nas propriedades físicas e mecânicas do solo têm sido quantificados a partir da utilização de modelos que estimam a capacidade de suporte de carga dos solos, quantificando os níveis de pressões que podem ser aplicados a estes para evitar que a compactação ocorra (Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005). Outros critérios de avaliação da compactação do solo têm usado, principalmente, a densidade do solo (Lopes, 2003; Beutler, 2004; Silva, 2005), a porosidade total do solo e a resistência à penetração (Imhoff et al., 2000; Lopes, 2003; Streeck et al., 2004; Silva, 2005).

A recuperação da estrutura dos solos compactados, se possível, é de alto custo e demanda muito tempo. A melhor estratégia é preservá-la. Assim,

medidas que visem minimizar o impacto das operações mecanizadas são necessárias. Nesse sentido a possibilidade do uso de resíduos florestais é uma alternativa para minimizar o impacto da colheita florestal sobre a estrutura dos solos (Keilen, 1992; Seixas et al., 1995; Seixas, 1998; Dias Junior et al., 2002), o que torna os estudos que contemplam o desenvolvimento de modelos de capacidade de suporte de carga sobre a estrutura dos solos importantes para adaptar de maneira condizente o manejo, visando uma colheita florestal sustentável ao longo dos anos.

Diante destas considerações, os objetivos deste estudo foram: a) desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho-Amarelo situado na Região de Santa Maria de Itabira, MG e determinar com uso destes modelos, o efeito da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a estrutura do solo; b) avaliar o efeito da camada de resíduos em diferentes intensidades de tráfego sobre a pressão de preconsolidação de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho nas regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG, respectivamente e c) avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos solos nas três Regiões estudadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As operações mecanizadas de colheita florestal se intensificaram no início da década de 1990. Desde então, o processo de colheita florestal tem causado incremento nos processos de degradação da estrutura do solo devido ao aumento da intensidade do tráfego de máquinas durante as operações de colheita e baldeio da madeira, principalmente quando realizadas em condições inadequadas de umidade (Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior et al., 1999; Chamen et al., 2003; Dias Junior et al., 2005).

A compactação do solo tem sido identificada como um dos principais problemas causadores da degradação da estrutura dos solos (Canillas & Salokhe, 2002, Dias Junior et al., 2003, Dias Junior et al., 2005), acarretando reduções da capacidade produtiva (Fenner, 2002) por causar aumento da densidade do solo e de sua resistência mecânica (Lebert & Horn, 1991; Hanza & Anderson, 2005; Botta et al., 2006), restringido assim, a penetração de raízes (Gysi, 2001), a absorção de nutrientes, a infiltração, a redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular (Arvidsson, 2001; Ishaq et al., 2001), além de aumentar a erosão devido ao maior escoamento superficial (Canillas & Salokhe, 2002), gerando perdas de solo e nutrientes.

Estudos recentes revelam que a compactação de solos florestais tem ocorrido em consequência das operações florestais mecanizadas que envolvem o tráfego intensivo de máquinas sobre o solo (Dias Junior & Pierce, 1996, Dias Junior, 2000; Czyz, 2004; Dias Junior et al., 2005), durante as operações de corte e baldeio da madeira (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2003) principalmente quando o solo encontra em condições inadequadas de umidade (Dias Junior et al., 2002; Arvidsson et al., 2003; Dias Junior et al., 2005; Raper,

2005), o que pode causar compactação e prejudicar as futuras produções desses solos (Czyz, 2004; Chan et al., 2005).

A manutenção das condições físicas do solo é dependente do processo de compressibilidade que é a facilidade com que um solo não saturado decresce de volume quando sujeito a pressões, o qual depende de fatores externos e internos (Lebert & Horn, 1991; Dias Junior, 2000). Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, pela intensidade e pela frequência de carga aplicada (Horn, 1989; Lebert & Horn, 1991; Chamen et al., 2003; Ramper, 2005), enquanto que os fatores internos são influenciados pela história de tensão (Reinert, 1990, Dias Junior, 1994, Dias Junior et al., 1999), umidade do solo (Gupta et al., 1985; Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999; Chamen et al., 2003; Raper, 2005; Dias Junior et al., 2005), textura do solo (Gupta et al., 1989; Mcbreide & Loosse, 1996; Chamen et al., 2003; Raper, 2005), estrutura do solo (Dexter & Tanner, 1974; Horn, 1988), densidade inicial do solo (Gupta et al., 1985; Reinert, 1990; Kondo & Dias Junior, 1999) e teor de carbono do solo (Assouline et al., 1997; Etana et al., 1997). Portanto, a caracterização física do solo é importante para o entendimento e modelagem do comportamento compressivo do solo, visando o planejamento de uma agrosilvicultura sustentável.

O ensaio de compressibilidade tem sido muito usado em estudos de compactação (Dias Junior & Pierce, 1995; Kondo & Dias Junior 1999; Fritton, 2001; Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Silva 2003; Oliveira et al., 2003; Dias Junior et al., 2005). Ele consiste na aplicação de pressões sucessivas e contínuas preestabelecidas (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa) a uma amostra indeformada de material de solo na condição parcialmente saturada. Este ensaio permite obter a curva de compressão do solo, que é representada por um gráfico no qual se plotam, no eixo das abscissas, os valores das pressões aplicadas em escala logarítmica e, no

eixo das ordenadas, os valores da densidade do solo em escala natural, como mostrado na Figura 1.

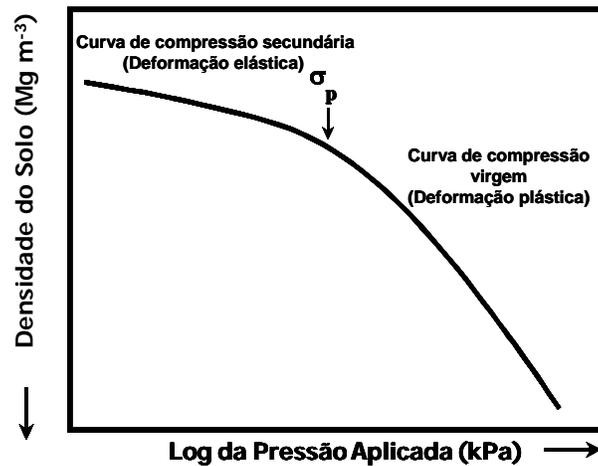


FIGURA 1 Curva de compressão do solo (Dias Junior, 1994).

A pressão de preconsolidação (σ_p) divide a curva de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, chamada de curva de compressão secundária, e uma de deformações plásticas e não recuperáveis, chamada de curva de compressão virgem (Canarache et al., 2000; Fritton, 2001). A pressão de preconsolidação tem sido usada como uma medida alternativa da capacidade suporte de carga de solos parcialmente saturados (Dias Junior, 1994; Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior, 2000; Imhoff et al., 2001). Sua determinação pode ser feita através de vários métodos, sendo os mais usados o método de Casagrande (1936) e o método proposto por Dias Junior & Pierce (1995).

Considerando a pressão de preconsolidação como um indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior, 1994) e um indicador da susceptibilidade do solo à compactação (Peng,

et al., 2004; Gregory et al., 2005), Dias Junior et al. (2005) dividiram o modelo de capacidade de suporte de carga do solo em três regiões para avaliar o efeito do tráfego sobre a pressão de preconsolidação (Figura 2). As regiões consideradas são: a) uma região onde os valores das pressões de preconsolidação determinados após o tráfego forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança, sendo considerada a região onde a compactação adicional do solo já ocorreu; b) uma região onde os valores das pressões de preconsolidação determinados após o tráfego estão entre os limites de confiança inferior e superior (embora as amostras de solo situadas nesta região não sofram compactação, esta região indica que estas amostras poderiam sofrer compactação nas próximas operações mecanizadas se as pressões aplicadas forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança) e c) uma região onde os valores das pressões de preconsolidação determinados após o tráfego são menores que o limite inferior do intervalo de confiança (Figura 2).

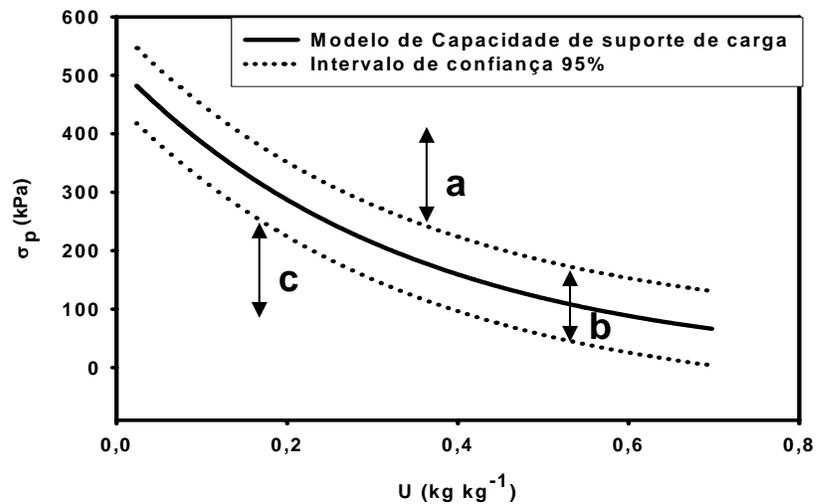


FIGURA 2 Modelo de capacidade de suporte de carga com os critérios usados para analisar o efeito das operações mecanizadas na pressão de preconsolidação, de acordo com Dias Junior et al. (2005).

Estudos recentes têm utilizado estes modelos para estimar a capacidade de suporte de carga dos solos florestais, quantificando os níveis de pressões que podem ser aplicados a estes para evitar que a compactação ocorra (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005) e para monitorar o impacto de cada operação de colheita florestal na pressão de preconsolidação.

Assim, estudos que visem o desenvolvimento de modelos de capacidade suporte de carga são importantes, pois, estes poderão ser usados como um critério auxiliar para adaptar de maneira condizente o manejo visando uma produção florestal sustentável ao longo dos anos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden III. Risk assessment using a soil water model. **Soil & Tillage & Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 77-87, May 2003.

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 67-78, June 2001.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 2, p. 390-398, Mar./Apr. 1997.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 626-631, Nov./Dec. 2004.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 9-14, Mar. 2006.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, n. 3/4, p. 185-196, Aug. 2000.

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

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 161-174, Oct. 2003.

- CHAN, K. Y., OATES, A. SWAN, A. D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, In Press, Corrected Proof, Available online 8 august 2005.
- CZYZ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 153-166, Dec. 2004.
- DEXTER, A. R.; TANNER, D. W. Time dependence of compressibility for remolded and undisturbed soils. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 25, n. 2, p. 153-164, June 1974.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; CHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 55-94.
- DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing, 1994. 114 p. Tese (Doutorado) - Michigan State University.
- DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 371-380, jul./set. 1999.
- DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas florestais. **CERNE**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, maio/jun. 2005.

- DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, jul./set. 2003.
- ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1/2, p. 13-21, Dec. 1997.
- FRITTON, D. D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 678-684, May/June 2001.
- FENNER, P. T. Compactação do solo. In: FENNER, P. T. **Colheita florestal**, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. p. 375-396.
- GREGORY, A. S.; WHALLEY, W. R.; WATTS, C. W.; BIRD, N. R. A. HALLETT, P. D.; WHITMORE, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, In Press, Corrected Proof, Available online 2 August 2005.
- GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 137-152.
- GUPTA, S. C.; HADAS, A.; VOORHEES, W. B.; WOLF, D.; LARSON, W. E.; SHNEIDER, E. C. **Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils**. Bet Dagan, Israel: Binational Agricultural Research Development/University of Minnesota, 1985. 178 p. (Research Report).
- GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 133-142, Sept. 2001.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.
- HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Amsterdam, v. 11, p. 53-71, 1988. Supplement.

HORN, R. Strength of structured soils to loading – a review of process on macro and microscale.; European aspects. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1989. p. 9-22.

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

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENTA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, jul. 2000.

IMHOF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; LAL, R. **Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II**. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 3/4, p. 153-161, July 2001.

KEILEN, K. **Estudo da alteração pelo trânsito intensivo**. In: SEMINARIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7., 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Universidade Federal de Viçosa, 1992. p. 217-220.

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

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 274-286, Feb. 1991.

LOPES, S. E. **Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de máquinas de araste de madeira**. 2003 51 p. Dissertação Mestrado (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MCBRIEDE, R. A.; LOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soils: II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 373-380, Mar./ apr. 1996.

- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, set./out. 2003.
- PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 125-137, Apr. 2004.
- RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3/4, p. 259-280, July/Oct. 2005.
- REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf**. 1990. 129 p. Thesis (Doutorate) – Michigan state University, East Lansing.
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 54, p 9-16, dez. 1998.
- SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de Forwarder com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 178-187, ago. 2003.
- SEIXAS, F.; MCDONALD, T. P.; STOKES, B. J.; RAPER, R. L. **Effect of slash on forwarder soil compaction**. In: COFE ANNUAL MEETING, 1995. Proceedings. Cashiers: COFE, 1995. p. 77-86.
- SILVA, A. R. **Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos impactos causados pelas operações mecanizadas na estrutura de um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros**. 2003. 39 p. Mestrado (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade federal de Lavras, Lavras, MG.
- SILVA, S. R. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto**. 2005. 97 p. Doutorado (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificação em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

CAPITULO 2

AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO E CARGA DE UM FORWARDER SOBRE A PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO

RESUMO

SILVA, Arystides Resende. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a pressão de preconsoidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. In:____. **Modelagem e quantificação da compactação de latossolos cultivados com eucalipto**. 2006. Cap. 2, p. 14-32. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. *

A operação de baldeio florestal está relacionada ao uso de máquinas as quais trafegam numa mesma linha várias vezes, ou aleatoriamente, o que pode causar compactação do solo, alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve e reduzindo a produtividade. Além do número de passadas, a carga de madeira transportada também pode afetar a compactação do solo, quando as pressões aplicadas pelas máquinas excederem a capacidade de suporte de carga desse solo. Os objetivos deste estudo foram: a) desenvolver um modelo de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função da pressão de preconsoidação e da umidade e b) determinar, com o uso deste modelo, o efeito da intensidade de tráfego e da carga de um Forwarder sobre a estrutura do solo. Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga 20 amostras indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm no local onde não houve tráfego. Foram também coletadas 10 amostras indeformadas em cada profundidade onde o Forwarder trafegou 2, 4 e 8 vezes e no local onde o Forwarder trafegou 4 vezes com 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³) de sua carga. As amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial. Determinou-se também a textura, a matéria orgânica, a densidade de partículas dos solos, densidade do solo, volume total de poros, capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O modelo de capacidade de suporte de carga do LVA é expresso pela equação $\sigma_p = 10^{(2,71 - 1,36 U)}$. Todas as intensidades de tráfego causaram compactação no solo nas duas profundidades estudadas, sendo quatro passadas a que causou uma maior compactação do solo e à medida que a carga do Forwarder aumentou, a compactação do solo também aumentou, nas duas profundidades.

