

**COMPRESSIBILIDADE E RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE UM LATOSSOLO
CULTIVADO COM EUCALIPTO**

AYESKA HÜBNER BRAGA NUNES

2010

AYESKA HÜBNER BRAGA NUNES

**COMPRESSIBILIDADE E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
UM LATOSSOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Moacir de Souza Dias Junior

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

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

Nunes, Ayeska Hubner Braga.

Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um
Latossolo cultivado com eucalipto / Ayeska Hubner Braga Nunes. –
Lavras : UFLA, 2010.

70 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Bibliografia.

1. Compactação do solo. 2. Pressão de pré-consolidação. 3.
Colheita mecanizada. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.45

AYESKA HÜBNER BRAGA NUNES

**COMPRESSIBILIDADE E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
UM LATOSSOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 12 de fevereiro de 2010

Prof. Dr. Wellington Willian Rocha

UFVJM

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira

UFLA

Moacir de Souza Dias Junior
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

*A minha mãe, Margarete, que me ensinou a ler.
Ao meu pai, Irton, que me ensinou a gostar da terra.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todas as forças superiores que me guiam e me inspiram a seguir neste caminho.

Ao meu irmão Patrick, pela amizade eterna e exemplo de como viver a vida levemente.

Ao Thiago, pelo amor, amizade, companheirismo, paciência e dedicação em me ajudar sempre.

Aos meus grandes e inesquecíveis amigos Eduardo Severiano, Anna Hoffmann, Carla Carducci e Piero Iori, por me engrandecerem nesses anos de convívio, por meio das longas conversas, ensinamentos, conselhos, risadas, lágrimas e sonhos compartilhados.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade da realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Moacir de Souza Dias Junior, pela amizade, confiança e orientação.

Ao professor Wellington Willian Rocha, pela amizade, coorientação e participação na banca examinadora.

Ao professor Geraldo Cesar de Oliveira, pelos conselhos e pela participação na banca examinadora.

À empresa ArcelorMittal Jequitinhonha, pela oportunidade para realização do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, César, Bruno, Paula, Vico, Gabriela, Mayesse, Letúcia, Karine, Milson, Plínio, Luíz Gustavo, Maurício, Karina e Vitória, por fazerem o meu dia a dia mais agradável.

A todos os professores do DCS, pela participação na minha formação no mestrado.

A todos os funcionários do Departamento de Ciência do Solo, especialmente a Daniela, Dulce e Pezão, e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1: Compactação e resistência ao cisalhamento em solos florestais.....	1
1 Introdução geral.....	2
2 Referencial teórico.....	4
2.1 A cultura do eucalipto no Brasil.....	4
2.2 Colheita florestal.....	5
2.3 Alterações estruturais em solos cultivados com eucalipto.....	7
2.4 Comportamento compressivo de solos florestais.....	9
2.5 Resistência ao cisalhamento de solos florestais.....	14
3. Referências bibliográficas.....	19
CAPÍTULO 2: Análise dos impactos causados pelas operações de colheita mecanizada de eucalipto através dos modelos de capacidade de suporte de carga.....	25
Resumo.....	26
Abstract.....	27
1 Introdução.....	28
2 Material e métodos.....	30
3 Resultados e discussão.....	34
4 Conclusões.....	46

5 Referências bibliográficas.....	47
CAPÍTULO 3: Análise dos impactos causados pelas operações de colheita florestal mecanizada de eucalipto por meio dos modelos de resistência ao cisalhamento.....	50
Resumo.....	51
Abstract.....	52
1 Introdução.....	53
2 Material e métodos.....	55
3 Resultados e discussão.....	59
4 Conclusões.....	68
5 Referências bibliográficas.....	69

RESUMO GERAL

NUNES, Ayeska Hübner Braga. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo cultivado com eucalipto**. 2010. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras¹.

O eucalipto tem sido a principal opção para reflorestamento, levando à expansão, em termos geográficos, do cultivo dessa espécie no Brasil. Essa expansão vem sendo acompanhada pela adoção de novas tecnologias de cultivo, entre elas a mecanização das operações de colheita. As operações mecanizadas realizadas de maneira inadequada promovem um impacto adverso no ambiente, com consequências na qualidade estrutural do solo, na qualidade da água, na biodiversidade e na redução da capacidade produtiva, tornando-se necessário um planejamento que maximize a produção e minimize o impacto negativo ao ambiente solo-água-planta-atmosfera. Este estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do Latossolo Vermelho-Amarelo, por meio dos modelos de capacidade de suporte de carga e de resistência ao cisalhamento do solo. O estudo foi realizado em florestas de *Eucalyptus* spp, em áreas da empresa ArcelorMittal Energética – Jequitinhonha, no município de Itamarandiba, MG. Foram coletadas amostras deformadas de solo para caracterizações físicas e químicas do solo, teores de matéria orgânica e limites de consistência, além de amostras indeformadas para a realização dos ensaios de compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Três tratamentos foram avaliados: FE) faixa ecológica, há 15 anos sem sofrer tráfego de máquinas; F) colheita feita por feller-buncher de disco; FS) colheita feita por feller-buncher de disco e baldeio da madeira, feito por skidder. De acordo com os resultados de compressibilidade e resistência ao cisalhamento, a operação de colheita do eucalipto realizada pelo feller-buncher e baldeio feito pelo skidder se apresentou como sendo a mais impactante para a estrutura do solo.

¹ Comitê de orientação: Prof. Moacir de Souza Dias Junior – DCS/UFLA (orientador), Wellington Willian Rocha (UFVJM)

GENERAL ABSTRACT

NUNES, Ayeska Hübner Braga. **Compressibility and shear strength of a Latosol cultivated with Eucalyptus**. 2010. 70 p. Dissertation (Master Science in Soil Science) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

Eucalyptus has been the main option for reforestation, leading to the geographical expansion of cultivation of this species in Brazil. This expansion has been accompanied by the adoption of new farming technologies, including the mechanization of the harvesting operations. The mechanized operations performed inadequately promote an adverse impact on the environment, with consequences for the soil structural quality, water quality, biodiversity and reduction of production capacity, thus requiring a plan that will maximize production and minimize the negative impact to the environment soil-water-plant-atmosphere. This study aimed to determine which forest harvest operation promotes greater deterioration of the Latosol structure through the bearing capacity and the shear strength models of the soil. The study was conducted in an *Eucalyptus* spp forests in the ArcelorMittal Energy Company areas - Jequitinhonha in the Itamarandiba, County, MG. Disturbed soil samples were collected for physical and chemical characterization of soil organic matter content and consistency limits, and undisturbed soil samples for uniaxial compression and shear strength tests. Three treatments were evaluated: FE) ecological strip for 15 years without suffering machinery traffic; F) harvest done by feller-buncher with disk; FS) harvest done by feller-buncher with disk and transportation of the wood made by skidder. According to the results of compressibility and shear strength, the harvest operation of the eucalyptus conducted by feller-buncher and transportation made by skidder, was the one that more impacted soil structure.

¹ Guidance committee: Prof. Moacir de Souza Dias Junior – DCS/UFLA (adviser), Wellington Willian Rocha (UFVJM)

CAPÍTULO 1

COMPACTAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS FLORESTAIS

1 INTRODUÇÃO GERAL

A matriz energética com base em combustíveis fósseis é insegura, cara e tem como agravante ser deletéria ao meio ambiente. Fontes alternativas, ecologicamente viáveis, têm sido buscadas e, entre elas, inclui-se a madeira, que apresenta ampla versatilidade de usos.

Florestas plantadas, graças ao seu alto potencial renovável e produtivo, especialmente no caso brasileiro, expressam um modelo energético, ambientalmente mais saudável e socialmente mais justo, sendo uma das fontes de energia que possibilitam uma das maiores taxas de geração de emprego por recurso monetário investido (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, 2008).

O eucalipto tem sido a principal opção para reflorestamento, em virtude de seu crescimento acelerado, vigor, precocidade e adaptação a diferentes habitats, levando à expansão, em termos geográficos, do cultivo dessa espécie no Brasil. Por sua vez, essa expansão vem sendo acompanhada pela adoção de novas tecnologias de cultivo, entre elas a mecanização das operações de colheita do eucalipto.

As operações mecanizadas realizadas de maneira inadequada promovem um impacto adverso no ambiente, com consequências na qualidade estrutural do solo, na qualidade da água e na biodiversidade, além da redução da capacidade produtiva. Torna-se, assim, necessário um planejamento global com esforço coordenado para se encontrar estratégias de manejo que maximizem a produção e minimizem o impacto negativo ao ambiente solo-água-planta-atmosfera.

Diante disso, em áreas aptas à mecanização, o uso indiscriminado dos diferentes sistemas de manejo, principalmente sistemas mecanizados, está se tornando preocupante, devido à possibilidade da disseminação da compactação do solo (Flowers & Lal, 1998; Alakukku et al., 2003).

Dessa forma, este estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do Latossolo Vermelho-Amarelo, por meio dos modelos de capacidade de suporte de carga e dos modelos de resistência ao cisalhamento do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do eucalipto no Brasil

O grande gênero *Eucalyptus* (L'Herit) tem mais de seiscentas espécies, ocorrendo de 7° até 43°36' de latitude sul. Cerca de vinte espécies são plantadas em larga escala no mundo (Lima, 1996), nas mais distintas condições ambientais, com amplas variações latitudinais, indo do clima temperado até o semiárido e com posicionamentos altimétricos muito variáveis.

O eucalipto é nativo da Austrália e o seu plantio foi introduzido no Brasil a partir da década de 1960, estimulado, principalmente, pela concessão de incentivos fiscais, dando início ao cultivo em larga escala dessa cultura no país.

O Brasil, portanto, destaca-se como uma das nações que mais produzem e exportam produtos de base florestal no mundo. Minas Gerais é o estado brasileiro que mais consome madeira e também é o maior reflorestador. O estado é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do Brasil, em torno de 25,2 milhões de metros cúbicos de madeira, o equivalente a 66% do consumo total de carvão vegetal produzido no país (Brasil, 2008).

O desenvolvimento do eucalipto no Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais, teve início nos anos 1970, com a criação do Distrito Florestal do Vale do Jequitinhonha, o qual contou com incentivos do governo estadual para a implantação de florestas, principalmente de eucalipto, para o fornecimento de energia ao parque guseiro do estado. Nessa época, consumia-se, em Minas Gerais, majoritariamente, carvão vegetal, oriundo do desmatamento de florestas nativas. No ano de 1983, o Distrito Florestal do Vale do Jequitinhonha contava com 435.000 ha de reflorestamentos (Brasil, 2008).

Inserido num contexto global, que afeta sobremaneira o balanço comercial das receitas brasileiras, o setor florestal passou por momentos de

grandes inovações e avanços tecnológicos, sendo os mesmos absorvidos pelas empresas e produtores do setor.