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

ABSTRACT

SILVA, Arystides Resende. Evaluation of the traffic intensity and load of a forwarder on the preconsolidation pressure of a Red-Yellow Latosol. In:____. **Pattern and quantification from compactation in the Latosols cultivated with eucalypt.** 2006. Chap. 2, p. 14-32. Thesis (Doctorate in Soil and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras. Lavras, Minas Gerais. Brazil.*

The forest traffic is related to the use of machines that trafficked on the same line or randomly, which may cause soil compaction, changing the place where there root growth system develops and reducing the productivity. Besides the number of passes, the carried load of wood may also affect the soil compaction, when the applied pressures by the machines exceed the load support capacity of the soil. The objectives of this study were: a) to develop the load support capacity models for a Red-Yellow Latosol (LVA) as function of the preconsolidation pressure and moisture content; b) determine, through the use of this model, the traffic effect and loads intensity of a forwarder on the soil structure. To obtain the load support capacity models, 20 undisturbed soil samples were collected in the depth of 0-3 and 10-13 cm in the place where there was no traffic. Also 10 undisturbed soil samples were collected for each depth where the Forwarder trafficked 2, 4 and 8 times and where the Forwarder passed in the same traffic line 4 times with 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³) of its load. The undisturbed soil samples were used in the uniaxial compression tests. The particle size distribution, organic matter and particle density, soil density, total porosity, field capacity and permanent wilting point were also determined. The load support capacity model for the Red-Yellow Latosol is expressed by the equation $\sigma_p = 10^{(2,71 - 1,36 U)}$. All the traffic intensities caused soil compaction in the two depths, being four passes the one that caused a larger soil compaction and as the Forwarder load increased, the soil compaction also increased in the two depths.

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

1 INTRODUÇÃO

As operações mecanizadas de colheita florestal se intensificaram no início da década de 1990, em função do aumento da demanda por madeira e da redução da disponibilidade e custos da mão-de-obra. Desde então o processo de colheita florestal tem causado um processo acelerado de degradação da estrutura do solo devido ao aumento da intensidade do tráfego de máquinas durante as operações de colheita e baldeio da madeira, principalmente quando realizadas em condições inadequadas de umidade (Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior et al., 1999; Chamen et al., 2003; Dias Junior et al., 2005).

O tráfego intensivo de máquinas tem sido o principal responsável pelo aumento da densidade e resistência mecânica do solo, diminuição da porosidade e condutividade hidráulica (Hanza & Anderson, 2005), resultando na compactação do solo e alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve (Gysi, 2001), o que dificulta a penetração das raízes, a extração de água e o crescimento das plantas, afetando seu potencial produtivo, e a qualidade ambiental, devido ao aumento do processo erosivo (Berli, 2004) e culminando com uma redução na produtividade das culturas.

A compactação em solos florestais está relacionada ao uso de máquinas utilizadas nas operações de colheita e baldeio da madeira (Larson et al., 1989; Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior et al., 1999; Dias Junior, 2000) que trafegam várias vezes em uma mesma linha de tráfego ou aleatoriamente na área (Dias Junior et al., 2002; Raper, 2005; Hanza & Anderson, 2005; Silva, 2005) e pela carga que estas máquinas de baldeio transportam, podendo aplicar pressões aos solos maiores do que a sua capacidade de suporte de carga (Dias Junior et al., 2005), resultando em compactação.

Portanto, o tráfego em áreas cultivadas com eucalipto tem se tornado preocupante, devido à possibilidade de disseminação da compactação (Dias Junior et al., 2005), principalmente quando este é realizado em condições inadequadas de umidade e por vários ciclos da exploração florestal (Raper, 2005; Hanza & Anderson, 2005; Silva, 2005). Assim, estudos que visam à identificação, quantificação e minimização dos efeitos causados pelo baldeio da madeira sobre o solo são importantes para adaptar de maneira condizente, o manejo visando uma exploração florestal sustentável.

Em estudos recentes, modelos têm sido utilizados para estimar a capacidade de suporte de carga dos solos, quantificando os níveis máximos de pressões que podem ser aplicados a estes para evitar que a compactação ocorra (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005) e para monitorar o impacto de cada operação de colheita florestal sobre a estrutura dos solos. Portanto, estudos que contemplem o desenvolvimento de modelos de capacidade de suporte de carga visando quantificar o efeito das operações florestais sobre a estrutura dos solos, tornam-se importantes para se estabelecer uma exploração florestal sustentável ao longo dos anos.

Diante dessas considerações, os objetivos deste estudo foram: a) propor um modelo de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função da pressão de preconsolidação e da umidade e b) determinar, com o uso destes modelos, o efeito da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a estrutura do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido no mês de fevereiro de 2003 em áreas experimentais da Celulose Nipo-Brasileira S.A (CENIBRA), no município de Santa Maria de Itabira, MG, apresentando as coordenadas 19°23'11,63"S e 42°54'16,11"W de Greenwich, e altitude de 850 metros, em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura argilosa.

As operações de colheita florestal foram realizadas com o uso de motosserra e a retirada da madeira feita manualmente. Foram demarcadas, para cada experimento, parcelas de quatro linhas de árvores com 26 árvores na linha com espaçamento de 3 x 2 m, apresentando uma área total de 624 m², onde dois experimentos foram conduzidos. No primeiro, avaliou-se o efeito da intensidade de tráfego, no qual utilizou-se o Forwarder autocarregável (marca Valmet, modelo 636 S), pneu 600/55-26.5 com tara de 11,9 t, carregado com 9 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) trafegando sobre a mesma entrelinha 0, 2, 4 e 8 vezes, com uma carga de 3/3 de sua capacidade, o que corresponde a 9 m³ de madeira. No segundo experimento, o Forwarder recebeu cargas correspondentes a 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³) de madeira, trafegando quatro vezes na mesma entrelinha.

A amostragem foi realizada no mês de novembro de 2004 (21 meses após o tráfego do Forwarder) e consistiu em coletas de: a) amostras indeformadas coletadas na parcela onde não houve tráfego do Forwarder (0 passadas), as quais foram utilizadas na obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo e b) amostras indeformadas coletadas na linha de tráfego, para verificar os efeitos da intensidade de tráfego e carga do Forwarder sobre a estrutura do solo.

Para a obtenção do modelo de capacidade de suporte de carga, foram coletadas 20 amostras indeformadas em cada profundidade (0-3 e 10-13 cm) onde não houve tráfego do Forwarder (0 passadas). As amostras foram coletadas usando-se um amostrador tipo Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, totalizando 40 amostras [20 amostras x 2 profundidades]. As amostras foram parafinadas no campo, para evitar alterações na umidade a partir do momento da coleta até a realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

Estas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial de acordo com o método proposto por Bowles (1986), modificado por Dias Junior (1994).

Para a realização dos ensaios de compressão uniaxial, as amostras foram previamente saturadas e, depois, secas ao ar no laboratório, até se obterem as faixas de umidade de 0,05 a 0,47 kg kg⁻¹, sendo o limite inferior de umidade estabelecido foi 5% de umidade e o limite superior foi a umidade retida na amostra a tensão de 0,02 atm. Após a obtenção dessas umidades, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial usando um consolidômetro da marca Boart Longyear, por meio do qual as pressões foram aplicadas utilizando-se ar comprimido. As pressões aplicadas em cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse atingida (Taylor, 1948) e, após essa condição ser atingida, aplicou-se uma nova pressão.

Após a realização do ensaio de compressão uniaxial, as pressões de preconsolidação (σ_p) foram obtidas na curva de compressão do solo de acordo com Dias Junior & Pierce (1995). As pressões de preconsolidação foram plotadas em função da umidade e utilizando-se o software Sigma Plot 8.0 (Jandel Scientific, P.O. Box 7005, San Rafael, CA, USA), foram ajustadas equações matemáticas a estes pontos, que correspondem aos modelos de

capacidade de suporte de carga com os respectivos intervalos de confiança da população a 95%.

Para avaliar a intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a estrutura do solo, 10 amostras indeformadas foram coletadas na linha de tráfego para cada profundidade nas diferentes condições estudadas, totalizando 120 amostras [10 amostras x 2 profundidades x 6 condições (2, 4 e 8 passadas e 1/3, 2/3 e 3/3 da carga)]. As amostras indeformadas foram parafinadas no campo para evitar alterações da umidade a partir do momento da coleta até o da realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

Nestas amostras, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados com a umidade na qual as operações com o Forwarder foram realizadas. Obtiveram-se, então, os valores das pressões de preconsolidação e das umidades que foram plotados nos modelos de capacidade de suporte de carga, determinando-se, assim, os efeitos da intensidade de tráfego e carga do Forwarder sobre a estrutura do solo estudado, de acordo com Dia Junior et al. (2005). Determinando também nestas amostras a densidade do solo e volume total de poros, de acordo com EMBRAPA (1997).

As amostras deformadas foram obtidas pela coleta de solo das porções superiores e inferiores dos anéis de amostragem, nas quais foram determinados os teores de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983), textura (Day, 1986), densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986) (Tabela 1). A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram também determinados em amostras indeformadas utilizando-se o método de Klute (1986) (Tabela 1).

TABELA 1 Características físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) localizado na Região de Santa Maria de Itabira, MG. Amostras coletadas nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm.

Camadas	Argila	Areia	Silte	MO ¹	Dp ¹	Ds ¹	PT ¹	CC ¹	PMP ¹
cm	g kg ⁻¹				g cm ⁻³		m ³ m ³	kg kg ⁻¹	
0 – 3	537	407	56	40	2,50	0,98	0,61	0,30	0,26
10 – 13	570	367	63	25	2,56	0,94	0,63	0,31	0,25

⁽¹⁾ MO = matéria orgânica; Dp = densidade de partículas; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; CC = Capacidade de campo (amostras submetidas à tensão de 10 kPa); PMP = ponto de murcha permanente (amostras submetidas à tensão de 1500 kPa).

As características químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) foram realizadas com base nos elementos no extrato do ataque sulfúrico, segundo EMBRAPA (1997), os resultados foram de 71,29 g kg⁻¹ de SiO₂, 172,93 g kg⁻¹ de Al₂O₃ e 60,64 g kg⁻¹ de Fe₂O₃. O solo foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo oxidico-gibbsítico (Silva, 2005).

As análises de regressões foram realizadas com o uso do software Sigma Plot 8.0 (Jandel Scientific) e as comparações das regressões foram feitas utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de capacidade de suporte de carga o Latossolo Vermelho-Amarelo para as profundidades 0-3 e 10-13 cm (Figura 1) foram $\sigma_p = 10^{(2,70 - 1,33U)}$ e $\sigma_p = 10^{(2,72 - 1,40U)}$, respectivamente, seguindo o modelo proposto por Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,91 a 0,92, sendo todos significativos ao nível de 1% (Figura 1).

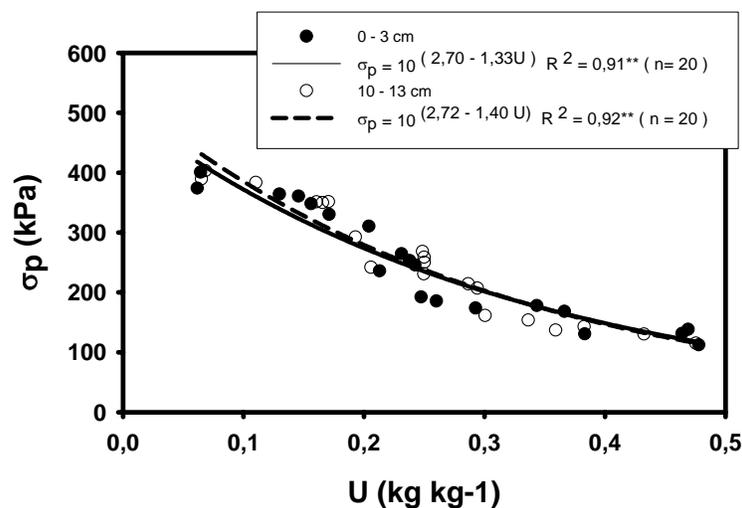


FIGURA 1 Modelos da capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm.

Os modelos de capacidade de suporte de carga foram homogêneos de acordo com o procedimento estatístico proposto por Snedecor & Cochran (1989), indicando mesma capacidade de suporte de carga nas profundidades 0-3

e 10-13 cm. Em função desta homogeneidade, uma nova equação de regressão foi ajustada considerando todos os valores de pressão de preconsolidação e de umidade. Obteve-se assim, um único modelo de capacidade de suporte de carga, $\sigma_p = 10^{(2,71 - 1,36U)}$, com R^2 significativo a 1% e igual a 0,92, para as duas profundidades do Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 2).

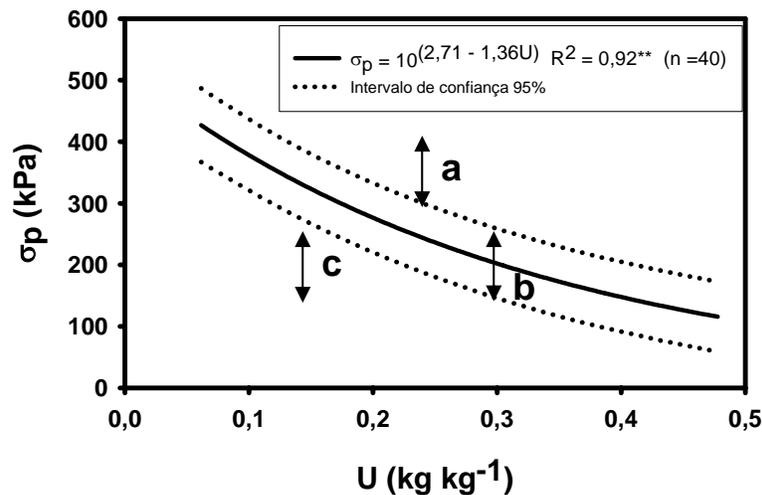


FIGURA 2 Modelo da capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo, para as profundidades de 0-3 e 10-13 cm. As regiões indicadas pelas letras “a”, “b” e “c” foram estipuladas de acordo com Dias Junior et al. (2005).

Para avaliar a intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a estrutura de um LVA, plotaram-se, no modelo de capacidade de suporte de carga (Figura 2), os valores das pressões de preconsolidação com suas respectivas umidades obtidas nas amostras que foram coletadas logo após as operações do Forwarder quando este trafegou 2, 4 e 8 vezes em uma mesma linha e quando o Forwarder trafegou com 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³) de sua carga em uma mesma linha. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, de acordo com os critérios usados por Dias Junior et al. (2005).

TABELA 2 Valores médios de umidade e pressão de preconsolidação determinados após as operações do Forwarder para um Latossolo Vermelho-Amarelo nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm, situado no município de Santa Maria de Itabira, MG e a classificação da porcentagem de amostras de solo, de acordo com cada região “a”, “b” e “c” do modelo apresentado na Figura 2, sugerido por Dias Junior et al. (2005).

Efeito da Intensidade de Tráfego Forwarder						
Profundidade de 0-3 cm						
Região	2 passadas (9m ³)		4 passadas (9m ³)		8 passadas (9m ³)	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa
a - Compactação	0,23 ¹	321 ¹	0,24 ³	340 ³	0,26 ⁴	324 ⁴
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,23 ²	283 ²	-	-	0,21 ⁵	271 ⁵
c - Sem compactação	-	-	-	-	-	-
Profundidade de 0-3 cm						
Região	2 passadas (9m ³)		4 passadas (9m ³)		8 passadas (9m ³)	
	----- % -----					
a - Compactação	30		100		60	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	70		0		40	
c - Sem compactação	0		0		0	
Profundidade de 10-13 cm						
Região	2 passadas (9m ³)		4 passadas (9m ³)		8 passadas (9m ³)	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa
a - Compactação	0,23 ³	360 ³	0,23 ⁶	355 ⁶	0,22 ⁶	346 ⁶
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	-	-	0,21 ⁷	310 ⁷	0,23 ⁷	288 ⁷
c - Sem compactação	-	-	-	-	-	-
Profundidade de 10-13 cm						
Região	2 passadas (9m ³)		4 passadas (9m ³)		8 passadas (9m ³)	
	----- % -----					
a - Compactação	100		80		80	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0		20		20	
c - Sem compactação	0		0		0	

1-Médias de 3 amostras; 2- médias de 7 amostras; 3- médias de 10 amostras; 4- médias de 6 amostras; 5- médias de 4 amostras; 6- médias de 8 amostras; 7- médias de 2 amostras.

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que todas as intensidades de tráfego causaram alguma alteração na estrutura do solo. O número de duas passadas do Forwarder na mesma entrelinha promoveu uma maior compactação na profundidade de 10-13 cm do que o número de passadas igual a quatro e oito na mesma entrelinha. Estes resultados corroboram com os obtidos por Fernandes et al. (1997) e Hanza & Anderson (2005), que observaram que a maior parte da compactação do solo ocorre na primeira passada de uma roda e que esta pode aumentar com o aumento do número de passadas.

O número de passadas igual a quatro foi a que causou maior compactação na profundidade de 0-3 cm. Já o número de passadas igual a oito causou menor compactação do que o número de passadas igual a quatro, na profundidade de 0-3 cm e do que o número de passadas igual a duas, na profundidade de 10-13 cm. Estes resultados são justificados pelo fato de que, para estas situações, os níveis de pressões aplicadas pelo Forwarder foram maiores do que a capacidade de suporte de carga do solo, o que promoveu uma destruição de sua estrutura, com conseqüente redução nas pressões de preconsolidação.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Castro Neto (2001) e por Silva (2003), que observaram camadas compactadas em profundidade e observaram ainda, que à medida que a intensidade de tráfego aumentava, a compactação do solo era mais evidenciada, na profundidade de 0-3 cm.

TABELA 3 Valores médios de umidade e pressão de preconsolidação determinados após quatro passadas do Forwarder na mesma entrelinha, com diferentes cargas em um Latossolo Vermelho-Amarelo, nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm, situado no município de Santa Maria de Itabira, MG e a classificação da porcentagem de amostras de solo, de acordo com cada região “a”, “b” e “c” do modelo apresentado na Figura 2, sugerido por Dias Junior et al. (2005).

Efeito da Carga de Tráfego Forwarder						
Profundidade de 0-3 cm						
Região	1/3 carga (3m ³)		2/3 carga (6m ³)		3/3 carga (9m ³)	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa
a - Compactação	0,26 ¹	326 ¹	0,25 ³	348 ³	0,25 ⁵	358 ⁵
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,22 ²	290 ²	0,22 ⁴	291 ⁴	0,23 ⁶	270 ⁶
c - Sem compactação	-	-	-	-	-	-
Profundidade de 0-3 cm						
Região	1/3 carga (3m ³)		2/3 carga (6m ³)		3/3 carga (9m ³)	
	----- % -----					
a - Compactação	60		80		90	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	40		20		10	
c - Sem compactação	0		0		0	
Profundidade de 10-13 cm						
Região	1/3 carga (3m ³)		2/3 carga (6m ³)		3/3 carga (9m ³)	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa
a - Compactação	0,23 ⁷	315 ⁷	0,23 ³	368 ³	0,23 ⁵	341 ⁵
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,22 ⁴	293 ⁴	0,23 ⁴	298 ⁴	0,25 ⁶	277 ⁶
c - Sem compactação	0,24 ⁶	174 ⁶	-	-	-	-
Profundidade de 10-13 cm						
Região	1/3 carga (3m ³)		2/3 carga (6m ³)		3/3 carga (9m ³)	
	----- % -----					
a - Compactação	70		80		90	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	20		20		10	
c - Sem compactação	10		0		0	

1- Médias de 6 amostras; 2- médias de 4 amostras; 3- médias de 8 amostras; 4- médias de 2 amostras; 5- médias de 9 amostras; 6- médias de 1 amostras; 7- médias de 7 amostras.

Quando a carga do Forwarder foi aumentada de 3 m³ para 6 m³ e para 9 m³ (Tabela 3), as porcentagens de amostras compactadas foram de 60%, 80% e 90%, respectivamente, na profundidade de 0-3 cm e de 70%, 80% e 90%, na profundidade de 10-13 cm, respectivamente. Estes resultados indicam que com o aumento da carga ocorreu um aumento da compactação nas duas profundidades. Estes resultados discordam dos obtidos por Çarman (2002), segundo o qual o aumento da carga não aumenta, necessariamente, a compactação do solo, devido ao aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga no solo. Mas, corroboram, entretanto, com os resultados obtidos por Silva (2005), que observou, após 441 dias, decréscimo significativo na densidade do solo onde o Forwarder trafegou carregado com 4 m³ de madeira, indicando que maiores cargas induzem ao solo uma compactação permanente ao longo do tempo.

4 CONCLUSÕES

O modelo de capacidade suporte de carga do LVA é expresso pela equação $\sigma_p = 10^{(2,71-1,36U)}$.

Todas as intensidades de tráfego causaram compactação no solo nas duas camadas estudadas, sendo a de quatro passadas na mesma entrelinha foi em geral, a que causou maior compactação do solo.

À medida que aumentou a carga do Forwarder, a compactação do solo aumentou nas duas profundidades.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison, American Society Agronomy, 1986. p. 377-382. (Agronomy Monograph, 9).
- BERLI, M.; KULLI, B.; ATTINGER, W.; KELLER, M.; LEUENBERG, J.; FLUHLER, H.; SPRINGMA, S. M.; SCHULIN, R. Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, p. 37-52, Jan. 2004.
- BOWLES, J. E. Engineering properties of soils and their measurements. 3. ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986. 218 p.
- ÇARMAN, K. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 37-43, Apr. 2002.
- CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. **Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review**. Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, n. 1/2, p. 161-174, Oct. 2003.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: KLUTE, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison, American Society Agronomy, 1986. p. 545-567. (Agronomy Monograph, 9)
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

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

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 371-380, jul./set. 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas florestais. **CERNE**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, jul./set. 2003.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, maio/jun. 2005.

EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FERNANDES, H. C.; ORLANDO, R. C.; LANÇAS, K. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influencia do Forwarder e do Harvester. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 5, n. 4, p. 276-280, out./dez. 1997.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 133-142, Sept. 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: **Methods of soil analysis**. Part I. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-686.

LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R. VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. 273 p. (NATO Applied Science, 172).

RAIJ, B. van; GUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 16 p. (Circular, 63).

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

SIIVA, A. R. **Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos impactos causados pelas operações mecanizadas na estrutura de um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros**. 2003. 39 p. Mestrado (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade federal de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, S. R. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto**. 2005. 97 p. Doutorado (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley, 1948. 700 p.

CAPITULO 3

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CAMADA DE RESÍDUOS FLORESTAIS NA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DE DOIS LATOSSOLOS

RESUMO

SILVA, Arystides Resende. Avaliação do efeito da camada de resíduos florestais na pressão de preconsolidação de dois Latossolos In:____. **Modelagem e quantificação da compactação de latossolos cultivados com eucalipto**. 2006. Cap. 3, p. 33-52. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A mecanização realizada durante as operações de colheita e baldeio da madeira envolve tráfego intensivo de máquinas sobre o solo, podendo alterar suas propriedades físicas, com conseqüente compactação e prejudicando as produções destes solos. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da camada de resíduos sobre a pressão de preconsolidação utilizando os modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Amarelo (LA) e de um Latossolo Vermelho (LV). Foram coletadas 20 amostras indeformadas na região de Belo Oriente e 20 na de São João Evangelista, na profundidade de 10-13 cm, na linha de tráfego do Forwarder, quando este trafegou duas e oito vezes em quatro condições de disposição de resíduo, sendo o tráfego realizado: sobre a galhada (G); sobre a galhada mais a casca (GC); sobre o solo sem resíduo (SR) e em uma condição onde não houve tráfego do Forwarder (ST). As amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial. Determinou-se também textura, matéria orgânica, densidade de partículas dos solos, densidade do solo, volume total de poros e o ponto de murcha permanente. O tráfego sobre os resíduos florestais atenuou a compactação nos solos estudados principalmente na condição de Galhada+Casca (GC), sendo a pior situação a condição de Solo Sem Resíduo (SR) tanto na região de Belo Oriente quanto na de São João Evangelista. À medida que aumentou-se a intensidade de tráfego de duas para oito vezes, houve uma maior compactação do solo nas condições estudadas.

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

ABSTRACT

SILVA, Arystides Resende. Evaluation of the effect of the forest residuals layer in the preconsolidation pressure of two Latosols. In:____. **Pattern and quantification from compaction in the Latosols cultivated with eucalypt.** 2006. Chap. 3, p. 33-52. Thesis (Doctorate in Soil and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras. Lavras, Minas Gerais. Brazil. *

The mechanization accomplished during the harvest operations and wood transport involves intensive machines traffic on the soil, which may alter its physical properties, with consequent soil compaction and harming the production of those soils. The objective of this study was to evaluate the residue effect on the preconsolidation pressure using the load support capacity models of a Yellow Latosol (LA) and a Red Latosol (LV). 20 undisturbed soil sample were collected in the Belo Oriente region and 20 in the São João Evangelista region at 10-13 cm depth, in the traffic line of the Forwarder when it trafficked two and eight times over four conditions of residue disposition being the traffic performed: on the Brushwood (G); on the Brushwood and bark (GC); on the soil without residue (SR); and in a condition where there was no traffic of the Forwarder (ST). The undisturbed soil samples were used in the uniaxial compression tests. The particle size distribution, organic matter, particle density, soil density, total porosity, field capacity and permanent wilting point were also determined. The traffic over the forest residues attenuated the soil compaction in the studied soils, mainly in the condition of Brushwood and Bark (GC), being the soil without residue (SR) the worst condition, in the Belo Oriente and in the São João Evangelista regions. As the traffic intensity increased from two to eight times, there was a larger soil compaction in the studied conditions.

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem sido identificada como um dos principais problemas causadores da degradação da estrutura dos solos (Canillas & Salokhe, 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005), acarretando reduções da capacidade produtiva (Fenner, 2002) por causar aumento da densidade do solo e de sua resistência mecânica (Lebert & Horn, 1991; Hanza & Anderson, 2005; Botta et al., 2006) restringido assim a penetração de raízes (Gysi, 2001), a absorção de nutrientes, a infiltração, a redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular (Arvidsson, 2001; Ishaq et al., 2001), além de aumentar a erosão, devido ao maior escoamento superficial (Canillas & Salokhe, 2002) gerando perdas de solo e nutrientes.

Estudos recentes revelam que a compactação de solos florestais tem ocorrido em consequência das operações florestais mecanizadas que envolvem o tráfego intensivo de máquinas sobre o solo (Dias Junior & Pierce, 1996; Dias Junior, 2000; Czyz, 2004; Dias Junior et al., 2005), durante as operações de colheita e baldeio da madeira (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2003) principalmente quando o solo encontra em condições inadequadas de umidade para o tráfego (Dias Junior et al., 2002; Arvidsson et al., 2003; Dias Junior et al., 2005; Raper, 2005), o que pode causar compactação e prejudicar a sua capacidade produtiva (Czyz, 2004; Chan et al., 2005).