2.2 Colheita florestal

A mecanização dos processos de colheita e transporte florestal intensificou-se no Brasil a partir do início da década de 1990, com a abertura do mercado interno à importação de máquinas e equipamentos já desenvolvidos e aprimorados em países com maior tradição na colheita florestal. Desde então, esse processo vem se mostrando irreversível no Brasil, principalmente em função da redução do custo final da madeira e da necessidade, por parte das indústrias, de um fornecimento regular e em quantidades cada vez maiores de madeira (Machado, 2008).

Na maioria dos empreendimentos florestais, as operações vinculadas à colheita são consideradas as mais dispendiosas de todo o processo de produção florestal (Vieira, 2004). Essa afirmação está embasada, principalmente, em aspectos econômicos, visto que de 60% a 70%, aproximadamente, do custo de produção da madeira se deve à colheita e transporte florestal (Andrade, 1998; Machado, 2008).

Dentre essas operações mecanizadas, destaca-se a colheita florestal, a qual pode ser definida, de acordo com Machado (2008), como um conjunto de atividades efetuadas em um determinado povoamento florestal, visando preparar e extrair a madeira até o local de transporte, utilizando-se técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final. Especificamente, a colheita pode ser considerada como a parte mais importante do processo florestal, do ponto de vista técnico-econômico, sendo composta, principalmente, pelas etapas de corte, derrubada, desgalhamento, traçamento, descascamento e extração.

A etapa de corte, como já definido anteriormente, é a primeira a ser realizada na operação de colheita, tendo grande importância e influência nas etapas subsequentes. Em seguida, se destaca a etapa de extração, a qual se refere à movimentação da madeira desde o local de corte até a estrada, carreador ou pátio intermediário. Existem vários sinônimos dessa atividade, muitas vezes em função do modo como ela é realizada ou do tipo de equipamento utilizado. Os mais comuns são: baldeio, caracterizado por carregar a madeira apoiada em uma plataforma e arraste, caracterizado por carregar a madeira apoiada, parcialmente ou totalmente, sobre o solo (Machado, 2008).

O sistema de colheita de madeira compreende um conjunto de elementos e processos que envolvem a cadeia de produção e todas as suas atividades parciais. A escolha e a configuração de um sistema podem variar de acordo com aspectos legais, produtivos, econômicos, sociais e ambientais. O planejamento eficiente dessa operação, mesmo variando conforme as peculiaridades de cada empreendimento florestal, deve visar à otimização das atividades, principalmente na melhoria da qualidade dos produtos e serviços, à redução dos impactos ambientais, ao aumento da produtividade e à redução de custos (Machado, 2008).

Em relação aos aspectos ambientais referentes à colheita mecanizada de florestas, alguns fatores devem ser analisados, os quais podem influenciar a ocorrência de impactos quanto à compactação e à erosão do solo. São eles: a capacidade de suporte dos solos nos quais será realizada a colheita; as condições climáticas na época de colheita, essencialmente quanto à distribuição de chuvas e a dinâmica da água no solo; a seleção do sistema de colheita a ser utilizado e o estabelecimento de uma rota de retirada de madeira do talhão, a fim de reduzir os impactos causados pelo tráfego de máquinas (Lopes, 2008).

2.3 Alterações estruturais em solos cultivados com eucalipto

A área de cultivo de eucalipto no Brasil vem aumentando de forma significativa nos últimos anos, demandando tecnologias voltadas para o cultivo de extensas áreas, o que, em grande parte, está relacionado à intensificação das operações mecanizadas, principalmente durante a colheita. Esse cultivo envolve o uso de máquinas florestais em todas as etapas, desde o preparo do solo até a colheita.

Embora a mecanização tenha contribuído para facilitar e agilizar o trabalho do homem, seja nas áreas florestais ou agrícolas, ela constitui a principal causa da compactação dos solos, tanto pelo tráfego como pelo revolvimento do solo. Atualmente, o uso de máquinas tem sido uma constante na agricultura e o excesso ou a inadequação de práticas a que o solo é submetido durante as operações, desde seu preparo até a colheita da cultura que nele se estabeleceu, pode comprometer a produtividade (Machado, 2008).

As características favoráveis dos Latossolos, que são solos de textura média, argilosos, muito argilosos e profundos, bem estruturados e sob relevo suave, favorecem o emprego de práticas intensivas de manejo mecanizado não somente pela sua ocorrência em topografias suavizadas, mas também por serem originalmente dotados de elevada estabilidade estrutural e friabilidade.

De acordo com Marshall (1962), a estrutura do solo é o arranjo de partículas do solo e o espaço poroso, incluindo, ainda, a forma, o tamanho e o arranjo dos agregados, formados pelas partículas primárias, que se agrupam em unidades com limites definidos. Este espaço poroso tem sido classificado em macroporos (maior que 50 μm de diâmetro), o que caracteriza os poros de aeração e drenagem, e microporos (entre 0,5 e 50 μm), cuja função é o de armazenamento da água, fundamental para a vida das plantas e dos organismos do solo.

Dessa forma, a estrutura está sujeita a uma série de influências, dentre as quais ressaltam-se o papel da matéria orgânica como agente cimentante (Faccin, 1995; Silva & Resck, 1997), óxidos de ferro e alumínio (Lima & Anderson, 1997), composição mineralógica (Resende et al., 2002) e sistema de uso e manejo. A existência de quantidade relativamente alta de matéria orgânica associada à atividade biológica na superfície do solo, normalmente, promove um maior estado de agregação, o que implica em maior macroporosidade e infiltração.

Conforme Machado (1976), o manejo do solo provoca alterações na estrutura, o que é evidenciado pelo aumento da densidade do solo e a redução na macroporosidade, acarretando em menor taxa de infiltração de água e aumento do deflúvio. A degradação do solo, com a conseqüente queda de produção, está diretamente relacionada com as práticas que promovem a alteração da sua estrutura (Vieira, 1985).

A colheita florestal, sendo uma das etapas do processo de obtenção de matérias-primas da floresta, é, com toda a certeza, a que mais gera estudos, no que se refere aos impactos provocados no ambiente de produção, destacando-se o processo de compactação do solo (Dias Junior, 2002).

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante o qual existe um aumento da densidade do solo, em conseqüência da redução de seu volume pela expulsão do ar, causado pelo manejo inadequado. A umidade do solo é um fator controlador da compactação, portanto, o seu preparo deve ser realizado em condições adequadas de umidade (Gupta et al., 1989).

A fim de evitar a compactação, o preparo deve ser efetuado na zona de friabilidade do solo (Rezende, 1997), onde este apresenta baixa resistência ao preparo, capacidade de suporte de carga e resistência à compressão de alta a moderada (Larson et al., 1994).

Na manutenção dos sistemas de produção florestal, é extremamente crítica a sustentabilidade estrutural dos solos. Assim, a determinação da umidade em que o solo está mais susceptível à compactação, assume papel importante (Machado, 2008).

O monitoramento das propriedades físicas do solo e o desenvolvimento e uso dos modelos de capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento possibilitarão a identificação dos sistemas de manejo mais resistentes ou susceptíveis à compactação, permitindo o planejamento das atividades mecanizadas e visando evitar ou minimizar a degradação da estrutura proveniente do processo de compactação.

2.4 Comportamento compressivo de solos florestais

A maioria dos estudos acerca do comportamento da estrutura dos solos agrícolas e florestais, em particular no Brasil, investigou a compactação das camadas do solo, utilizando, principalmente, a densidade do solo e a umidade (Balastreire, 1987). Esses estudos não são recentes e consideram as mais diversas variáveis, tratamentos e condições (Alvarenga et al., 1986). Entretanto, quase todos se restringem a avaliar o fenômeno da compactação, desconsiderando qualquer possibilidade preditiva. Atualmente, muitos autores buscam modelar o comportamento da estrutura do solo, visando determinar a sua capacidade de suporte de carga para uma condição específica de manejo, que poderá ser utilizada para a compactação adicional (Kondo & Dias Junior, 1999; Miranda, 2001; Castro Neto, 2001; Oliveira et al., 2003).

As pesquisas vêm demonstrando que, com a intensa utilização de novas tecnologias voltadas para a motomecanização das operações agrícolas, simultaneamente ocorre um aumento do tráfego de máquinas sobre o solo. Originam-se, daí, uma série de alterações físicas, entre as quais se destaca o processo de compactação do solo como um dos mais importantes fatores

limitantes à obtenção de maiores produtividades das culturas exploradas (Kondo, 1998).

Dessa forma, o tráfico de máquinas, muitas vezes em condições inadequadas de umidade do solo, tem sido apontado como o principal responsável pela compactação e conseqüente degradação ambiental.

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de umidade excessiva, sendo necessário determinar essa umidade antes que ele seja cultivado ou trafegado, bem como uma previsão quantitativa do prejuízo causado à sua estrutura, caso as pressões aplicadas pelas máquinas excedam à sua capacidade de suporte de carga.

A facilidade com que o solo não saturado decresce de volume quando sujeito a pressões é chamada de compressibilidade (Gupta & Allmaras, 1987), a qual depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada, destacando-se as características das máquinas agrícolas, como carga por eixo, área de contato do rodado com o solo e pressão de inflação dos pneus (Castro Neto, 2001), enquanto os fatores internos são influenciados pela história de tensão (Gupta et al., 1989; Dias Junior, 1994), umidade, textura, estrutura e densidade inicial do solo, além do potencial de água, ligações entre as partículas e agregados (Dias Junior, 1994; Larson et al., 1980; Gupta et al., 1989), mineralogia da fração argila, hidróxidos de alumínio livres e outros atributos, como pH e CTC (Assouline et al., 1997).

Nesse contexto, a curva de compressão do solo, obtida em laboratório, tem sido utilizada para simular as reduções do seu volume (Larson et al., 1980; Stone & Larson, 1980; Dias Junior, 1994; Dias Junior & Pierce, 1996; Assouline et al., 1997; Smith et al., 1997; Kondo & Dias Junior, 1999; Oliveira et al., 2003), por meio do ensaio de compressibilidade. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e algum parâmetro

relacionado ao arranjo das partículas, como a densidade do solo (Dias Junior & Pierce, 1996).

A curva de compressão é linear quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia e é denominada reta de compressão virgem (Figura 1) em que qualquer pressão aplicada resultará em deformações não recuperáveis, causando, assim, compactação adicional (Dias Junior, 1994).



FIGURA 1 Curva de compressão do solo quando este não sofreu nenhuma pressão prévia.

Fonte: Dias Junior & Pierce (1996).

Em contrapartida, quando o solo foi submetido a pressões prévias, ele adquire certo grau de compactação, sofrendo deformações não recuperáveis apenas quando submetido a pressões superiores às anteriormente aplicadas (Dias Junior & Pierce, 1996). Nesse caso, o comportamento da curva de compressão do solo é descrito em duas regiões características: uma de deformações elásticas e recuperáveis (portanto, não degradando a estrutura do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis (região em que ocorre degradação estrutural) (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996) (Figura 2).