O uso sustentável do solo em áreas florestais está relacionado com o tráfego de veículos durante as operações, principalmente de colheita e baldeio da madeira (Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005), visando, em áreas de produção de celulose, abastecer a fábrica de madeira durante todo ano, mesmo em condições inadequadas de umidade, o que

pode causar compactação do solo, devido à sua menor capacidade de suporte de carga.

Procurando alternativas para minimizar os impactos do tráfego sobre a estrutura dos solos sob exploração florestal, vislumbra-se a possibilidade do uso de resíduos florestais (Keilen, 1992; Seixas et al., 1995; Seixas, 1998; Dias Junior et al., 2002). Espera-se que esses resíduos florestais distribuam as pressões aplicadas, de forma a evitar que a capacidade de suporte de carga do solo seja superada, reduzindo, portanto, o risco da compactação ocorrer e reduzindo a formação de sulcos (Wronski, 1990) causados pelos rodados das máquinas florestais (McMahon & Evanson 1994). Assim, torna-se importante a realização de estudos que contemplem o efeito dos resíduos florestais (galhos, folhas e casca) deixados sobre os carregadores, visando minimizar o efeito do tráfego da colheita florestal sobre a estrutura dos solos.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da camada de resíduos sobre a pressão de preconsolidação, utilizando os modelos de capacidade de suporte de carga determinado para Latossolos das regiões de Belo Oriente e São João Evangelista em MG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido em áreas experimentais da Celulose Nipo-Brasileira S.A (CENIBRA), em duas regiões, no município de Belo Oriente, MG, apresentando as coordenadas: 19°18'23"S e 42°25'31"W de Greenwich, e altitude de 300 metros, e outra no município de São João Evangelista, MG, apresentando as coordenadas: 18°34'12"S e 42°52'53"W de Greenwich e altitude de 860 metros.

O solo da região de Belo Oriente foi classificado como Latossolo Amarelo (LA), textura argilosa e o da região de São João Evangelista foi classificado como Latossolo Vermelo (LV), textura muito argilosa.

Foram demarcadas parcelas de 36 m de comprimento e 4 m de largura o que corresponde à linha de 12 árvores de eucaliptos. A colheita florestal foi realizada manualmente, com o uso de motosserra e o baldeio da madeira foi feito com o Forwarder autocarregável (marca Valmet, modelo 636 S), pneu 600/55-26.5 com tara de 11,9 t, carregado com 9 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) que trafegou duas e oito vezes em parcelas distintas, nas seguintes condições de disposição dos resíduos: 1) tráfego sobre a galhada (G); 2) tráfego sobre a galhada mais a casca (GC); 3) tráfego sobre o solo sem resíduo (SR) e 4) Sem tráfego do Forwarder (ST). Para cada condição de disposição de resíduo foram coletadas no mês de janeiro de 2005 na região de Belo Oriente e no mês de fevereiro de 2005 na região de São João Evangelista, 20 amostras indeformadas na linha de tráfego do Forwarder na profundidade de 10 a 13 cm (o motivo da amostragem a 10 cm é que, de acordo com estudos anteriores, a esta profundidade foi observada a maior resistência à penetração), após este ter trafegado duas e oito vezes na mesma entrelinha, totalizando 320 amostras (20 amostras x 4 condições de resíduos x 2 condições de passadas x 2 regiões). As

amostras foram parafinadas no campo para evitar alterações na umidade a partir do momento da coleta até o da realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

No laboratório, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados nessas amostras com a umidade na qual as operações com o Forwarder foram realizadas, usando um consolidômetro da marca Boart Longyear, por meio do qual as pressões foram aplicadas utilizando-se ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse atingida (Taylor, 1948) e, após essa condição ser atingida, aplicou-se uma nova pressão. Para cada umidade de operação do Forwarder, as pressões de preconsolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995) e foram plotados nos modelos de capacidade de suporte de carga de cada região obtidos por Dias Junior et al., (2005), determinando, assim, o efeito dos resíduos sobre a pressão de preconsolidação.

As amostras deformadas foram obtidas pela coleta de solo das porções superiores e inferiores dos anéis de amostragem, nas quais foram determinados os teores de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983), textura (Day, 1986), densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986), densidade do solo e volume total de poros, de acordo com EMBRAPA (1997) (Tabela 1). A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram também determinados em amostras indeformadas de solo (Klute, 1986) (Tabela 1).

A caracterização química foi realizada com base nos elementos no extrato do ataque sulfúrico segundo EMBRAPA (1997) (Tabela 2).

TABELA 1 Características físicas de um Latossolo Amarelo (LA) localizado na Região de Belo Oriente e de um Latossolo Vermelho (LV) localizado na Região de São João Evangelista, na profundidade de 10-13 cm.

Solos	Argila	Areia	Silte	MO ¹	Dp ¹	Ds ¹	PT ¹	CC ¹	PMP ¹
	-----g kg ⁻¹ -----				----g cm ⁻³ ----		m ³ m ³	----kg kg ⁻¹ ----	
LA	590	343	67	28	2,56	1,15	0,55	0,28	0,23
LV	747	183	70	61	2,53	0,86	0,66	0,41	0,32

⁽¹⁾ MO = matéria orgânica; Dp = densidade de partículas; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; CC = Capacidade de campo (amostras submetidas à tensão de 10 kPa); PMP = ponto de murcha permanente (amostras submetidas à tensão de 1500 kPa).

TABELA 2 Características químicas de um Latossolo Amarelo (LA) localizado na Região de Belo Oriente e de um Latossolo Vermelho (LV) localizado na Região de São João Evangelista.

Solos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr	Classe mineralógica ¹
	-----g kg ⁻¹ -----					
LA	245	252	77	1,65	1,38	Caulinítico
LV	123	245	80	0,85	0,71	Oxídico-caulinítico

Ki : relação molecular SiO₂/ Al₂O₃; Kr : relação molecular SiO₂/ (Al₂O₃ + Fe₂O₃). ⁽¹⁾ Embrapa (1997); Resende & Santana (1988).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar os efeitos das diferentes condições de disposição de resíduos sobre a pressão de preconsolidação, foram utilizados os modelos de capacidade de suporte de carga obtidos por Dias Junior et al. (2005) para as regiões onde este estudo foi conduzido (Figura 1).

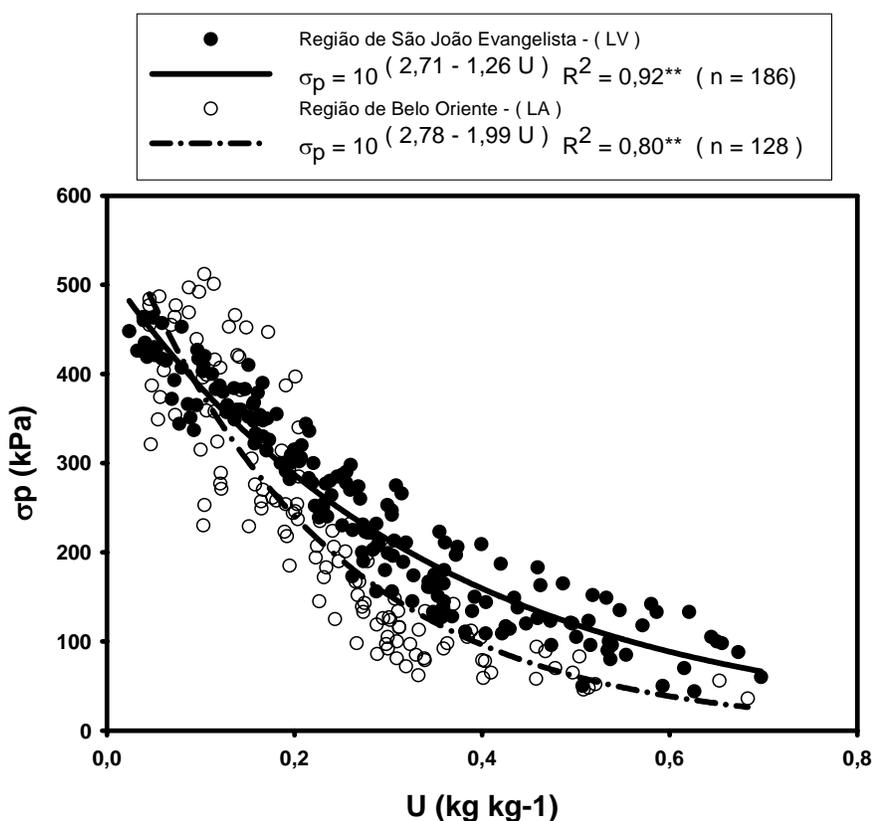


FIGURA 1 Modelos da capacidade de suporte de carga para o Latossolo Amarelo (Região Belo Oriente) e para o Latossolo Vermelho (Região São João Evangelista), na profundidade de 10-13 cm. Fonte: Dias Junior et al. (2005).

Considerando a pressão de preconsolidação como um indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior, 1994) e um indicador da susceptibilidade do solo à compactação (Peng, et al., 2004; Gregory et al., 2005), a Figura 1 foi dividida em três regiões, para avaliação do efeito do tráfego sobre a pressão de preconsolidação, de acordo com Dias Junior et al. (2005). As regiões consideradas são: a) região onde os valores da pressão de preconsolidação determinados após o tráfego forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança, sendo considerada a região com compactação adicional do solo; b) região onde os valores da pressão de preconsolidação determinados após o tráfego estão entre os limites de confiança inferior e superior (embora, as amostras de solo situadas nesta região não sofram compactação, esta região indica que as amostras poderiam sofrer compactação nas próximas operações de colheita se as pressões aplicadas forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança) e c) região onde os valores da pressão de preconsolidação determinada após o tráfego são menores que o limite inferior do intervalo de confiança (Figura 2).

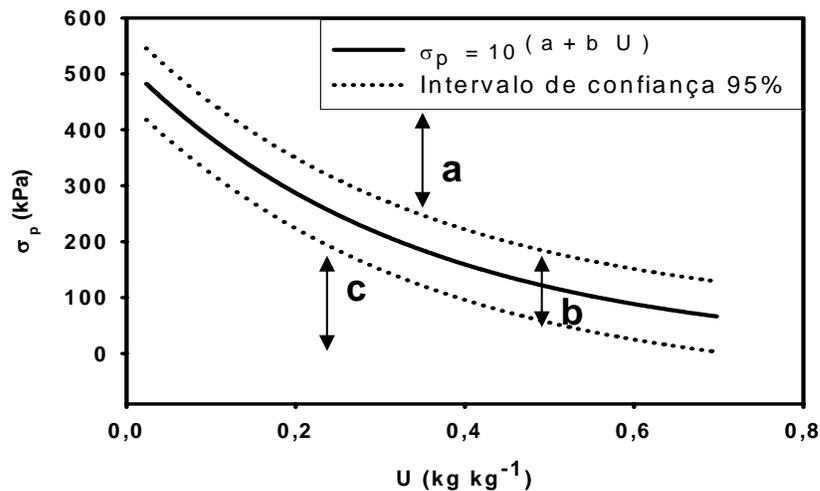


FIGURA 2 Critérios usados para analisar o efeito das operações mecanizadas na pressão de preconsolidação (Dias Junior et al., 2005).

Tanto para o Latossolo Amarelo da Região de Belo Oriente (Tabela 3) quanto para o Latossolo Vermelho de São João Evangelista (Tabela 4), a condição sem tráfego (ST) apresentou 100% das amostras com pressão de preconsolidação abaixo da estimada pelo modelo de capacidade de suporte de cargas, evidenciando que a condição do solo no início do experimento, não possui nenhuma camada compactada.

Quando o Forwarder trafegou duas vezes na Região de Belo Oriente sobre Galhada + Casca (GC) e sobre Galhada (G) (Tabela 3), 100% das amostras não sofreram compactação e, na condição de Solo Sem Resíduo (SR) 5% das amostras foram compactadas.

Aumentando-se a intensidade de tráfego do Forwarder para oito passadas na Região de Belo Oriente (Tabela 3), observou-se que o tráfego realizado sobre Galhada + Casca (GC) apresentou 5% das amostras compactadas, enquanto que, na condição de Galhada (G) 15% das amostras apresentaram compactação e na condição Solos Sem Resíduo (SR) 70% das amostras foram compactadas.

TABELA 3 Valores médios de umidade e pressão de preconsolidação determinados após as operações do Forwarder trafegando duas e oito vezes em diferentes condições de disposição de resíduos em um Latossolo Amarelo, na profundidade de 10-13 cm na Região Belo Oriente, MG e a classificação da porcentagem de amostras de solo, de acordo com cada região “a”, “b” e “c” do modelo apresentado na Figura 2 sugerido por Dias Junior et al. (2005).

Condições de disposição dos resíduos*								
2 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa						
a - Compactação	-	-	-	-	-	-	0,27 ²	297 ²
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,25 ¹	125 ¹	0,27 ¹	205 ¹	0,26 ¹	210 ¹	0,25 ³	262 ³
c - Sem compactação	-	-	-	-	-	-	-	-
2 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	-----%-----							
a - Compactação	0		0		0		5	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	100		100		100		95	
c - Sem compactação	0		0		0		0	
8 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	U kg kg ⁻¹	σ _p kPa						
a - Compactação	-	-	0,29 ²	311 ²	0,28 ⁴	305 ⁴	0,25 ⁶	327 ⁶
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,25 ¹	125 ¹	0,27 ³	224 ³	0,26 ⁵	257 ⁵	0,24 ⁷	284 ⁷
c - Sem compactação	-	-	-	-	-	-	-	-
8 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	-----%-----							
a - Compactação	0		5		15		70	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	100		95		85		30	
c - Sem compactação	0		0		0		0	

(*) ST = Sem tráfego do Forwarder; GC = Condição de Galhada+Casca; G = Condição de Galhada; SR = Condição Sem Resíduo. 1- médias de 20 amostras; 2- médias de 1 amostras; 3- médias de 19 amostras; 4- médias de 3 amostras; 5- médias de 17 amostras; 6- médias de 14 amostras; 7- médias de 6 amostras.

Estes resultados mostram que, à medida que aumentou a intensidade de tráfego do Forwarder de duas para oito passadas, ocorreu uma degradação da estrutura do solo em todas as condições de disposição dos resíduos, evidenciada pelo aumento dos valores das pressões de preconsolidação, principalmente para a condição de Solo Sem Resíduo (SR) (Tabela 3), corroborando com Keilen (1992) que constatou que com o aumento da intensidade de tráfego, ocorreu uma maior compactação do solo quando este foi realizado sem a camada de galhos. Respostas semelhantes foram também encontradas por Wood et al. (1993), Silva (2003), Seixas et al. (2003), Czyz (2004) e Servadio et al. (2005), os quais verificaram uma maior degradação da estrutura do solo com o aumento do número de passadas.

Apesar da compactação ter aumentado com o aumento do número de passadas do Forwarder na Região de Belo Oriente, as condições de Galhada + Casca (GC) e Galhada (G) minimizaram o efeito da compactação sendo a condição de Galhada + Casca (GC) a mais eficiente (Tabela 3).

Quando o Forwarder trafegou duas vezes na Região de São João Evangelista, não ocorreu compactação do solo em nenhuma condição de disposição dos resíduos, apresentando, entretanto, a maioria das amostras tendência em sofrer compactação (Tabela 4).

Com o aumento da intensidade de tráfego para oito passadas (Tabela 4), observa-se que, na condição de Galhada + Casca (GC) não ocorreu compactação, na condição de Galhada (G) a compactação ocorreu em 10% das amostras e na condição de Solo Sem Resíduo (SR) 50% das amostras foram compactadas o que sugere ser também nesta região, a condição Galhada+Casca (GC), a mais eficiente em minimizar o efeito do tráfego do Forwarder sobre a estrutura do solo.

TABELA 4 Valores médios de umidade e pressão de preconsolidação determinados após as operações do Forwarder trafegando duas e oito vezes em diferentes condições de disposição de resíduos para um Latossolo Vermelho, na profundidade de 10-13 cm na Região São João Evangelista, MG e a classificação da porcentagem de amostras de solo, de acordo com cada região “a”, “b” e “c” do modelo apresentado na Figura 2, sugerido por Dias Junior et al. (2005).

Condições de disposição dos resíduos*								
2 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	U kg kg ⁻¹	σ_p kPa						
a - Compactação	-	-	-	-	-	-	0,38 ⁶	237 ⁶
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,36 ¹	131 ¹	0,38 ²	149 ²	0,36 ⁴	164 ⁴	0,33 ⁷	216 ⁷
c - Sem compactação	0,35 ¹	119 ¹	0,32 ³	124 ³	0,30 ⁵	129 ⁵	-	-
2 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	-----%-----							
a - Compactação	0		0		0		30	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	50		80		90		70	
c - Sem compactação	50		20		10		0	
8 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	U kg kg ⁻¹	σ_p kPa						
a - Compactação	-	-	-	-	0,41 ⁵	250 ⁵	0,39 ¹	280 ¹
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	0,36 ¹	131 ¹	0,37 ⁸	154 ⁸	0,37 ⁴	186 ⁴	0,33 ¹	216 ¹
c - Sem compactação	0,35 ¹	119 ¹	0,34 ⁹	116 ⁹	-	-	-	-
8 passadas do Forwarder								
Região	ST		GC		G		SR	
	-----%-----							
a - Compactação	0		0		10		50	
b - Sem compactação, mas com tendência em compactar	50		95		90		50	
c - Sem compactação	50		5		0		0	

(*) ST = Sem tráfego do Forwarder; GC = Condição de Galhada+Casca; G = Condição de Galhada; SR = Condição Sem Resíduo. 1- médias de 10 amostras; 2- médias de 16 amostras; 3- médias de 4 amostras; 4- médias de 18 amostras; 5- médias de 2 amostras; 6- médias de 6 amostras; 7- médias de 14 amostras; 8- médias de 19 amostras; 9- médias de 1 amostras.

Tanto para o Latossolo Amarelo da Região de Belo Oriente quanto para o Latossolo Vermelho da Região de São João Evangelista, a condição Solo Sem Resíduo (SR) foi aquela na qual ocorreu maior compactação do solo, devido ao tráfego do Forwarder, enquanto que as condições de Galhada+Casca (GC) e Galhada (G), mesmo na condição de tráfego mais intensa (8 passadas), foram as condições mais eficientes na distribuição das pressões aplicadas ao solo pelo Forwarder, o que foi evidenciado pelo menor aumento das pressões de preconsolidação, menor compactação do solo, com conseqüente preservação da sua estrutura devido à presença da camada de resíduo que teve efeito minimizador da compactação do solo nestas regiões, corroborando com os resultados obtidos por Wronski (1990); Keilen (1992); McMahon & Evanson (1994); Seixas et al. (1995) e Seixas et al. (1998).

4 CONCLUSÕES

O número de passadas igual a oito promoveu maior compactação do que o número de passadas igual a duas.

A condição de Solo Sem Resíduo (SR) foi a mais suscetível à compactação e a condição Galhada+Casca (GC) a mais resistente, tanto na região de Belo Oriente quanto na de São João Evangelista.

Os resíduos florestais minimizaram a compactação do solo, causada pelo tráfego do Forwarder.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden III. Risk assessment using a soil water model. **Soil & Tillage & Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 77-87, May 2003.

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 67-78, June 2001.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 377-382. (Agronomy Monograph, 9).

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, xx:xxx-xxx, n. 1, Mar. 2005.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A. D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, xx:xxx-xxx, 2005.

CZYZ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 153-166, Dec. 2004.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: KLUTE, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison, American Society Agronomy, 1986. p. 545-567. (Agronomy Monograph, 9)

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

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 371-380, jul./set. 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas florestais. **CERNE**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, maio/jul. 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, jul./set. 2003.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: FENNER, P. T. **Colheita florestal.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. p. 375-396.

GREGORY, A. S.; WHALLEY, W. R.; WATTS, C. W.; BIRD, N. R. A. HALLETT, P. D.; WHITMORE, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, xx:xxx-xxx, 2005.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 133-142, Sept. 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.

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

ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 3/4, p. 153-161, July 2001.

KEILEN, K. Estudo da alteração pelo trânsito intensivo. In: SEMINARIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7., 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Universidade Federal de Viçosa, 1992. p. 217-220.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: **Methods of soil analysis**. Part I. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-686.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 274-286, Feb. 1991.

MCMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. **LIRO report**, Rotorua, v. 9, n. 1, p. 1-8, 1994.

PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 125-137, Apr. 2004.

RAIJ, B. van; GUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 16 p. (Circular, 63)

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3/4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação de Latossolos. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. **Anais...** Rio de Janeiro, EMBRAPA – SNLCS/SBCS, 1988. p.225-232.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de Forwarder com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p 178-187, ago. 2003.

SEIXAS, F.; MCDONALD, T. P.; STOKES, B. J.; RAPER, R. L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: COFE ANNUAL MEETING, 1995. **Proceedings...** Cashiers: COFE, 1995. p. 77-86.

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

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 87-100, Nov. 2005.

SIIVA, A. R. **Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos impactos causados pelas operações mecanizadas na estrutura de um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros**. 2003. 39 p. Mestrado (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade federal de Lavras, Lavras, MG.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948. 700 p.

WOOD, R. K.; REEDER, R. C.; MORGAN, M. T.; HOLMES, R. G. Soil physics properties as affected grain cart traffic. **Transactions ASAE**, St Joseph, v. 36, n. 1, p. 11-14, Jan./Feb. 1993.

WRONSKI, E. B. Logging trials near Tumut. **Logger**, p. 10-14, 1990.

CAPÍTULO 4

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE LATOSSOLOS EM DIFERENTES MANEJOS FLORESTAIS

RESUMO

SILVA, Arystides Resende. Propriedades físicas e mecânicas de Latossolos em diferentes manejos florestais. In:_____. **Modelagem e quantificação da compactação de latossolos cultivados com eucalipto**. 2006. Cap. 4, p. 53-85. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Com a intensa mecanização das operações florestais, a compactação do solo, causada pelo tráfego, pode ser limitante para a obtenção de maiores produtividades. Os objetivos deste estudo foram: a) avaliar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG; b) avaliar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições de disposição de resíduos nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG. Foram coletadas, nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm, 10 amostras indeformadas na Região de Santa Maria de Itabira onde não houve tráfego e onde houve 2, 4 e 8 passadas do Forwarder e no local onde o Forwarder trafegou 4 vezes com 1/3, 2/3 e 3/3 de sua carga. Nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, 20 amostras indeformadas foram coletadas no local onde ocorreram duas e oito passadas do Forwarder, em quatro condições de disposição dos resíduos, sendo o tráfego realizado: 1) sobre a galhada (G); 2) sobre a galhada mais a casca (GC); 3) sobre o solo sem resíduo (SR) e 4) e uma condição sem tráfego do Forwarder (ST). As amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial, determinando-se a pressão de preconsolidação, densidade do solo, volume total de poros e a densidade do solo na pressão de preconsolidação. Determinou-se também textura, matéria orgânica, densidade de partículas dos solos, capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Todas as intensidades e carga de tráfego do Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira causaram compactação no solo principalmente na profundidade de 10-13 cm, aumentando a densidade do solo e a pressão de preconsolidação. À medida que aumentou para oito o número de passadas do Forwarder, aumentou a compactação do solo, sendo esta minimizada nas condições de resíduo GC e G, nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista. A resistência à penetração

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

determinada com o penetrômetro de impacto não foi sensível para separar o tipo de resíduo florestal.

ABSTRACT

SILVA, Arystides Resende. Physical and mechanical properties of Latosols in different forest management. **In:_____**. **Pattern and quantification from compaction in the Latosols cultivated with eucalypt**. 2006. Chap. 4, p. 53-85. Thesis (Doctorate in Soil and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras. Lavras, Minas Gerais. Brazil.*

With the intense mechanization of the forest operations, the soil compaction, caused by the traffic, may be limiting for larger productivities. The objectives of this study were: a) to evaluate the alterations in the physical and mechanical properties of a Red-Yellow Latosol due to different traffic intensities and load of a Forwarder in the Santa Maria de Itabira region - MG; b) to evaluate the alterations in the physical and mechanical properties of a Yellow Latosol and a Red Latosol due to different traffic intensities of a Forwarder on different residue disposition in the Belo Oriente and São João Evangelista regions in MG State. Undisturbed soil samples were collected at 0-3 and 10-13 cm depths being 10 undisturbed soil samples collected in the Santa Maria de Itabira region where there was no traffic (0 pass) and where the Forwarder trafficked 2, 4 and 8 times and in the place where the Forwarder trafficked 4 times with 1/3, 2/3 and 3/3 of its load. In the Belo Oriente and São João Evangelista regions, 20 undisturbed soils samples were collected at the place where occurred two and eight passes of a Forwarder in four conditions of residues disposition, being the traffic accomplished: 1) on the Brushwood (G); 2) on the Brushwood and bark (GC); 3) on the soil without residue (SR) and 4) and in a condition where there was no traffic of the Forwarder (ST). The undisturbed soil samples were used in the uniaxial compression test determining the preconsolidation pressure, bulk density, total porosity and the bulk density at the preconsolidation pressure. It was also determined the texture, organic matter, the soil particle density, field capacity and permanent wilting point. All the traffic intensities and load of the Forwarder in the Santa Maria de itabira region caused soil compaction mainly at 10-13 cm depth, increasing the soil bulk density and the preconsolidation pressure. As the number of passes of the Forwarder increased to eight the the soil compaction increased being minimized, however, in the residue conditions GC and G in the Belo Oriente and São João Evangelista regions. The resistance to penetration determined with the impact penetrometer, was not sensitive to separate the forest residue type.

* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Fernando Palha Leite (Co-orientador).

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de redução de custos da operação de colheita e mão-de-obra nas últimas décadas tem levado a um aumento na utilização de máquinas. Estas máquinas podem aplicar altas pressões sobre o solo (Horn et al., 2004) principalmente durante a colheita e o baldeio florestal, com conseqüentes modificações nas propriedades físicas do solo, afetando a sua estrutura e resultando na compactação do solo (Czyz, 2004; Dias Junior et al., 2005).

O efeito prejudicial da compactação do solo induzida pelo tráfego de máquinas consiste em mudanças nas propriedades físicas do solo (Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996, Dias Junior et al., 2005), relacionadas com seu espaço poroso, como a porosidade, estrutura, permeabilidade ao ar e água (Hanza & Anderson, 2005), com reflexo no desenvolvimento do sistema radicular (Arvidsson, 2001; Ishaq et al., 2001; Gysi, 2001) e conseqüente perda da sustentabilidade do processo de produção de madeira nestas áreas.

A compreensão e a quantificação dos impactos causados pela compactação têm sido uma constante preocupação dos pesquisadores quando se considera a crescente mecanização associada ao aumento nas capacidades operacionais das máquinas, a intensidade de tráfego nas áreas (Raper, 2005; Hanza & Anderson, 2005) e, principalmente, quando essas operações são realizadas em condições inadequadas de umidades do solo (Dias Junior et al., 2005; Raper, 2005).

A qualidade física do solo tem sido avaliada utilizando diferentes propriedades físicas, tais como a densidade do solo (Beutler, 2004; Silva 2005), a porosidade do solo, a resistência à penetração (Imhoff et al., 2000; Streeck et al., 2004; Silva, 2005) e o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2001). A densidade do solo e o volume total de poros permitem

comparar os efeitos dos sistemas de manejo e por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a resistência à penetração permite identificar as restrições impostas pelo solo ao crescimento das plantas. Já o IHO é um indicador da qualidade da estrutura do solo para o crescimento radicular, visto que integra, num único parâmetro, os três fatores importantes associados ao desenvolvimento das plantas, como a aeração, a umidade e a resistência mecânica do solo (Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2001).

A quantificação da compactação do solo pode ser obtida por meio do ensaio de compressão uniaxial, do qual obtém-se a curva de compressão do solo (Dias Junior & Pirce, 1996) e a partir dela, a pressão de preconsolidação (σ_p) que é uma medida da capacidade de suporte de carga dos solos, e um indicador da sustentabilidade de sua estrutura (Dias Junior & Pierce, 1996; Kondo et al., 1999).