FIGURA 2 Curva de compressão do solo quando este já sofreu pressão prévia.
 σ_p : pressão de pré-consolidação.
 Fonte: Dias Junior & Pierce (1996).

A aplicação de pressões menores que a pressão de pré-consolidação causa deformações elásticas e recuperáveis no solo, enquanto a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas e não recuperáveis, alterando consideravelmente as propriedades físicas do solo (Holtz & Kovacs, 1981; Lebert & Horn, 1999).

A redução do volume, conseqüentemente aumentando a densidade, pode ou não causar compactação adicional ao solo. A aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo foi submetido no passado pode ter efeitos benéficos, enquanto pressões maiores do que a maior pressão sofrida no passado pode ter efeitos prejudiciais. Isso mostra a importância de serem conhecidos os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e ou a sua umidade no momento das operações agrícolas, evitando, dessa forma, compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

A condição para que não ocorra compactação adicional do solo ou crescimento das raízes vai depender da pressão de preconsolidação, a qual é função da umidade (Dias Junior, 1994; Kondo, 1998) e da densidade do solo inicial. Para que a predição seja cientificamente válida, é necessário que o modelo matemático empregado relacione as pressões exercidas ao solo pelas máquinas ou pela raiz, com as deformações passíveis de ocorrer em função da umidade e do manejo (Kondo & Dias Junior, 1999).

Considerando-se a pressão de preconsolidação como indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior, 1994) e um indicador da sustentabilidade do solo à compactação (Peng et al., 2004), a Figura 3 foi dividida em três regiões, para avaliar o efeito do tráfego sobre a pressão de preconsolidação, de acordo com Dias Junior et al. (2005).

As regiões consideradas são: a) região em que os valores de pressão de preconsolidação determinados após o tráfego forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança, sendo considerada a região com compactação do solo adicional; b) região em que os valores da pressão de preconsolidação determinados após o tráfego de máquinas estão entre os limites de confiança inferior e superior. Embora estas amostras de solo situadas não tenham sofrido compactação, esta região indica que as amostras poderão sofrer compactação nas próximas operações de colheita, se as pressões aplicadas forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança e c) região na qual os valores da pressão de preconsolidação determinada após o tráfego são menores que o limite inferior do intervalo de confiança (Figura 3).

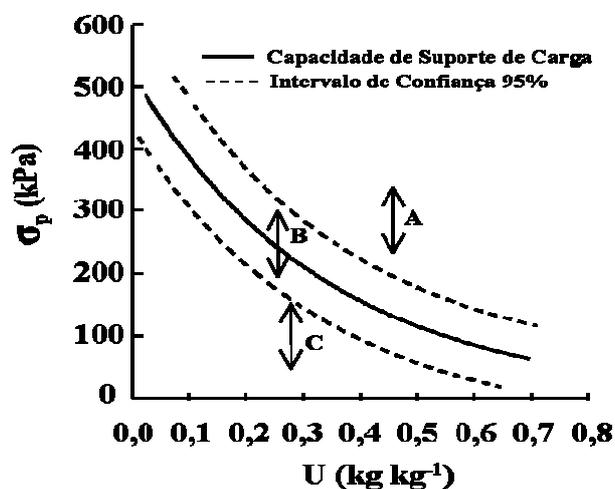


FIGURA 3 Modelos de capacidade de suporte de carga do solo, segundo critérios adotados por Dias Junior et al. (2005). A) com compactação adicional, B) com tendência a compactar e C) sem compactação.

Avaliando o efeito do tráfego das operações de colheita florestal na pressão de preconsolidação (σ_p), durante um ciclo de 7 anos do eucalipto, Dias Junior et al. (2007) confirmaram a validade desses critérios na quantificação das alterações estruturais, em função da realização da colheita mecanizada.

2.5 Resistência ao cisalhamento de solos florestais

Em áreas aptas à mecanização, a intensidade do uso do solo e o peso das máquinas e equipamentos têm aumentado (Streck et al., 2004), não sendo acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e da largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas desse solo.

As especificações da máquina, como pressão de inflação dos pneus e tipo de rodado, assim como o seu peso e as operações que realiza, são de grande importância para evitar ou minimizar a compactação.

Do ponto de vista físico, o entendimento da resistência ao cisalhamento pode ser de grande importância na tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação do solo, uma vez que esta propriedade pode ser um indicativo da estrutura do solo e de seu estado de compactação (Rocha, 2003).

A compactação tem origem na compressão do solo não saturado, durante a qual a densidade do solo sofre um incremento em função da redução no volume de poros ocupados pelo ar (Gupta et al., 1989). Em outras palavras, solos não saturados, quando submetidos a uma carga ou pressão, sofrem redução de volume em decorrência da deformação e do rearranjo das partículas sólidas e do deslocamento do ar presente nos poros.

Se esta compressão for em dois sentidos, como ocorre nos processos de aração, gradagem e patinação de tratores, entre outros, o solo atinge a máxima tensão cisalhante e, neste ponto, ocorre uma ruptura que, em razão da umidade do solo neste momento, pode formar uma camada com alta densidade e com baixa permeabilidade (Pires et al., 2006).

A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima pressão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorre (Rocha, 2003). Ela pode ser expressa pela equação de Coulomb, $\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\phi$ (Lambe, 1951), em que τ é a máxima pressão cisalhante suportada pelo solo, σ_n é a tensão normal a que a superfície de falhamento está submetida, c é o intercepto de coesão ou coesão aparente do solo e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças a que o maciço terroso está submetido. Esta equação define a envoltória de resistência, que é a linha limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer força cisalhante que esteja acima desta linha promoverá a ruptura do solo (Figura 4) (Rocha, 2003).

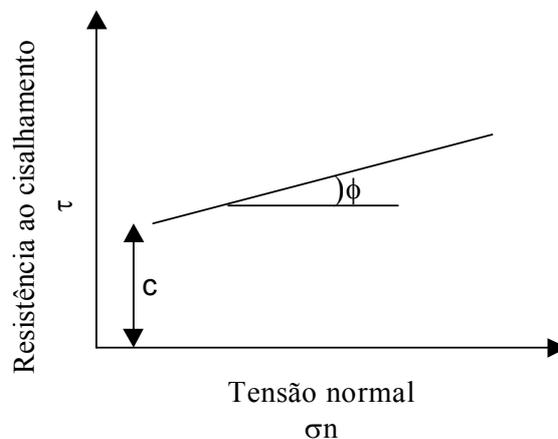


FIGURA 4 Envoltória de resistência.
 Fonte: Rocha (2003).

A resistência ao cisalhamento do solo pode também ser usada como um indicador de sua compactação (Ayers & Perumpral, 1982; Schjonning, 1991). Em geral, os solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento (Azevedo, 1999), devido à menor distância entre as partículas, o que confere, conseqüentemente, menor índice de vazios e um maior esforço, por exemplo, para prepará-los para o cultivo.

Os parâmetros c e ϕ são características intrínsecas dos solos (Benjamim & Cruse, 1985; Ramamurthy, 2001; Zang et al., 2001).

O intercepto de coesão (c) é uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos presente apenas em solos parcialmente saturados em consequência da maior ou menor tensão capilar (Pinto, 1989; Vargas, 1989; Azevedo, 1999). Saturando-se ou secando-se o solo totalmente, este parâmetro desaparece, portanto, o nome aparente.

Dessa forma, as envoltórias de resistência ao cisalhamento são obtidas pela combinação dos pares de dados: tensões cisalhantes obtidas pela prensa e tensões normais estabelecidas antes do início do ensaio.

A coesão aparente do solo será tanto maior quanto maior for a proximidade das suas partículas (Pinto, 1989). Para maiores densidades do solo, este parâmetro da resistência ao cisalhamento será também maior, desde que o solo não contenha quantidades expressivas de silte (Rocha et al., 2001).

Com relação à textura, solos com maiores quantidades de areia apresentam maior resistência ao cisalhamento (Rocha et al., 2001), devido à capacidade dessas partículas de se rearranjarem de maneira mais densa quando submetidas a esforços externos, conferindo maior densidade ao solo (Dias Júnior & Miranda, 2000), gerando maior atrito entre as partículas e aumentando a sua resistência ao cisalhamento do solo.

No caso de solos argilosos, o estudo da resistência ao cisalhamento torna-se mais complexo. Essa fração é a mais ativa e os processos físicos e químicos, tais como sucessivas arações e gradagens, adubações fosfatadas e calagem, atuam no sentido de aumentar ou reduzir o contato entre partículas do solo, conseqüentemente aumentarão ou reduzirão sua resistência ao cisalhamento (Rocha, 2003).

Para Sidorchuk (2002), a umidade e o teor de matéria orgânica podem influenciar a resistência ao cisalhamento do solo. Para determinados valores de umidade, a matéria orgânica tende a reduzir a resistência ao cisalhamento, em função da menor densidade do solo conferida por esta, reduzindo, com isso, o contato entre as partículas.

Por outro lado, também dependendo da umidade, a matéria orgânica presente no solo exerce funções físicas e químicas, tais como um melhor desenvolvimento radicular e uma melhor estruturação do solo que certamente influenciarão no aumento da resistência ao cisalhamento. Assim, a resistência ao cisalhamento é um parâmetro importante na caracterização das alterações da estrutura do solo (Cruse & Larson, 1977; Davies, 1985; Gantzer et al., 1987; Servadio et al., 2001), uma vez que a maioria dos solos agrícolas é cultivada

com baixos teores de matéria orgânica (Ekwue & Stone, 1995) e na umidade inadequada (Silva, 2002).

Portanto, fazer predições do risco de compactação nas diferentes épocas de colheita do eucalipto, com base em propriedades mecânicas que refletem o comportamento do solo no campo, é de grande utilidade para a obtenção de uma atividade florestal sustentável.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF.; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; LINDEN, J. P. van der; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part I – Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145–160, 2003.
- ALVARENGA, R. C.; FERNANDES, B.; SILVA, T.C.A.; RESENDE, M. Estabilidade de agregados de sistemas de preparo do solo sobre características de um Latossolo Roxo Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 10, p. 273-277, 1986.
- ANDRADE, S. C. Avaliação técnica, social, econômica e ambiental de dois sistemas de colheita florestal no litoral norte da Bahia. 1998. 125 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**: ano base 2007. Brasília: [s.n], 2007. 87 p.
- ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.61, p.390 – 398, 1997.
- AYERS, P. D.; PERUMPRAL, J. V. Moisture and density effect on cone index. **Transactions of the American Society of Agricultural and Engineers, St. Joseph**, v. 21, p. 1169 - 1172, 1982.
- AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa - MG**. 1999. 169p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- BALESTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307 p.
- BENJAMIN, J.G.; CRUSE, R. M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 1248 – 1251, 1985.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. **Produtividade do Eucalipto no Brasil**. [S.l.]: [s.n.], 2008. (Boletim Informativo).

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 em Agronomia/Energia na Agricultura) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

CRUSE, R. M.; LARSON, W. E. Effects of soil shear strength on soil detachment due to rain drop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 777 – 781, 1977.

DAVIES, P. Influence of organic matter, moisture status and time after reworking on soil shear strength. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 36, p. 299 - 306, 1985.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.** 1994. 114 p. Thesis (Doctorate in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JUNIOR, C. F.; SILVA A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.2, p.257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C.; AZEVEDO, M.B. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, Lavras, v. 8, p. 103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAUJO 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, May/June. 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 337-346, 2000.

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

EKWUE, E. J.; STONE, R. J. Organic matter effects on the strength properties of impacted agricultural soils. **Transactions of the American Society of Agricultural and Engineers**, St. Joseph, v. 38, p.357 - 365, 1995.

FACCIN, O. P. **Influência das características químicas, físicas e mineralógicas sobre a estabilidade de agregados de diferentes grupamentos de solos**. 1995. 66 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 21–35, 1998.

GANTZER, C. J.; BUYANOVSKY, G. A.; ALBERTS, E.; REMLEY, P. A. Effects of soybean and crop residue deposition on soil strength and splash detachment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 202 - 206, 1987.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 138, p.167-185, 2000.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOOHEES, W.B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. Kluwer Academic: Amsterdam, 1989. p.137 – 152.

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

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. 2.ed. New York: J. Wiley, 1951. 165p.

LARSON, W. E.; GRUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight orders. **Soil Science of American Journal**, Madison, v.44, p.450-457, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p. 274-286, 1999.

LIMA, J. M.; ANDERSON, S.J. Effect of aggregation and aggregate size on extractable Fe and Al in two brazilian typic hapludoxs. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 965-970, 1997.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. São Paulo: USP, 1996.

LOPES, J. A. U. Estimativa de estabilidade de encostas naturais e procedimentos preventivos/ corretivos da engenharia civil. In: CURSO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3.,1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1994. p. 59-81.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. cap 7, p. 185-230.

MACHADO, J. A. **Efeito do sistema convencional de cultivo na capacidade de infiltração da água no solo**. 1976. 133 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MARSHAL, T. J. The nature, development, and significance of soil structure. In: NEALE, G.J. (Ed.). **Transaction of joint meeting of commissions IV e V (INSS)**. Palmerston North: [s.n.], 1962. p. 243-257.

MIRANDA, E. E. V. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região de cerrado**. 2001. 57p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

OLIVEIRA, G. C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado**. 2002. 78 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. de S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291–299, fev. 2003.

PENG, S. H.; HORN, R.; ZHAHNG, B.; ZAHO, Q.G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, p.125-137, Apr. 2004.

PINTO, C. S. **Resistência ao cisalhamento dos solos**. São Carlos: Grêmio Politécnico, 1989

PIRES, B. S.; ROCHA, W. W.; NUNES, A. H. B.; CARVALHO, R. C. R.; NUNES, P. H. B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8.; ENCONTRO DE DIVULGAÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 5.,2006, Campanha. **Anais...Campanha: UEMG/FAPEMIG**, 2006. 1 CD-ROM.

RAMAMURTHY, T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v. 38, n.5, p. 1-15, July 2001.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa, MG: NEPUT, 2002. 338p

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa, MG: NEPUT, 1997. 367p.

ROCHA, W. W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG**. 2003. 101p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SCHJONNING, P. Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam. v. 12, p. 277- 283, 1991.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, N.; VIGNOZZI, N. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 143-155, 2001.

SIDORCHUK, A. Gully erosion modeling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. **Catena**, Amsterdam, v. 709, p. 312-328, 2002.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997. p. 467-524.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 1–8, 2002.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 93-111, 1997.

STONE, J.A.; LARSON, W.E. Rebound of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.819-22, 1980.

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

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill: 1989. 509p.

VIEIRA, M.J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLY, A. L. (Ed.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargil, 1985, p. 163-179.

ZANG, B; ZHAO, Q. G; HORN, R; BAUMGARTL, T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 59, p. 97 – 106, 2001.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DOS IMPACTOS CAUSADOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE EUCALIPTO POR MEIO DOS MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA

RESUMO

A colheita mecanizada do eucalipto em determinadas épocas do ano pode ser prejudicial à sua estrutura pelo fato de o mesmo se encontrar com conteúdos mais elevados de água por ocasião da entrada de máquinas, o que aumentaria sua susceptibilidade à compactação pela menor capacidade de suporte de carga. Este estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do LVAd, utilizando-se modelos de capacidade de suporte de carga. Após as operações de colheita do eucalipto, foram feitas amostragens de solo. Três tratamentos foram avaliados: FE) faixa ecológica, há 15 anos sem sofrer tráfego de máquinas; F) colheita feita por feller-buncher de disco e FS) colheita feita por feller-buncher de disco e baldeio da madeira feito por skidder. As amostras deformadas foram utilizadas na caracterização do solo e as indeformadas na determinação dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo e na avaliação dos impactos causados em decorrência da colheita mecanizada do eucalipto. Coletaram-se amostras nas profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m. A maior porcentagem de amostras de solo, na região onde ocorre compactação adicional, indicou que o tratamento FS foi o mais impactante para a estrutura do solo, nas duas profundidades.

ABSTRACT

Mechanized harvesting of Eucalyptus at certain times of the year can be detrimental to the soil structure due to the fact of the soil is at higher water content in the occasion of the machinery entrance, which would increase the soil susceptibility to compaction by its reduced soil bearing capacity. The objective of this study was to determine which forest harvest operation promotes greater degradation of the LVAd structure through the bearing capacity models. After the harvesting operations of eucalyptus, the soil was sampled. Three treatments were evaluated: FE) ecological strip for 15 years without suffering machinery traffic; F) harvest done by feller-buncher with disk; FS) harvest done by feller-buncher with disk and transportation of the wood made by skidder. Disturbed soil samples were used for soil characterization and undisturbed were used to obtain the bearing capacity models and to assess the impacts caused by the mechanical harvesting of Eucalyptus. The soil samples were collected at 0 to 0.03 m and 0.20 to 0.23 m depths. The highest percentage of soil samples in the region where additional soil compaction occurs indicated that the FS treatment was the one that more impacted the soil structure at both depths.

1 INTRODUÇÃO

Com o intenso uso de máquinas e equipamentos pesados na agricultura moderna e o incremento do cultivo em novas áreas, visando ao desenvolvimento dos países, particularmente aqueles localizados nos trópicos, a compactação de solos agrícolas tornou-se uma preocupação universal (Larson et al., 1980), por ser um fenômeno praticamente inevitável (Assouline et al., 1997).

Nesse contexto, a realização de um estudo que contemplasse o desenvolvimento de modelos de sustentabilidade da estrutura das diferentes classes de solo, baseado na sua história de manejo e na variação da umidade, poderia auxiliar no planejamento das atividades mecanizadas, de maneira a evitar ou minimizar a degradação da estrutura dos solos (Dias Junior et al., 2002).

A colheita mecanizada do eucalipto, em determinadas épocas do ano, pode ser prejudicial para a estrutura do solo, pelo fato do mesmo se encontrar com conteúdos mais elevados de água por ocasião da entrada de máquinas, o que aumentaria sua susceptibilidade à compactação pela menor capacidade de suporte de carga.

Com o manejo inadequado do solo, é previsível que ocorram quedas crescentes de produtividade aliadas à degradação ambiental, em consequência de modificações estruturais (Larson et al., 1980).

Segundo Dias Junior e Pierce (1996), a pressão de preconsolidação reflete a maior pressão que o solo já suportou no passado e, sendo assim, qualquer pressão superior àquela provocará uma compactação adicional.

A umidade é um fator que determina a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (Dias Junior, 1994). Entretanto,

em condições de elevada umidade, o solo fica susceptível à compactação por causa de sua baixa capacidade de suporte de carga.

A consistência do solo é definida como as manifestações das forças de coesão e adesão atuando sobre a massa de solo. Essas manifestações influenciam propriedades como dureza ou tenacidade, friabilidade, plasticidade e pegajosidade, podendo indicar a tendência do solo em aderir a outros corpos, como, por exemplo, máquinas e equipamentos agrícolas. Assim, o conhecimento dos limites e dos estados de consistência do solo é de grande valia na tomada de decisões, como, por exemplo, a condição de umidade ideal do solo para a realização das operações agrícolas e florestais (Kondo & Dias Júnior, 1999).

Em estudos realizados por Kondo & Dias Junior (1999) demonstrou-se que, caso sejam aplicadas aos solos pressões maiores do que a sua capacidade de suporte de carga, a compactação ocorre, mesmo que o tráfego se dê na zona de friabilidade.

Assim sendo, o entendimento do comportamento compressivo do solo utilizando a pressão de preconsolidação adquire grande importância em razão de ser esta a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação.

Com base nesses fatores, o presente estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), por meio dos modelos de capacidade de suporte de cargas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em florestas de *Eucalyptus* spp, em áreas da empresa ArcelorMittal Energética – Jequitinhonha, no município de Itamarandiba, MG, a 18°40' S de latitude e 40°58' O de longitude. Segundo Köppen, o clima local é classificado como tropical de altitude, com índice pluviométrico anual que ultrapassa os 1.114 mm. A região possui clima ameno, com temperatura média anual de 20°C.

O Alto Jequitinhonha é caracterizado por ser uma área de transição entre biomas, marcada pela presença de diversos tipos de vegetação, assim como coberturas vegetais de cerrado, principalmente nos topos das chapadas, combinando com vegetação de caatinga nas grotas.

Além da vegetação, outra característica específica define o semiárido no Alto Jequitinhonha, que é a média de precipitação maior que as outras regiões semiáridas do país, possuindo solos profundos, que armazenam água, formando um lençol freático que possibilita o surgimento de nascentes. O relevo é suave ondulado em grandes extensões com declividade entre 3%-8%.

Foram coletadas amostras deformadas de solo para caracterizações físicas e químicas, teores de matéria orgânica e limites de consistência. A análise textural foi feita pelo método da pipeta, segundo Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997). A determinação dos limites de contração (LC), plasticidade (LP) e liquidez (LL) do solo foi realizada segundo proposto por EMBRAPA (1997).

A mineralogia, a textura e a estrutura são citadas por Lebert & Horn (1991) como fatores internos que influenciam o processo de compactação do solo. De acordo com EMBRAPA (2006), os teores de argilas classificam o solo em estudo como um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) muito argiloso. O valor de Ki inferior a 2,2 caracteriza-o como sendo muito

intemperizado, de acordo com EMBRAPA (2006) e o valor de Kr superior a 0,75 indica que é caulínico (Tabela 2).