Diversos trabalhos têm utilizado a pressão de preconsolidação como um indicador da sustentabilidade da estrutura do solo (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2005). Assim sendo, o entendimento do comportamento compressivo do solo através das curvas de compressão adquire uma grande importância em razão de serem a base do ponto de vista físico, para a determinação da pressão de preconsolidação.

Diante destas considerações, os objetivos deste estudo foram: a) avaliar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG e b) avaliar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e de um Latossolo Vermelho devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições de disposição de resíduos, nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo devido a diferentes manejos florestais, dois estudos foram conduzidos em áreas experimentais da Celulose Nipo-Brasileira S.A (CENIBRA).

2.1 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG.

Este estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura argilosa, localizado no município de Santa Maria de Itabira, MG, com coordenadas 19°23'11,63"S e 42°54'16,11"W de Greenwich e altitude de 850 metros.

O preparo da área para a realização do estudo consistiu em derrubar as árvores de eucalipto com o uso de motosserra e a retirada da madeira foi feita manualmente. Em seguida, foram demarcadas para cada experimento, parcelas de quatro linhas de árvores, com 26 árvores na linha com espaçamento de 3 x 2 m apresentando uma área total de 624 m², onde dois experimentos foram conduzidos. No primeiro, avaliou-se o efeito da intensidade de tráfego, no qual utilizou o Forwarder autocarregável (marca Valmet, modelo 636 S), pneus 600/55-26.5 com tara de 11,9 t, carregado com 9 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) que trafegou sobre a mesma entrelinha 2, 4 e 8 vezes com uma carga de 3/3 de sua capacidade, o que corresponde a 9 m³ de madeira. No segundo experimento, o Forwarder recebeu cargas correspondentes a: 1/3, 2/3 e 3/3 da carga que corresponde a 3, 6 e 9 m³ de madeira, respectivamente, o qual trafegou quatro vezes na mesma entrelinha.

Para determinar o efeito da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder nas propriedades físicas e mecânicas do solo, foram coletadas no mês de novembro de 2004 na linha de tráfego nas profundidades 0-3 e 10-13 cm após 2, 4 e 8 passadas do Forwarder carregado com 9 m³ de madeira e quando este trafegou quatro vezes com 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9m³) de sua carga e em uma entrelinha onde não houve tráfego, 10 amostras indeformadas em cada tratamento, usando-se um amostrador tipo Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, totalizando 140 amostras [10 amostras x 2 profundidades x 7 tratamentos]. Estas amostras foram parafinadas no campo, para evitar alterações na umidade a partir do momento da coleta até a realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

2.2 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho, devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições de camadas de resíduos nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG.

Este estudo foi realizado em um Latossolo Amarelo (LA), textura argilosa, localizado no município de Belo Oriente, MG, apresentando as coordenadas: 19°18'23"S e 42°25'31"W de Greenwich e altitude de 300 metros e em um Latossolo Vermelho, textura muito argilosa, localizado no município de São João Evangelista, MG, apresentando as coordenadas: 18°34'12"S e 42°52'53"W de Greenwich e altitude de 860 metros.

Foram demarcadas, para as Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, parcelas de 36 m de comprimento e 4 m de largura, o que corresponde à linha de 12 árvores de eucaliptos. A colheita florestal foi realizada manualmente, com o uso de motosserra e o baldeio da madeira foi feito com o Forwarder autocarregável (marca Valmet, modelo 636 S), pneu 600/55 - 26.5 com tara de 11,9 t, carregado com 9 m³ de madeira (densidade de

480 kg m⁻³) que trafegou duas e oito vezes em parcelas distintas nas diferentes condições de uso de resíduo.

Para avaliar o efeito do resíduo e o efeito do número de passadas sobre a pressão de preconsolidação, foram coletadas no mês de janeiro de 2005 na Região de Belo Oriente e no mês de fevereiro de 2005 na Região de São João Evangelista, 20 amostras indeformadas, na linha de tráfego do Forwarder e na profundidade de 10-13 cm (o motivo da amostragem a 10 cm é que, de acordo com estudos anteriores, a esta profundidade foi observada a maior resistência à penetração), após o Forwarder ter trafegado duas e oito vezes nas seguintes condições de disposição dos resíduos: 1) Galhada (G); 2) Galhada mais a Casca (GC); 3) Solo Sem Resíduo (SR) e 4) testemunha local com presença de poucos resíduos aleatórios principalmente folhas, mas Sem o Tráfego do Forwarder (ST), totalizando 320 amostras (20 amostras x 4 condições de resíduos x 2 condições de passadas x 2 regiões). Essas amostras foram coletadas usando-se um amostrador tipo Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, sendo parafinadas no campo para evitar alterações na umidade a partir do momento da coleta até o da realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

No laboratório, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados de acordo com Bowles (1986), modificado por Dias Junior (1994) nas amostras indeformadas coletadas com a umidade na qual as operações com o Forwarder foram realizadas.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado utilizando-se um consolidômetro da marca Boart Longyear, por meio do qual as pressões foram aplicadas utilizando-se ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse atingida (Taylor, 1948) e, após essa condição ser atingida, aplicou-se uma nova pressão.

Após a realização do ensaio de compressão uniaxial, as pressões de preconsolidação (σ_p) foram obtidas na curva de compressão do solo, de acordo com Dias Junior & Pierce (1995).

Nas amostras indeformadas utilizadas para determinar a pressão de preconsolidação, determinou-se também a umidade, a densidade do solo, o volume total de poros de acordo com EMBRAPA (1997) e a densidade do solo na pressão de preconsolidação de acordo com Dias Junior & Pierce (1995) para as Regiões de Santa Maria de Itabira, Belo Oriente e São João Evangelista. Determinou-se também, para os solos da Região de Belo Oriente e São João Evangelista, a resistência à penetração até a profundidade de 60 cm, com o uso de um penetrômetro de impacto (IAA/PLANALSUCAR –STOLF; Stolf et al., 1983).

Os teores de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983), textura (Day, 1986) e densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986), (Tabela 1) foram determinados nas amostras de solo coletadas das porções superiores e inferiores dos anéis da amostragem. Nas amostras indeformadas, também foram determinados a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Klute, 1986) (Tabela 1).

As características químicas dos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Amarelo (LA) e Latossolo Vermelho (LV) foram realizadas com base nos elementos no extrato do ataque sulfúrico segundo EMBRAPA (1997) cujos resultados encontra-se na Tabela 2.

TABELA 1 Características físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) localizado na Região de Santa Maria de Itabira, na profundidade de 0-3 e 10-13 cm, de um Latossolo Amarelo (LA) localizado na Região de Belo Oriente e de um Latossolo Vermelho (LV) localizado na Região de São João Evangelista, na profundidade de 10-13 cm.

Solos	Prof. cm	Argila g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	MO ¹	Dp ¹ g cm ⁻³	Ds ¹	PT ¹ m ³ m ⁻³	CC ¹ kg kg ⁻¹	PMP ¹
LVA	0-3	537	407	56	40	2,50	0,98	0,61	0,30	0,26
	10-13	570	367	63	25	2,56	0,94	0,63	0,31	0,25
LA	10-13	590	343	67	28	2,56	1,15	0,55	0,28	0,23
LV	10-13	747	183	70	61	2,53	0,86	0,66	0,41	0,32

⁽¹⁾ MO = matéria orgânica; Dp = densidade de partículas; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; CC = Capacidade de campo (amostras submetidas à tensão de 10 kPa); PMP = ponto de murcha permanente (amostras submetidas à tensão de 1500 kPa).

TABELA 2 Características químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) localizado na Região de Santa Maria de Itabira, de um Latossolo Amarelo (LA) localizado na Região de Belo Oriente e um Latossolo Vermelho (LV) localizado na Região de São João Evangelista.

Solos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr	Classe mineralógica ¹
g kg ⁻¹						
LVA	71	173	61	0,70	0,57	Oxídico-gibbsítico
LA	245	252	77	1,65	1,38	Caulinítico
LV	123	245	80	0,85	0,71	Oxídico-caulinítico

Ki : relação molecular SiO₂/ Al₂O₃; Kr : relação molecular SiO₂/ (Al₂O₃ + Fe₂O₃). ⁽¹⁾ Embrapa (1997); Resende & Santana (1988).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a diferentes intensidades de tráfego e carga de um Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira, MG.

3.1.1 Efeito da intensidade de tráfego do Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira.

Na profundidade de 0-3 cm, não foi constatado efeito da intensidade de tráfego na Umidade (U), Densidade do solo (Ds) e no volume total de poros (PT), enquanto que, na camada de 10-13 cm, estas propriedades sofreram alterações quando o solo foi submetido ao tráfego do Forwarder, não sendo, entretanto, diferentes para as condições de tráfego (Tabela 3).

Avaliando o efeito da intensidade de tráfego em profundidade, nota-se (Tabela 3) que a U não mostrou diferenças entre as duas profundidades estudadas, enquanto que a Ds apresentou os maiores valores na profundidade de 10-13 cm, exceto onde não houve o tráfego, enquanto que, a PT apresentou os menores valores na profundidade de 10-13cm, indicando que o tráfego alterou a estrutura do solo em profundidade. Estes resultados concordam com os obtidos por Castro Neto (2001), que observou o efeito compactante causado pelo tráfego de um trator agrícola na profundidade 10 a 20 cm e com os obtidos por Silva (2005) segundo o qual a camada compactada localizou-se na profundidade de 5 a 25cm.

TABELA 3 Efeito da intensidade do tráfego de um Forwarder nas propriedades físicas e mecânicas do Latossolo Vermelho Amarelo na Região de Santa Maria de Itabira, nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm.

Camada (cm)	Número de passadas do Forwarder ¹			
	0 passadas ⁺	2 passadas ⁺	4 passadas ⁺	8 passadas ⁺
U (kg kg ⁻¹)				
0 - 3	0,2638 a A	0,2268 a A	0,2373 a A	0,2399 a A
10 - 13	0,2613 a A	0,2308 b A	0,2237 b A	0,2207 b A
Ds (kg dm ⁻³)				
0 - 3	0,98 a A	1,00 a B	0,99 a B	1,00 a B
10 - 13	0,94 b B	1,08 a A	1,14 a A	1,11 a A
PT (m ³ m ⁻³)				
0 - 3	0,6101 a B	0,5982 a A	0,6003 a A	0,5995 a A
10 - 13	0,6335 a A	0,5788 b B	0,5539 b B	0,5680 b A
σ_p (kPa)				
0 - 3	221 c A	295 b B	340 a A	303 b A
10 - 13	228 b A	360 a A	346 a A	334 a A

⁽¹⁾ 0 passadas = sem tráfego do Forwarder; 2 passadas = duas passadas do Forwarder; 4 passadas = quatro passadas do forwarder; 8 passadas = oito passadas do Forwarder. U = Umidade; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; σ_p = pressão de preconsolidação. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto ao número de passadas do Forwarder na mesma profundidade, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto à profundidade no mesmo número de passadas do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (+ Média de 10 repetições por profundidade).

As pressões de preconsolidação (σ_p), da profundidade de 0-3 cm foram diferentes estatisticamente nas diferentes intensidade de tráfego. Observa-se que, para 4 passadas do Forwarder ocorreu o maior valor σ_p , seguidas das condições de 2 e 8 passadas, as quais não diferiram entre si. O menor valor de σ_p ocorreu onde não houve o tráfego, evidenciando que o solo suportou menores pressões no passado do que as aplicadas pelo Forwarder. Já na profundidade de 10-13 cm, não houve diferenças estatísticas entre as condições de intensidade de tráfego, entretanto, estas foram diferentes estatisticamente das σ_p do local onde não

houve tráfego (Tabela 3). Como as σ_p induzidas na profundidade 10-13 cm foram independente do número de passadas e o número de passadas igual a 4 foi o que causou maior compactação na profundidade de 0-3 cm, identifica-se, portanto, o número de passadas igual a 4 como a que mais danos causou à estrutura do solo.

Analisando em profundidade, observou-se diferença estatística na σ_p somente quando o tráfego foi realizado 2 vezes na mesma entrelinha, sendo a profundidade de 10-13 cm a que apresentou o maior valor de σ_p , indicando um efeito mais pronunciado da compactação do solo em profundidade nas primeiras passadas do Forwarder (Tabela 3). Estes resultados corroboram com os obtidos por Fenner (1999) que verificou em um estudo de tráfego controlado, que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem de um trator florestal, e também corroboram com os de Wood et al. (1993), os quais relataram que as repetidas passadas dos rodados aumentam a degradação da estrutura em profundidade.

3.1.2 Efeito da carga de tráfego do Forwarder na Região de Santa Maria de Itabira.

Os parâmetros umidade (U), densidade do solo (Ds) e porosidade total (PT) não apresentaram diferenças significativas em relação ao tráfego do Forwarder com diferentes cargas na profundidade de 0-3 cm (Tabela 4). Na profundidade 10-13 cm, verificou-se que o tráfego do Forwarder com diferentes cargas elevou significativamente os valores da Ds e reduziu significativamente os valores de U e PT em relação aos valores da condição onde não houve o tráfego do Forwarder, não havendo, entretanto, diferenças significativas entre os valores de Ds, U e PT com a utilização de diferentes cargas 1/3 (3 m³), 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³ da carga).

Considerando os efeitos do tráfego do Forwarder com diferentes cargas em profundidade, nota-se que não houve diferença nos valores de U em profundidade, enquanto que os valores da Ds e da PT apresentaram diferenças significativas onde não houve o tráfego e quando o Forwarder trafegou com 2/3 de sua carga, sendo os valores para Ds maiores e os valores da PT menores na profundidade de 10-13 cm (Tabela 4). Sugerindo ser esta a carga crítica para o processo de compactação.

TABELA 4 Efeito da carga de tráfego do Forwarder nas propriedades físicas e mecânicas do Latossolo Vermelho Amarelo na Região de Santa Maria de Itabira, nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm.