TABELA 1 Caracterização física e matéria orgânica do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) nos diferentes manejos e operações mecanizadas de colheita do eucalipto, localizado no município de Itamarandiba, MG.

Prof ⁽¹⁾ (cm)	Dp ⁽²⁾ (kg dm ⁻³)	Granulometria ⁽³⁾				MO ⁽⁴⁾	LC ⁽⁵⁾	LP ⁽⁶⁾
		A	S	AF	AG			
		----- (g kg ⁻¹) -----						
FE								
0-3	2,44	780	120	60	40	200	0,18	0,27
20-23	2,49	780	80	80	60	120	0,20	0,26
F								
0-3	2,50	780	80	90	50	120	0,19	0,27
20-23	2,52	810	80	70	40	50	0,21	0,26
FS								
0-3	2,33	790	80	80	50	100	0,18	0,27
20-23	2,39	790	90	70	50	40	0,18	0,29

⁽¹⁾:Profundidades correspondentes às amostras coletadas; ⁽²⁾:Dp: Densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (média de 12 repetições); ⁽³⁾: Análise textural determinada pelo método da pipeta (média de 12 repetições); A: argila; S: silte; AF: areia fina; AG: areia grossa; Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; Kr: relação molecular SiO₂ : (Al₂O₃ + FeO₃); ⁽⁵⁾:LC: limite de contração; ⁽⁶⁾:LP: limite de plasticidade.

TABELA 2 Caracterização química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) localizado no município de Itamarandiba, MG.

Profundidade (m)	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Ki	Kr
		----- (%) -----					
0,20 – 0,23 ¹	17,97	36,49	11,24	3,11	0,04	0,84	0,78

⁽¹⁾: Profundidades correspondentes à camada superficial e horizonte B diagnóstico dos solos. Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃).

Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga, foram coletadas amostras indeformadas de uma área em que não houve tráfego de máquinas, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com

diferentes umidades, de acordo com Bowles (1986), modificado por Dias Junior (1994). Para a obtenção das umidades volumétricas, variando entre 5% e 45%, as amostras indeformadas foram inicialmente saturadas e, a seguir, secas ao ar no laboratório. Após a obtenção da umidade desejada, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro da marca Boart Longyear, por meio do qual as pressões foram aplicadas através de ar comprimido.

As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% de deformação máxima fosse alcançada (Holtz & Kovacs, 1981) e, após essa condição, aplicou-se nova pressão. Após a liberação da pressão, as amostras foram secas em estufa, a 105°-110°C, por 48 horas e determinou-se a matéria seca do solo. A densidade do solo foi calculada de acordo com Blake & Hartge (1986). Com a umidade gravimétrica e a densidade do solo, as pressões de preconsolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), a partir da curva de compressão do solo.

As comparações das regressões foram feitas segundo Snedecor & Cochran (1989). Determinou-se o intervalo de confiança, a 95%, dos modelos de capacidade de suporte de carga e a três regiões propostas por Dias Junior et al. (2005) foram utilizadas no monitoramento da compactação dos solos em decorrência das operações de colheita do eucalipto.

Após as operações de colheita do eucalipto, foram feitas amostragens de solo em cada talhão em que esta foi realizada. Foram demarcadas parcelas de 36 m de comprimento e 4 m de largura, que correspondem à entrelinha de 12 árvores de eucaliptos.

A colheita mecanizada foi realizada com o feller-buncher de disco marca HydroAx modelo 611E (capacidade = 0,9 t/cabeçote; tara = 14,0 t) e a extração

da madeira foi feita com o skidder marca Caterpillar modelo 518C (capacidade = 3,6 t; tara = 12,5 t).

O feller-buncher corta e amontoa as árvores em feixes compatíveis com a capacidade da garra do skidder. Após o corte, é feita a operação manual de desgalhamento, ocorrendo a seguir o arraste das toras longas pelo skidder até o carreador. A movimentação do skidder no talhão é feita de maneira aleatória, sem se restringir ao tráfego entre linhas das árvores.

As áreas amostradas apresentam diferentes manejos e operações de colheita, nas quais formam diferentes ambientes que caracterizaram os tratamentos estudados. Assim, três tratamentos foram avaliados: FE) faixa ecológica, há 15 anos sem sofrer tráfego de máquinas; F) colheita feita por feller-buncher de disco; FS) colheita feita por feller-buncher de disco e baldeio da madeira feito por skidder.

Para a realização do ensaio de compressão uniaxial conforme citado anteriormente, em cada operação mecanizada de colheita do eucalipto foram coletadas, na linha de tráfego das máquinas florestais, 10 amostras indeformadas, totalizando 60 amostras (10 amostras x 3 manejos x 2 profundidades). Para a escolha das profundidades, consideraram-se a camada superficial na profundidade de 0 a 0,3 m e a camada de 0,20 a 0,23 m, por ter sido esta a profundidade que apresentou, em estudos preliminares, maior resistência à penetração. Tais amostras foram coletadas utilizando um amostrador de Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro por 2,54 cm de altura.

As amostras indeformadas foram embaladas em filme plástico e, posteriormente, parafinadas e identificadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar os efeitos da colheita florestal, utilizaram-se modelos de capacidade de suporte de carga como referência em termos de qualidade estrutural, uma vez que estes foram obtidos por meio de amostras coletadas em uma mata nativa.

Os modelos de capacidade de suporte de carga para as profundidades 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m estão representados no gráfico da Figura 1.

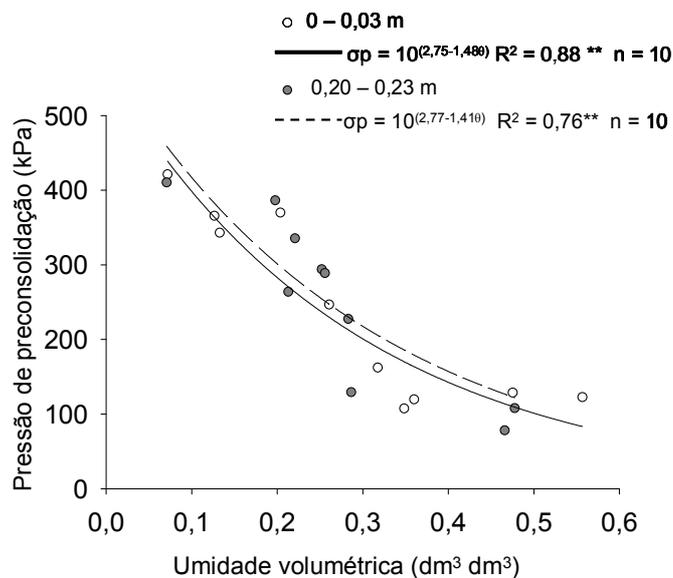


FIGURA 1 Modelos de capacidade de suporte de cargas do Latossolo Vermelho-Amarelo nas profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m, no município de Itamarandiba, MG.

Na Tabela 3 encontra-se o resumo da análise estatística (comparações das equações de regressões $\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$).

TABELA 3 Teste de significância descrito por Snedecor & Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$) de um Latossolo Vermelho-Amarelo, nas profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m.

Profundidade (m)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
0-0,03 vs 0,20 a 0,23	H	NS	NS

F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NS: não significativo.

As equações de regressões entre σ_p e θ foram homogêneas, indicando a mesma capacidade de suporte de carga para as profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m (Tabela 3), sendo portanto, uma nova equação ajustada a todos os valores de σ_p e θ , obtendo-se, assim, um novo modelo de capacidade de suporte de carga para essas profundidades ($\sigma_p = 10^{(2,73-1,52\theta)}$ $R^2 = 0,75$).

O novo modelo de capacidade de suporte de carga está representado na Figura 2. Este modelo fornece, portanto, a capacidade de suporte de carga do solo em termos de pressão de preconsolidação, que é uma estimativa da pressão máxima que pode ser aplicada ao solo para evitar que a compactação adicional ocorra.

Esse resultado se deve ao fato de o sistema não ter sofrido ação antrópica e tráfego de máquinas, não ocorrendo modificações nos atributos do solo que provocassem diferenciação entre as profundidades.

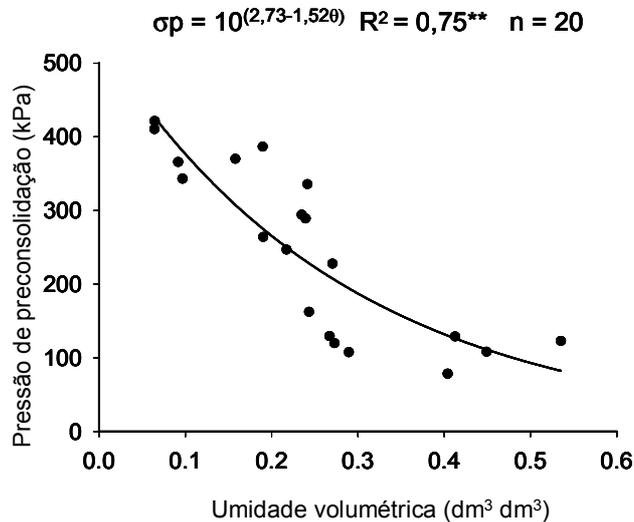


FIGURA 2 Modelos de capacidade de suporte de cargas entre as profundidades 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m de um LVAd.

É recomendado que o preparo do solo seja realizado quando o seu conteúdo de água corresponder à zona de friabilidade (ZF), definida como o intervalo entre o conteúdo de água no limite de contração e no limite de plasticidade (LP).

Considerando-se a pressão de preconsolidação como indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior, 1994) e um indicador de suscetibilidade do solo à compactação, a Figura 2 foi dividida em três regiões, para avaliar o efeito do tráfego sobre a pressão de preconsolidação, de acordo com Dias Junior et al. (2005) e apresentada na Figura 3. Na região “a” a compactação adicional já ocorreu; na região “b”, indica que não ocorreu compactação adicional do solo, porém, há tendência desta ocorrência se as próximas operações mecanizadas excederem a capacidade de suporte de carga do solo e a região “c” é aquela onde não ocorreu compactação do solo.

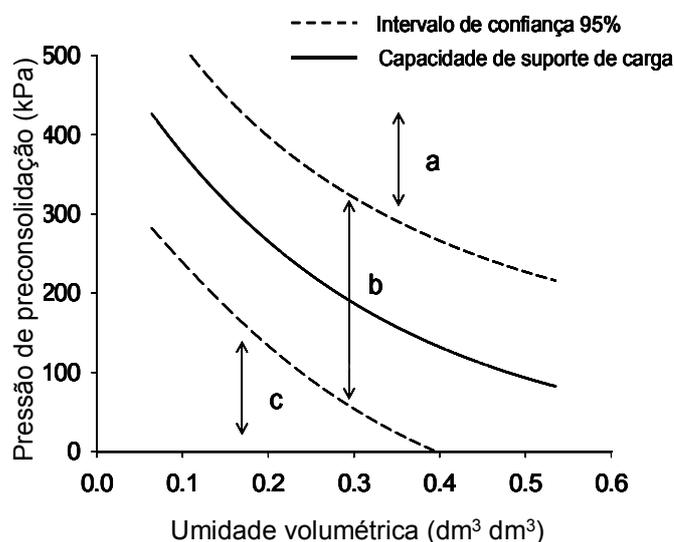


FIGURA 4 Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob mata nativa e critérios utilizados para analisar os efeitos das operações mecanizadas de colheita do eucalipto. Região “a”: com compactação, “b”: com tendência a compactar e “c”: sem compactação.

Fonte: Dias Junior (2005).

De acordo com Dias Junior et al. (1999), nos modelos de capacidade de suporte de carga (Figura 4) foram representados os valores das σ_p obtidas nas amostras indeformadas, que foram coletadas nos sistemas de manejo estudados. Nessas figuras, além dos modelos de capacidade de suporte de carga, apresenta-se também o intervalo de confiança da população, a 95%.

Nas Figuras 5 e 6 estão representados os valores das σ_p obtidas nas amostras indeformadas coletadas no manejo faixa ecológica, para as profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m, respectivamente.

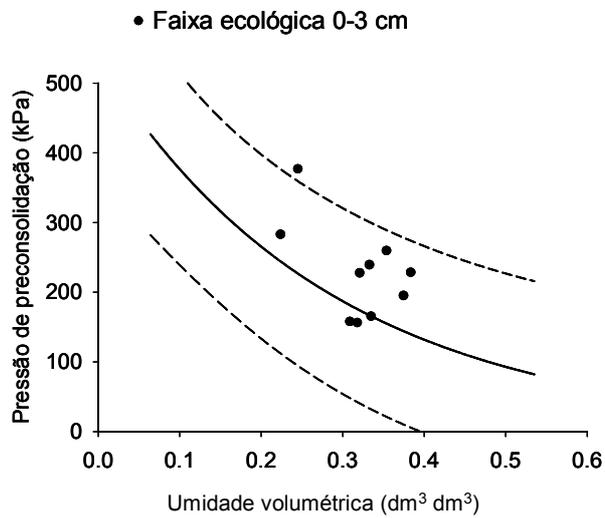


FIGURA 5 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0 a 0,03 m. Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas no manejo faixa ecológica.

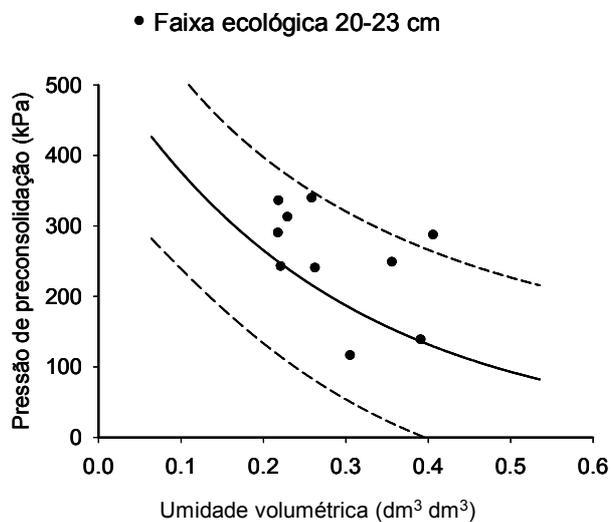


FIGURA 6 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0,20 a 0,23 m. Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas no manejo faixa ecológica.

Para este manejo, ambas as profundidades apresentaram 10% das amostras compactadas e 90% com tendência à compactação (Tabela 4).

O manejo faixa ecológica há 15 anos não é cultivado com eucalipto, não ocorrendo operações mecanizadas nessa área desde esse período. Portanto, foram observadas 90% das amostras com tendência a compactar, o que evidencia o histórico de tensão que esse solo já sofreu no passado, promovendo a recuperação da sua estrutura (Dias Junior et al., 2007).

O incremento de matéria orgânica nesse manejo em relação aos demais (Tabela 1) aumenta a estabilidade de agregados pelo aumento de ligações entre as partículas e agregados do solo (Assis & Lanças, 2005), o que resulta na preservação da estrutura do solo, proporcionando maior resistência à compactação adicional.

TABELA 4 Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p) e umidades volumétricas, determinados após as operações de colheita, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), nas profundidade de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m e classificação das amostras, em porcentagem, de acordo com cada região apresentada na Figura 3.

Região	FE		F		FS		FE	F	FS
	θ ($\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$)	σ_p (kPa)	θ ($\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$)	σ_p (kPa)	θ ($\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$)	σ_p (kPa)			
-----0 a 0,03 m-----									
a. com compactação	0,26 ¹	380,12 ¹	0,40 ²	330,18 ²	0,21 ³	400,00 ³	10	40	70
b. com tendência a compactar	0,33 ⁴	212,76 ⁴	0,38 ⁵	246,01 ⁵	0,18 ⁶	350,10 ⁶	90	60	30
c. sem compactação	-	-	-	-	-	-	0	0	0
-----0,20 a 0,23 m-----									
a. com compactação	0,41 ¹	300,01 ¹	0,31 ⁷	360,00 ⁷	0,23 ⁸	400,00 ⁸	10	20	50
b. com tendência a compactar	0,28 ⁴	255,71 ⁴	0,37 ⁹	195,18 ⁹	0,20 ⁸	330,18 ⁸	90	80	50
c. sem compactação	-	-	-	-	-	-	0	0	0

FE: Faixa ecológica; F: Feller-Buncher; FS: Feller-Buncher e Skidder. ⁽¹⁾ Uma amostra; ⁽²⁾ Média de 4 amostras; ⁽³⁾ Média de 7 amostras; ⁽⁴⁾ Média de 4 amostras; ⁽⁵⁾ Média de 6 amostras; ⁽⁶⁾ Média de 3 amostras; ⁽⁷⁾ Média de 2 amostras; ⁽⁸⁾ Média de 5 amostras; ⁽⁹⁾ Média de 8 amostras.

Nas Figuras 7 e 8 estão representados os valores de umidade e das σ_p obtidos nas amostras indeformadas coletadas no manejo colheita feita por feller-buncher, para as profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m, respectivamente.

Observa-se que, para esse manejo, na profundidade de 0 a 0,03 m, 40% das amostras apresentam-se compactadas e 60% com tendência compactar (Tabela 4). Essa maior compactação se deve ao fato de ter sido o tráfego realizado em umidades acima do LP, o que conferiu ao solo, nesta umidade, baixa capacidade de suporte de carga. Esses resultados corroboram os relatados

por Imhof et al. (2001), segundo os quais, o solo, quando úmido, apresenta baixa capacidade de suporte de carga.

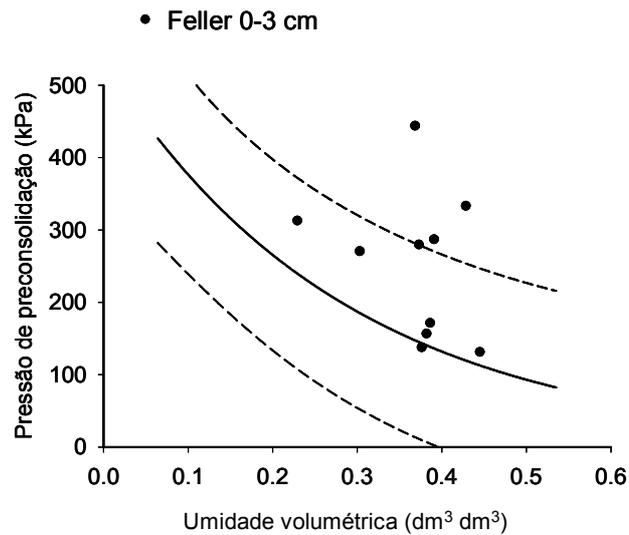


FIGURA 7 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0 a 0,03 m. Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas após a operação de colheita feita por feller-buncher.

Já na profundidade de 0,20 a 0,23 m (Figura 8), 20% das amostras apresentam-se compactadas e 80% apresentam-se com tendência a compactar. Esse resultado evidencia que há maior degradação da estrutura do solo em superfície.

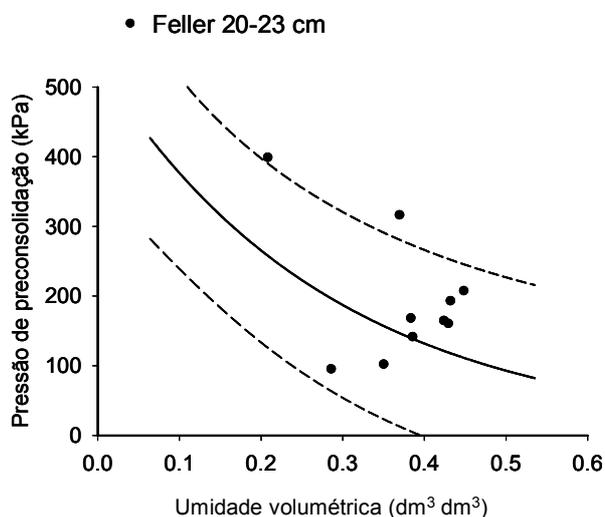


FIGURA 8 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0,20 a 0,23 m. Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas após a operação de colheita feita por feller-buncher.

Os valores de umidade e de σ_p obtidos das amostras coletadas no manejo colheita feita por feller-buncher e baldeio feito por skidder estão representados nas Figuras 9 e 10. Observa-se maior degradação da estrutura utilizando-se essa operação de colheita e baldeio da madeira, uma vez que a porcentagem de amostras compactadas para a camada de 0 a 0,03 m foi de 70% e, para a camada de 0,20 a 0,23 m, foi de 50% (Tabela 4).

Neste caso, a profundidade de 0 a 0,03 m (Figura 9) apresentou maior quantidade de amostras compactadas e, portanto, maior degradação da estrutura nessa profundidade. Tal resultado corrobora os obtidos por Castro Neto (2001), segundo o qual que a camada de solo que apresenta imediatamente o efeito compactante causado pelo tráfego de máquinas está situada na superfície do solo.