Camada (cm)	Carga do Forwarder			
	0 carga ⁺	1/3 carga ⁺	2/3 carga ⁺	3/3 carga ⁺
U (kg kg ⁻¹)				
0 - 3	0,2638 a A	0,2490 a A	0,2475 a A	0,2485 a A
10 - 13	0,2613 a A	0,2263 b A	0,2309 b A	0,2327 b A
Ds (kg dm ⁻³)				
0 - 3	0,98 a A	1,00 a A	1,01 a B	0,99 a A
10 - 13	0,94 b B	1,08 a A	1,13 a A	1,06 a A
PT (m ³ m ⁻³)				
0 - 3	0,6101 a B	0,6006 a A	0,5971 a A	0,6055 a A
10 - 13	0,6335 a A	0,5772 b A	0,5590 b B	0,5850 b A
σ _p (kPa)				
0 - 3	221 b A	312 a A	336 a A	349 a A
10 - 13	228 c A	296 b A	354 a A	335 a A

⁽¹⁾ 0 carga = sem tráfego do Forwarder; 1/3 carga = quatro passadas do Forwarder com 1/3 de sua carga (3 m³); 2/3 carga = quatro passadas do Forwarder com 2/3 de sua carga (6 m³); 3/3 cargas = quatro passadas do Forwarder com 3/3 de sua carga (9 m³). U = Umidade; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; σ_p = pressão de preconsolidação; Dsσ_p= densidade do solo na pressão de preconsolidação. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto à carga do Forwarder na mesma profundidade, pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto à profundidade na mesma carga do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott (p<0,05) (+Médias de 10 repetições por profundidade).

Os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) na profundidade de 0-3 aumentaram significativamente quando o Forwarder trafegou com as diferentes cargas em relação ao local onde não houve o tráfego e não sendo diferentes entre si. Já na profundidade de 10-13 cm, os maiores valores de σ_p ocorreram para cargas de 2/3 (6 m³) e 3/3 (9 m³), sugerindo novamente, ser a carga 2/3 a crítica para o processo de compactação do solo (Tabela 4). Estes resultados corroboram com os de Horn & Lebert (1994), que observaram que a aplicação de cargas dinâmicas no solo pode causar compactação nas diferentes profundidades do solo, dependendo das características da carga externa que está sendo aplicada.

3.2 Avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo e um Latossolo Vermelho, devido a diferentes intensidades de tráfego de um Forwarder sobre diferentes condições de disposição de resíduos nas Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista, MG.

Na Região do Belo Oriente, a utilização de resíduos Galhada+Casca (GC) e Galhada (G) promoveu aumentos significativos na umidade quando o Forwarder trafegou duas e oito vezes, comparado com o local onde não foi utilizado o resíduo (SR) e onde não houve tráfego (ST) (Tabela 5). Com o aumento da intensidade de tráfego para oito vezes, as condições de resíduos foram diferentes, sendo a condição (GC) a que apresentou a maior umidade seguida da condição (G) indicando uma preservação da água do solo nestas condições de resíduos. A umidade do solo nas diferentes condições de resíduos não foi diferente quando aumentou o número de passadas de duas para oito. Na Região de São João Evangelista, entretanto, as umidades (U) não diferiram estatisticamente entre as condições de disposição dos resíduos e nas intensidades de tráfego (Tabela 6), devido, provavelmente, aos maiores teores de argila e matéria orgânica encontrados no LV em relação ao LA, retendo assim maior quantidade de água.

TABELA 5 Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Amarelo da Região de Belo Oriente, MG, na profundidade de 10 - 13 cm, sob diferentes condições de resíduos e intensidades de tráfego.

Nº passadas do Forwarder	Condições de disposição dos resíduos ¹			
	ST ⁺	GC ⁺	G ⁺	SR ⁺
	U (kg kg ⁻¹)			
2 passadas	0,2510 b A	0,2716 a A	0,2684 a A	0,2514 b A
8 passadas	0,2510 c A	0,2717 a A	0,2604 b A	0,2473 c A
	Ds (kg dm ⁻³)			
2 passadas	1,15 c A	1,22 b B	1,23 b B	1,29 a B
8 passadas	1,15 c A	1,26 b A	1,28 b A	1,34 a A
	PT (m ³ m ⁻³)			
2 passadas	0,5523 a A	0,5262 b A	0,5203 b A	0,4942 c A
8 passadas	0,5523 a A	0,5064 b B	0,5006 b B	0,4789 c B
	σ _p (kPa)			
2 passadas	125 c A	205 b B	210 b B	264 a B
8 passadas	125 d A	228 c A	264 b A	314 a A

⁽¹⁾ Condições de disposição dos resíduos: ST = sem tráfego do forwarder; GC = uso da Galhada + Casca; G = uso somente da galhada; SR = Solo Sem Resíduo. U = Umidade; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; σ_p = pressão de preconsolidação. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto à condição de disposição do resíduo no mesmo número de passadas do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto ao número de passadas do Forwarder na mesma condição de disposição dos resíduos, pelo teste de Scott-Knott (p<0,05) (+Médias de 20 repetições).

A densidade do solo (Ds) foi influenciada pelas condições de disposição dos resíduos nas duas regiões, enquanto que a intensidade de tráfego alterou significativamente os valores de Ds somente na Região do Rio Doce (Tabela 5 e 6). Dessa forma, nota-se que a ausência de tráfego e a presença de resíduos apresentaram, em ambas as regiões, valores de densidades do solo estatisticamente inferiores aos valores encontrados na condição sem a presença dos resíduos (SR), sugerindo preservação da estrutura do solo devido à

dissipação das pressões aplicadas pelos resíduos. Em uma mesma condição de resíduo, à medida que o número de passadas do Forwarder aumentou para oito (Tabela 5 e 6), houve um aumento significativo nos valores das densidades do solo somente na região do Belo Oriente, sugerindo ser o Latossolo Amarelo desta região mais susceptível à compactação do que o Latossolo Vermelho da Região de São João Evangelista. Esses resultados corroboram com os de Way et al. (1995) que verificaram aumentos significativos da densidade do solo na linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de passadas dos equipamentos.

A porosidade total (PT) teve comportamento inverso ao da densidade do solo nos tratamentos avaliados (Tabela 5 e 6), corroborando com observações anteriores de que a compactação do solo intensificou-se mais com a realização do tráfego em condições de Solo Sem Resíduo (SR).

TABELA 6 Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho da Região de São João Evangelista, MG na profundidade de 10-13 cm, sob diferentes condições de resíduos e intensidade de tráfego.

Nº passadas do Forwarder	Condições de disposição dos resíduos ¹			
	ST ⁺	GC ⁺	G ⁺	SR ⁺
	U (kg kg ⁻¹)			
2 passadas	0,3548 a A	0,3721 a A	0,3553 a A	0,3419 a A
8 passadas	0,3548 a A	0,3642 a A	0,3769 a A	0,3563 a A
	Ds (kg dm ⁻³)			
2 passadas	0,86 c A	0,96 b A	0,96 b A	1,05 a A
8 passadas	0,86 c A	0,96 b A	0,98 b A	1,02 a A
	PT (m ³ m ⁻³)			
2 passadas	0,6585 a A	0,6218 b A	0,6201 b A	0,5872 c A
8 passadas	0,6585 a A	0,6204 b A	0,6131 b A	0,5959 c A
	σ_p (kPa)			
2 passadas	125 d A	144 c A	161 b B	222 a B
8 passadas	125 d A	152 c A	192 b A	248 a A

⁽¹⁾ Condições de disposição dos resíduos: ST = sem tráfego do Forwarder; GC = uso da Galhada + Casca; G = uso somente da galhada; SR = toda galhada foi retirada deixando o solo limpo sem resíduo. U = Umidade; Ds = densidade do solo; PT = volume total de poros; σ_p = pressão de preconsolidação. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto à condição de disposição do resíduo no mesmo número de passadas do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto ao número de passadas do Forwarder na mesma condição de disposição dos resíduos, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (+Médias de 20 repetições).

As pressões de preconsolidação (σ_p) aumentaram significativamente quando o tráfego foi realizado em condição de Solo Sem Resíduo (SR) em ambas as regiões (Tabela 5 e 6), sendo esta condição a mais crítica, apresentando os maiores valores de σ_p , enquanto que nas condições GC e G para duas passadas não diferiram estatisticamente na Região de Belo Oriente. Tanto na Região do Belo Oriente para oito passadas, quanto na Região de São João

Evangelista para duas e oito passadas, a condição GC foi a que apresentou menores valores de σ_p induzidas pelo tráfego (Tabela 5 e 6). Os menores valores da σ_p encontrados nas condições de GC e G indicam uma distribuição das pressões aplicadas pelo Forwarder pelos resíduos, resultando em menores σ_p induzidas aos solos, sugerindo que as operações florestais sejam realizadas sobre os resíduos, visando minimizar os efeitos da compactação do solo. Estes resultados concordam com os obtidos por Wronski (1990); McMahon & Evanson (1994); Seixas et al. (1995); Seixas et al. (1998) os quais detectaram reduções significativas da compactação do solo devido ao tráfego realizado sobre camadas de resíduos.

Analisando o número de passadas em relação a cada condição (Tabela 5 e 6), observa-se que à medida que a intensidade de tráfego aumentou para oito passadas, houve um aumento significativo nos valores de σ_p nas condições de GC, G e SR exceto na Região de São João Evangelista, para a condição GC. Estes resultados indicam a importância de se manter os resíduos florestais sobre o solo. Respostas semelhantes foram encontradas por Wood et al. (1993), Silva (2003) e Czyz (2004), que verificaram que o número crescente de passadas aumenta a compactação do solo.

A σ_p divide a curva de compressão em duas regiões, sendo uma onde as deformações são elásticas e recuperáveis, chamada de curva de compressão secundária, e uma onde as deformações são plásticas e não recuperáveis, chamada de curva de compressão virgem, na qual ocorre a compactação adicional do solo (Holtz e Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1995). Considerando a necessidade de se determinar o valor de D_s acima do qual o solo está compactado, sugere-se que este valor seja determinado pelo valor da D_s na σ_p ($D_s\sigma_p$).

Independente da intensidade de tráfego e carga do Forwarder e da profundidade do Latossolo Vermelho-Amarelo do município de Santa Maria de Itabira, os valores percentuais do aumento da $Ds\sigma_p$ foram praticamente constantes e, em média menores e iguais a 7% (Tabela 7). Já nas diferentes condições de disposição de resíduos, o Latossolo Vermelho do município de São João Evangelista, tanto para as intensidade de duas e oito passadas do Forwarder quanto para o Latossolo Amarelo do município de Belo Oriente, na intensidade de oito passadas do Forwarder, os valores percentuais do aumento da $Ds\sigma_p$ foram constantes e iguais a 7%. Já para o Latossolo Amarelo, na intensidade de tráfego igual a duas passadas do Forwarder, esse valor foi igual a 10% (Tabela 7). Estes são valores máximos que podem ser acrescidos na Ds , se o mesmo for trabalhado na pressão de preconsolidação, o que confirma as pequenas deformações, elásticas e recuperáveis que ocorrem na curva de compressão secundária. Se esse solo for trabalhado com uma pressão superior a pressão de preconsolidação ou seja, ultrapassarem a $Ds\sigma_p$ ocorrerão deformações plásticas e não recuperáveis ocasionando em compactação adicional desses solo (Holtz e Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1995).

Para os locais estudados, nas diferentes intensidades de tráfego e carga do Forwarder, sugere-se que o valor da densidade do solo acima do qual o solo apresenta compactação adicional seja determinado como a seguir: 1) para as Regiões de Santa Maria de Itabira, São João Evangelista e Belo Oriente, na intensidade de tráfego igual a oito passadas $Ds\sigma_p = 1,07 \times Dsi$; 2) para a Região do Belo Oriente, na intensidade de tráfego igual a duas passadas $Ds\sigma_p = 1,10 \times Dsi$ (Tabela 7).

TABELA 7 Valores de Densidade do solo, Densidade do solo na pressão de preconsolidação e a variação dessas densidades de um Latossolo Vermelho-Amarelo, da Região de Santa Maria de Itabira de um Latossolo Amarelo da Região de Belo Oriente e de um Latossolo Vermelho na Região de São João Evangelista.

Região de Santa Maria de Itabira, MG										
Número de passadas do Forwarder⁺										
	2 passadas			4 passadas			8 passadas			Média
Prof. (cm)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Δ (%)
0-3	1,00	1,07	7	0,99	1,08	9	1,00	1,07	7	8
10-13	1,08	1,15	7	1,14	1,21	6	1,11	1,19	7	7
Carga do Forwarder⁺										
	1/3 carga			2/3 carga			3/3 carga			Média
Prof. (cm)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Δ (%)
0-3	1,00	1,07	7	1,01	1,08	7	0,99	1,06	7	7
10-13	1,08	1,15	7	1,13	1,19	5	1,06	1,13	7	6
Região de Belo Oriente, MG										
Condições de disposição dos resíduos¹⁺⁺										
	GC			G			SR			Média
Intensidade de tráfego	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Δ (%)
2 passadas	1,22	1,36	11	1,23	1,36	11	1,29	1,39	8	10
8 passadas	1,26	1,39	10	1,28	1,37	7	1,34	1,41	5	7
Região de São João Evangelista, MG										
Condições de disposição dos resíduos¹⁺⁺										
	GC			G			SR			Média
Intensidade de tráfego	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Dsi (kg dm ⁻³)	Dsσ _p (kg dm ⁻³)	Δ (%)	Δ (%)
2 passadas	0,96	1,03	7	0,96	1,02	6	1,05	1,14	9	7
8 passadas	0,96	1,04	8	0,98	1,03	5	1,02	1,11	9	7

⁽¹⁾ Condições de disposição dos resíduos: GC = uso da Galhada + Casca; G = uso somente da galhada; SR = Solo Sem Resíduo. Dsi = Densidade do solo inicial; Dsσ_p = Densidade do solo na pressão de preconsolidação; Δ = Variação da densidade do solo (+ Médias de 10 repetições) (++ Média de 20 repetições).