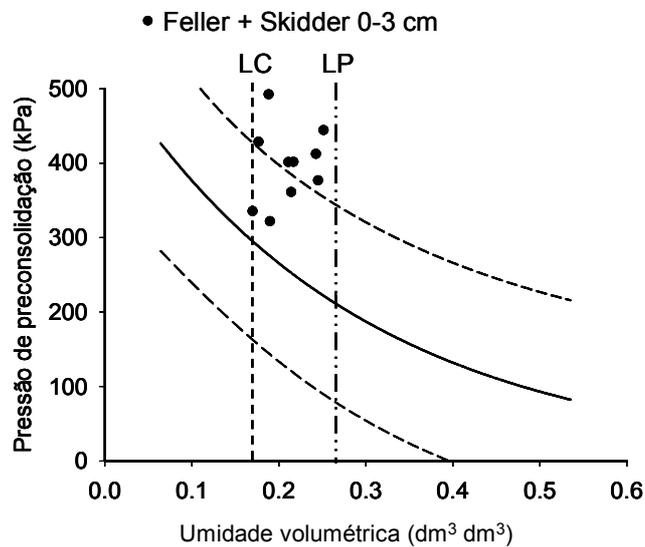


FIGURA 9 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0 a 0,03 m, com seus respectivos limites de contração (LC) e de plasticidade (LP). Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas após a operação de colheita feita por feller-buncher e baldeio feito por skidder.

Observa-se a ocorrência de compactação adicional na operação de colheita realizada por feller-buncher mais baldeio realizado por skidder, nas duas profundidades estudadas, na ocasião em que o conteúdo de água em ambas se encontravam dentro da ZF, confirmando o alerta feito por Kondo & Dias Junior (1999) sobre a possibilidade de ocorrência de compactação, mesmo o solo sendo trafegado na zona de friabilidade.

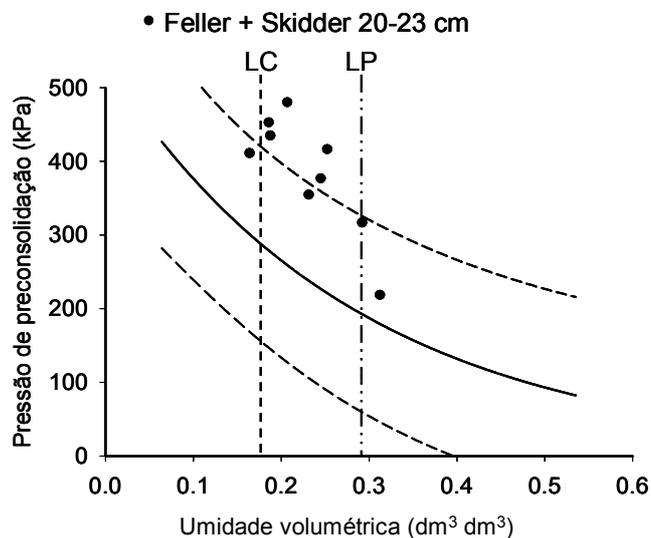


FIGURA 10 Modelo de capacidade de suporte de carga do LVAd na profundidade de 0,20 a 0,23 m, com seus respectivos limites de contração (LC) e de plasticidade (LP). Os pontos representam as pressões de preconsolidação determinadas após a operação de colheita feita por feller-buncher e baldeio feito por skidder.

Assim sugere-se que, na definição da ZF do solo, sejam considerados os níveis de pressões delimitados pela curva de pressão de preconsolidação versus umidade, para que a compactação adicional não ocorra nessa faixa de umidade do solo concordando com Kondo (1999).

As operações realizadas com o feller-buncher foram as que menos degradaram a estrutura do solo, tanto na superfície quanto na subsuperfície, se comparadas às operações realizadas com o feller-buncher e skidder, que foram as que mais degradaram a estrutura do solo, nas duas profundidades.

As operações de colheita realizadas com o feller-buncher abrangem posições mais definidas e menor área, e os impactos causados por essa máquina são sistemáticos, enquanto os causados pelas operações com o skidder não são sistemáticos, pois apresentam distribuição aleatória e abrangem maior área.

Os resultados mostrados na Tabela 4 sugerem que, nos próximos anos, o tráfego de máquinas nesses sistemas seja realizado levando em consideração a capacidade de suporte de carga das profundidades estudadas. Caso contrário, certamente, a pressão de preconsolidação do solo será superada, resultando na ocorrência de compactação adicional dessas camadas.

É recomendada, portanto, a adoção de medidas preventivas, a fim de evitar a compactação do solo por meio do manejo da colheita mecanizada, incluindo o controle do nível de pressão por eixo das máquinas (Kondo & Dias Junior, 1999) ou, ainda, o tráfego sobre restos culturais e galhadas, além do uso da modelagem da compactação para quantificação dos impactos causados pelo tráfego de máquinas.

4 CONCLUSÕES

1. Os efeitos das operações de colheita florestal mecanizadas na cultura do eucalipto foram quantificados pelo modelo de capacidade de suporte de carga.

2. Os resultados evidenciam que a compactação do solo pode ocorrer na zona de friabilidade do solo, caso sejam aplicadas ao solo pressões maiores do que a sua capacidade de suporte de carga.

3. A operação de colheita do eucalipto realizada pelo feller-buncher e baldeio feito pelo skidder se apresentou como sendo a mais impactante para a estrutura do solo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distroférico sob sistema de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 515-522, 2005.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science of American Journal**, Madison, v.61, p.390-398, 1997.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1986. p.363-375.

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

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 em Engenharia de Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils long-term tillage and Wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (PhD. in Crop and Soil Science)-Michigan State University, East Lansing.

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JUNIOR, C. F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p.257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest Operations. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.248-255, May/June 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 175-182, 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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 6. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de pesquisas de Solos, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

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

IMHOFF, 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, MG, v. 25, p.11-18, 2001.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 p. Mestrado (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

LARSON, W. E.; GRUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight orders. **Soil Science of American Journal**, Madison, v. 44, p. 450-457, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 275-286, 1991.

SILVA, R. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes intensidades e uso na região dos cerrados**. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DOS IMPACTOS CAUSADOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE EUCALIPTO POR MEIO DOS MODELOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

RESUMO

A mecanização constitui a principal causa da compactação em solos florestais, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego, determinando as relações entre ar, água e temperatura, que influenciam a produtividade de culturas como a do eucalipto. Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do LVAd, por meio das envoltórias de resistência ao cisalhamento. Após as operações de colheita do eucalipto, foram feitas amostragens de solo. Assim, três tratamentos foram avaliados: FE) faixa ecológica, há 15 anos sem sofrer tráfego de máquinas; F) colheita feita por feller-bunchers de disco e FS) colheita feita por feller-bunchers de disco e baldeio da madeira feito por skidder. Coletaram-se amostras indeformadas nas profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m. O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em amostras de solo saturadas e em amostras equilibradas na tensão de 33 kPa. Tanto para as amostras equilibradas a 33 kPa quanto para as amostras saturadas, os resultados demonstraram que a alteração da estrutura está ocorrendo nas duas profundidades avaliadas, quando a colheita é realizada com o feller-buncher e baldeio feito pelo skidder, demonstrando que essa operação é a mais impactante para a estrutura do solo.

ABSTRACT

Mechanization is the main cause of the soils forest compaction, both by soil disturbance, as by the traffic, determining the relationship among air, water and temperature, which influence the productivity of crops such as eucalyptus. The objective of this study was to determine which forest harvest operation promotes greater degradation of the LVAd structure through the shear strength models. After the eucalyptus harvesting operations, the soil was sampled. Three treatments were evaluated: FE) ecological strip for 15 years without suffering machinery traffic; F) harvest done by feller-buncher with disk; FS) harvest done by feller-buncher with disk and transportation of the wood made by skidder. Undisturbed soil samples were collected at 0 to 0.03 m and 0.20 to 0.23 m depths. The direct shear test was performed on saturated soil samples and in soil samples equilibrated to the 33 kPa tension. As for the soil samples equilibrated at 33 kPa and for the saturated samples, the results showed that the change in structure is occurring in the two depths when the harvest is done with feller-buncher and the transportation made by skidder, showing that these operations were the ones that more impacted the soil structure.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com a expansão do setor florestal e com programas de incentivo ao reflorestamento, observou-se crescente utilização de máquinas florestais, desde o preparo até a colheita, além de aumento no peso e na potência dos tratores (Mantovani, 1987). Isso contribuiu para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente devido à falta de um cronograma de trabalho que leve em consideração as condições físicas do solo.

O peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, não sendo acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e da largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Além disso, com a adoção de sistema de rebrota em áreas florestais, o solo não sofre revolvimento e a compactação não é minimizada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos (Streck et al., 2004).

As especificações da máquina, como tipo de rodado e pressão de inflação dos pneus, bem como peso da máquina e as operações que ela realiza, são de grande importância para evitar ou minimizar a compactação. Máquinas que realizam várias operações de uma só vez evitam o tráfego intenso na área.

A mecanização constitui a principal causa da compactação em solos florestais, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego, determinando as relações entre ar, água e temperatura que influenciam a produtividade de culturas como o eucalipto (Letey, 1985; Silva et al., 2004).

A estimativa é que as pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas florestais se situem entre 50 e 300 kPa (Lebert & Horn, 1991; Silva et al., 2004).

A resistência ao cisalhamento, variável ainda pouco considerada nas atividades florestais brasileiras, é considerada, por Baver et al. (1960), como sendo uma das principais propriedades dinâmicas dos solos, uma vez que

correlacionam com densidade do solo, resistência à penetração, porosidade e grau de intemperismo (Rocha et al., 2002).

Esses autores relatam, ainda, que a resistência ao cisalhamento pode ser obtida em diferentes ensaios, porém, consideram o mais operacional o cisalhamento direto, pela rapidez na obtenção dos resultados. Para determinar a resistência de um solo ao cisalhamento é necessário aplicar diferentes cargas normais a uma amostra indeformada de solo e verificar o esforço necessário para levar esse solo à ruptura.

A resistência ao cisalhamento, segundo Rocha et al. (2007), é precisa na detecção de alteração estrutural do solo, pois, quando se avalia a dinâmica do tráfego de máquinas, os parâmetros da resistência do solo ao cisalhamento, por serem caracterizados pela combinação das forças tangenciais e normais, refletem com mais exatidão a dinâmica das forças sobre o solo.

Diante desses fatores, o presente estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual operação de colheita florestal promove maior degradação da estrutura do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) por meio das envoltórias de resistência ao cisalhamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em florestas de *Eucalyptus* spp., em áreas da empresa ArcelorMittal Energética – Jequitinhonha, no município de Itamarandiba, MG, a 18°40' S de latitude e 40°58' O de longitude. Segundo Köppen, o clima local é classificado como tropical de altitude, com índice pluviométrico anual que ultrapassa os 1.114 mm, clima ameno, com temperatura mínima anual de 15°C e a média anual de 20°C.

Os solos das áreas experimentais foram classificados, segundo Embrapa (2006), como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, muito argiloso (LVAd).

Para a coleta de amostras, foram demarcadas 3 parcelas de 36 m de comprimento e 4 m de largura, que correspondem à entrelinha de 12 árvores de eucaliptos. A colheita mecanizada foi realizada com o feller-buncher de disco marca HydroAx modelo 611E (capacidade = 0,9 t/cabeçote; tara = 14,0 t) e a extração da madeira foi feita com o skidder marca Caterpillar modelo 518C (capacidade = 3,6 t; tara = 12,5t).