3.2.1 Resistência à penetração

As medidas da resistência à penetração do solo (RP) das Regiões de Belo Oriente e São João Evangelista foram sensíveis ao tráfego do Forwarder. Verifica-se que, quando este foi realizado na condição de solo Sem Resíduo (SR) (Figura 1), a resistência à penetração do solo para o número de passadas igual a 2 foi superior e diferiu significativamente das condições GC, G e ST, as quais não apresentaram diferenças estatísticas entre si, até a profundidade de 30 cm (Tabela 8 e 9). A partir dessa profundidade, todas as condições não diferiram significativamente quando o Forwarder trafegou na região de Belo Oriente (Figura 1), enquanto que na Região de São João Evangelista, a condição de SR diferiu significativamente até a profundidade de 60 cm (Figura 1c). Para o número de passadas igual a oito vezes, a condição SR diferiu significativamente das outras condições até a profundidade de 60 cm para a Região de Belo Oriente e São João Evangelista (Figura 1b e 1d). Estes resultados indicam que na Região de Belo Oriente, o manejo dos resíduos reduziram a RP até a profundidade de 30 cm, para o número de passadas igual a 2. Para o número de passadas igual a oito, esta redução ocorreu até a profundidade de 45 cm e, para profundidades maiores do que esta, não foi observado um comportamento uniforme do efeito dos resíduos sobre a RP (Tabela 8).

Já na Região de São João Evangelista, em geral, não houve diferença no comportamento da RP, em função do manejo dos resíduos, prevalecendo, entretanto, a maior RP na condição Sem Resíduo (SR) (Tabela 9). Portanto, tanto na região de Belo Oriente quanto na de São João Evangelista a pior situação foi a de solo Sem Resíduo (SR), apresentando as maiores RP.

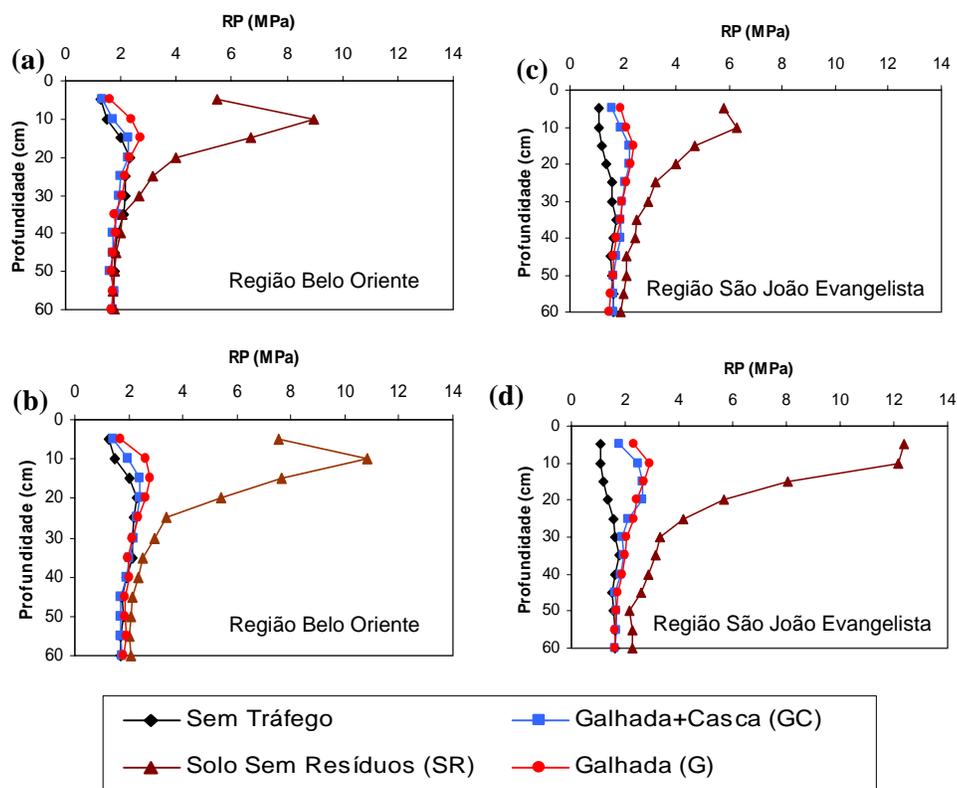


FIGURA 1 Resistência à penetração (RP) em MPa do solo em profundidade em diferentes condições de disposição de resíduos florestais: (a) Região de Belo Oriente, com duas passadas do Forwarder; (b) Região de Belo Oriente, com oito passadas do Forwarder; (c) Região de São João Evangelista, com duas passadas do Forwarder; (d) Região de São João Evangelista, com oito passadas do Forwarder (Médias de 12 repetições)

TABELA 8 Resistência à penetração (MPa) de um Latossolo Amarelo localizado na Região de Belo Oriente, MG.

Camada (cm)	Nº passadas Forwarder	Condições de disposição dos resíduos ¹			
		ST ⁺	GC ⁺	G ⁺	SR ⁺
0-5	2	1,25 bA	1,35 bA	1,58 bA	5,50 aA
	8	1,25 bA	1,41 bA	1,70 bA	7,53 aA
5-10	2	1,48 bA	1,74 bA	2,39 bA	8,94 aA
	8	1,48 bA	1,95 bA	2,61 bA	10,85 aA
10-15	2	2,01 bA	2,26 bA	2,73 bA	6,69 aA
	8	2,01 bA	2,39 bA	2,80 bA	7,64 aA
15-20	2	2,32 bA	2,25 bA	2,32 bB	3,96 aB
	8	2,32 bA	2,42 bA	2,62 bA	5,39 aA
20-25	2	2,17 bA	1,99 bA	2,14 bA	3,15 aA
	8	2,17 bA	2,27 bA	2,37 bA	3,38 aA
25-30	2	2,15 bA	1,96 bA	2,05 bA	2,63 aB
	8	2,15 bA	2,17 bA	2,13 bA	2,98 aA
30-35	2	2,12 aA	1,86 aA	1,79 aA	2,07 aB
	8	2,12 bA	2,01 bA	1,99 bA	2,52 aA
35-40	2	1,91 aA	1,70 aA	1,84 aA	1,98 aB
	8	1,91 bA	1,90 bA	2,00 bA	2,38 aA
40-45	2	1,76 aA	1,69 aA	1,70 aA	1,83 aB
	8	1,76 bA	1,71 bA	1,86 bA	2,14 aA
45-50	2	1,78 aA	1,62 aA	1,67 aA	1,76 aB
	8	1,78 aA	1,69 aA	1,87 aA	2,09 aA
50-55	2	1,71 aA	1,77 aA	1,70 aA	1,72 aB
	8	1,71 bA	1,70 bA	1,90 aA	2,03 aA
55-60	2	1,72 aA	1,70 aA	1,66 aA	1,80 aA
	8	1,72 bA	1,73 bA	1,83 bA	2,10 aA

⁽¹⁾ Condições de disposição dos resíduos: ST = sem tráfego do Forwarder; GC = uso da Galhada + Casca; G = uso somente da galhada; SR = toda galhada foi retirada deixando o solo limpo sem resíduo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto à condição de disposição do resíduo no mesmo número de passadas do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto ao número de passadas do Forwarder na mesma condição de disposição dos resíduos para cada profundidade, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (+ Médias de 12 repetições).

TABELA 9 Resistência à penetração (MPa) de um Latossolo Vermelho localizado na Região de São João Evangelista, MG.

Camada (cm)	Nº passadas Forwarder	Condições de disposição dos resíduos ¹			
		ST ⁺	GC ⁺	G ⁺	SR ⁺
0-5	2	1,07 cA	1,59 bB	1,92 bA	5,80 aB
	8	1,07 bA	1,79 bA	2,30 bA	12,37 aA
5-10	2	1,08 bA	1,94 bB	2,15 bB	6,31 aB
	8	1,08 bA	2,51 bA	2,94 bA	12,15 aA
10-15	2	1,22 cA	2,22 bB	2,39 bA	4,68 aB
	8	1,22 bA	2,64 bA	2,68 bA	8,04 aA
15-20	2	1,37 cA	2,25 bA	2,32 bA	4,01 aB
	8	1,37 cA	2,63 bA	2,45 bA	5,69 aA
20-25	2	1,57 cA	2,07 bA	2,10 bA	3,21 aA
	8	1,57 bA	2,12 bA	2,34 bA	4,16 aA
25-30	2	1,61 bA	1,98 bA	1,96 bA	2,96 aA
	8	1,61 bA	1,87 bA	2,08 bA	3,28 aA
30-35	2	1,77 bA	1,90 bA	1,91 bA	2,54 aB
	8	1,77 bA	1,94 bA	2,02 bA	3,11 aA
35-40	2	1,64 bA	1,93 bA	1,73 bA	2,46 aA
	8	1,64 bA	1,85 bA	1,87 bA	2,85 aA
40-45	2	1,51 bA	1,76 bA	1,64 bA	2,16 aB
	8	1,51 bA	1,63 bA	1,71 bA	2,57 aA
45-50	2	1,57 bA	1,66 bA	1,65 bA	2,13 aA
	8	1,57 bA	1,68 bA	1,69 bA	2,18 aA
50-55	2	1,64 bA	1,64 bA	1,52 bA	2,02 aA
	8	1,64 bA	1,67 bA	1,64 bA	2,25 aA
55-60	2	1,63 bA	1,64 bA	1,46 bA	1,93 aA
	8	1,63 bA	1,63 bA	1,60 bA	2,29 aA

⁽¹⁾ Condições de disposição dos resíduos: ST = sem tráfego do Forwarder; GC = uso da Galhada + Casca; G = uso somente da galhada; SR = toda galhada foi retirada deixando o solo limpo sem resíduo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto à condição de disposição do resíduo no mesmo número de passadas do Forwarder, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, quanto ao número de passadas do Forwarder na mesma condição de disposição dos resíduos para cada profundidade, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (+ Médias de 12 repetições).

Em uma mesma profundidade, as intensidades de tráfego nas condições de resíduos ST, GC e G não apresentaram diferenças significativas para os valores de RP até a profundidade de 60 cm, na Região de Belo Oriente (Tabela 8) e nas condições de ST e G, para a Região de São João Evangelista (Tabela 9), indicando que o número de passadas igual a 2 já foi suficiente para induzir ao solo altos valores de RP. Na Região de São João Evangelista, entretanto, observou-se um alívio das RP induzidas pelo número de passadas igual a 2, o qual resultou em menores RP até a profundidade de 15 cm, devido à distribuição das pressões aplicadas pelo Forwarder pela Galhada+Casca (GC).

Na Região de Belo Oriente e na condição de solo Sem Resíduo (SR), observou-se uma camada de maior RP até a profundidade de 15 cm. Para profundidades maiores, o número de passadas igual a oito, em geral, induziu maiores valores de RP do que o número de passadas igual a 2, promovendo uma maior compactação em profundidade.

Na Região de São João Evangelista e na condição de solo Sem Resíduos (SR), o número de passadas igual a oito induziu a uma maior RP do que o número de passadas igual a 2 até 20 cm de profundidade e, a partir desta as RP induzidas não apresentaram um comportamento uniforme.

Assim sendo, não ficou clara a sensibilidade do penetrômetro de impacto para separar o tipo de resíduos florestais na quantificação dos efeitos do tráfego do Forwarder.

4 CONCLUSÕES

O tráfego do Forwarder causou compactação do solo nas três Regiões estudadas.

A compactação do solo aumentou com o aumento da intensidade de tráfego.

As condições de GC e G tiveram efeito minimizador na compactação do solo na Região de Belo Oriente e São João Evangelista, MG.

A RP determinada com o penetrômetro de impacto não foi sensível para separar o tipo de resíduos florestais na quantificação dos efeitos do tráfego do Forwarder.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 67-78, June 2001.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 377-382. (Agronomy Monograph, 9).

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 626-631, Nov./Dec. 2004.

BOWLES, J. E. **Engieneering properties of soils and their measurements**. 3. ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CZYZ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 153-166, Dec. 2004.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: KLUTE, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 545-567. (Agronomy Monograph, 9)

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 371-380, jul./set. 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas florestais. **CERNE**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, maio/jun. 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, jul./set. 2003.

EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira.** 1999. 135 p. Tese (Livre Docência) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 133-142, Sept. 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 207-219, Dec. 2004.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B. D.; van OUWEKERK, C. (Ed). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69. *Developments in Agricultural Engineering*, v. 11.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.

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

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENTA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, jul. 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENTA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil & Tillage Research**, v. 60, n. 3/4, p. 153-161, July 2001.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: **Methods of soil analysis**. Part 1. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-686.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 274-286, Feb. 1991.

MCMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. **LIRO report**, Rotorua, v. 9, n. 1, p. 1-8, 1994.

RAIJ, B. van; GUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 16 p. (Circular, 63)

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3/4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação de Latossolos. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. **Anais...** Rio de Janeiro, EMBRAPA – SNLCS/SBCS, 1988. p.225-232.

SEIXAS, F.; MCDONALD, T. P.; STOKES, B. J.; RAPER, R. L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: COFE ANNUAL MEETING, 1995. **Proceedings...** Cashiers: COFE, 1995. p. 77-86.

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERPECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, A. R. **Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos impactos causados pelas operações mecanizadas na estrutura de um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros**. 2003. 39 p. Mestrado (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade federal de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, S. R. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto**. 2005. 97p. Doutorado (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI Neto, V. L. **Recomendações para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR – STOLF**. Série Penetrômetro de Impacto, p. 1-9. 1983. (Boletim Técnico, 1).

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificação em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948. 700 p.

WAY, T. R.; BAILEY, A. C.; RAPER, R. L.; BURT, E. C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **Transactions ASAE**, St Joseph, v. 38, n. 3, p. 669-679, May/June 1995.

WOOD, R. K.; REEDER, R. C.; MORGAN, M. T.; HOLMES, R. G. Soil physics properties as affected grain cart traffic. **Transactions ASAE**, St Joseph, v. 36, n. 1, p. 11-14, Jan./Feb. 1993.

WRONSKI, E. B. Logging trials near Tumut. **Logger**, p. 10-14, 1990.