O feller-buncher corta e amontoa as árvores em feixes compatíveis com a capacidade da garra do skidder. Após o corte, é feita a operação manual de desgalhamento, ocorrendo a seguir o arraste das toras longas pelo skidder até o carreador. A movimentação do skidder no talhão é feita de maneira aleatória, sem se restringir ao tráfego entre linhas das árvores.

As áreas amostradas apresentam diferentes manejos e operações de colheita, nas quais formam diferentes ambientes que caracterizaram os tratamentos estudados. Assim, três tratamentos foram avaliados: FE) faixa ecológica, há 15 anos sem sofrer tráfego de máquinas; F) colheita feita por feller-buncher de disco e FS) colheita feita por feller-buncher de disco e baldeio da madeira feito por skidder.

Para o ensaio de cisalhamento direto, em cada condição de manejo, realizaram-se coletas na linha de tráfego das máquinas florestais, totalizando 192 amostras indeformadas (32 amostras x 3 manejos x 2 profundidades). Para a escolha das profundidades, considerou-se a camada superficial na profundidade de 0 a 0,3 m e a camada de 0,20 a 0,23 m, por ter sido esta a profundidade que apresentou, em estudos preliminares, maior resistência à penetração.

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando amostradores especialmente desenvolvidos para ensaios de cisalhamento direto em anéis quadrados com dimensões de 5,95x 5,95 cm e 3 cm de altura (Rocha, 2003).

Em cada ponto de amostragem foram coletadas 4 amostras (Figura 1), para que se pudesse construir a envoltória de resistência ao cisalhamento, uma vez que, neste ensaio, a estrutura da amostra é comprometida, sendo necessária a realização do ensaio com 4 tensões normais distintas. Assim, cada amostra deste conjunto foi cisalhada com diferentes tensões normais na mesma umidade.

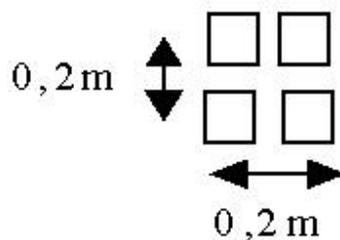


FIGURA 1 Esquema de coleta das amostras.

Fonte: Rocha (2002).

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em amostras de solo saturadas e em amostras equilibradas na tensão de água de 33 kPa. A escolha dessas condições de umidade visa obter a resistência ao cisalhamento do solo em

uma condição de baixa e alta umidade, para analisar os impactos causados pela operação de colheita florestal nas épocas chuvosa e seca.

Para a condução do ensaio de cisalhamento direto, utilizou-se uma prensa de cisalhamento fabricada pela ELE International (Digital Shear Machine, 26-112 - 9901X0089). O equipamento opera com velocidade de deslocamento horizontal de $3,33 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ e tensões normais de 194, 304, 415 e 526 kPa. A escolha dessas tensões normais se deu em função das tensões aplicadas pelas máquinas florestais.

A calibração do equipamento consiste em colocação do braço de alavanca onde são aplicadas as cargas verticais na horizontal com a finalidade de evitar possíveis variações angulares quando da aplicação das cargas e a calibração do anel dinamométrico. A constante do anel dinamométrico também foi aferida para diferentes cargas aplicadas, uma vez que este valor influencia o cálculo e a correção da força horizontal aplicada na amostra de solo (Rocha, 2002).

Após a calibração da prensa, aplica-se uma força vertical (a qual, dividida pela área de contato, fornece a tensão normal) e, a seguir, passa-se a aplicar uma força horizontal crescente em uma das extremidades da caixa, provocando o deslocamento de uma parte em relação à outra. O esforço resistente a este deslocamento é a sua resistência ao cisalhamento, em função da força vertical aplicada e da umidade.

O resultado deste ensaio é registrado numérica e graficamente pela variação da tensão de cisalhamento, em função da deformação (Terzaghi et al., 1997). Valores de variação volumétrica da amostra também são obtidos por meio de extensômetros instalados na prensa de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento da ruptura é, geralmente, considerada como a maior tensão de cisalhamento resistida pelo corpo de prova, embora, em casos especiais, ela possa ser considerada como a tensão para uma certa deformação

ou a tensão residual após longo deslocamento (Vargas, 1989). A tensão normal e a tensão de cisalhamento na ruptura determinam a envoltória de resistência. Esta envoltória pode ser determinada pelos resultados de uma série de ensaios de cisalhamento direto, com diferentes tensões normais.

Dessa forma, as envoltórias de resistência ao cisalhamento foram obtidas pela combinação dos pares de dados: tensões cisalhantes e tensões normais.

Após a determinação da tensão cisalhante máxima e da tensão normal aplicada, a envoltória de resistência foi traçada, obtendo-se o ângulo de atrito interno e o intercepto de coesão que representa a coesão aparente dos solos.

As envoltórias de resistência ao cisalhamento foram geradas com o auxílio do software Sigma Plot e as comparações dessas envoltórias foram feitas segundo o procedimento descrito por Snedecor & Cochran (1989).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As envoltórias de resistência ao cisalhamento do LVAd submetido a diferentes manejos e operações mecanizadas, de amostras equilibradas na tensão de água no solo de 33 kPa para as profundidades de 0 a 0,03 m e 0,20 a 0,23 m, estão apresentadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

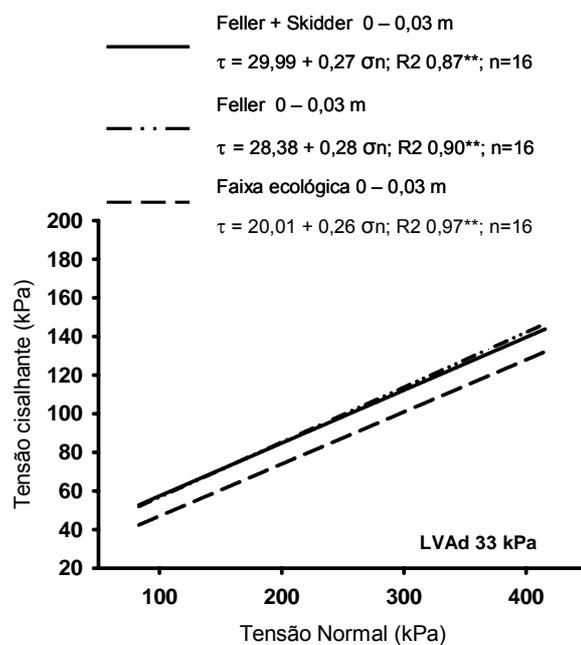


FIGURA 1 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras de solo equilibradas à tensão de água de 33 kPa, na profundidade de 0 a 0,03 m.

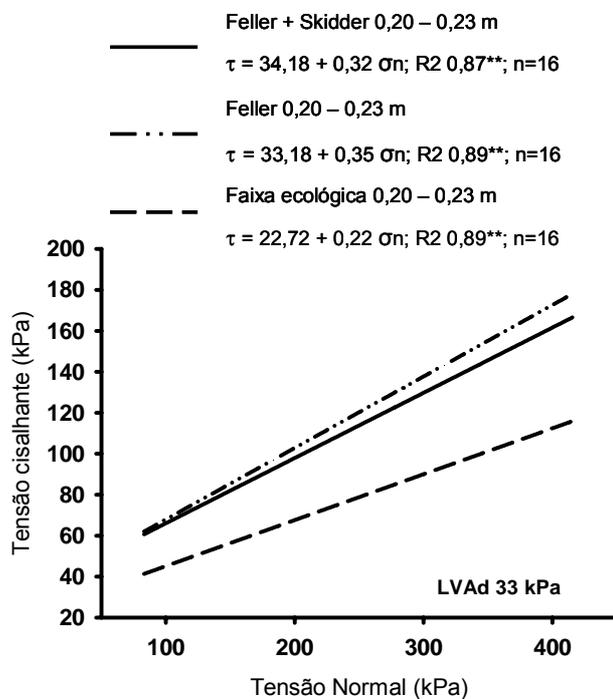


FIGURA 2 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras de solo equilibradas à tensão de água de 33 kPa, na profundidade de 0,20 a 0,23 m.

Na Tabela 1 é apresentado o resumo da análise estatística das envoltórias de resistência ao cisalhamento do LVAd a 33 kPa, nos diferentes manejos e operações mecanizadas.

TABELA 1 Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) (teste F) entre as envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho–Amarelo distrófico com amostras equilibradas a 33 kPa, nas profundidades de 0 a 0,03 e 0,20 a 0,23 m.

Manejo	F	F	
		Coefficiente angular	Coefficiente linear
0 – 0,03 m			
Feller e Feller + Skidder	H	NS	NS
Feller e Faixa ecológica	NH	NS	*
Feller + Skidder e Faixa ecológica	NH	NS	**
0,20 – 0,23 m			
Feller e Feller + Skidder	H	NS	NS
Feller e Faixa ecológica	NH	NS	*
Feller + Skidder e Faixa ecológica	NH	NS	*

H: homogêneo; NH: não homogêneo; NS: não significativo; *:significativo (P<0,05); **:significativo (P<0,01).

As envoltórias de resistência ao cisalhamento do LVAd, em ambas as profundidades, para faixa ecológica (FE), diferiram estatisticamente dos demais tratamentos: colheita feita por feller-buncher e baldeio feito por skidder (FS) e colheita feita por feller-buncher (F). Para os manejos colheita feita por feller-buncher e baldeio feito por skidder (FS) e colheita feita por feller-buncher (F) não houve diferença estatística, portanto, uma nova equação foi ajustada a todos os valores de tensão cisalhante e normal (Figura 3 e 4).

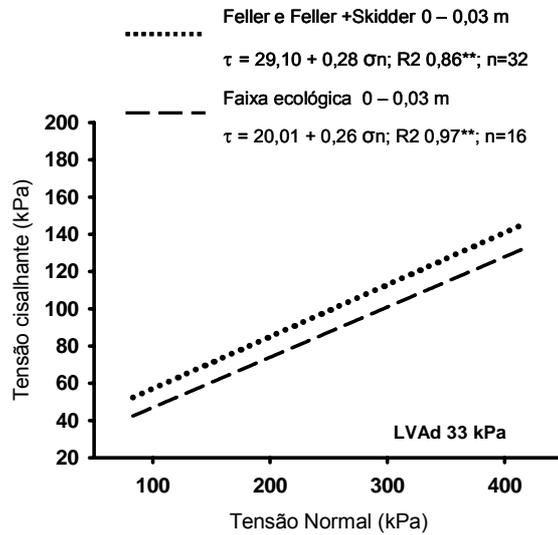


FIGURA 3 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras de solo equilibradas à tensão de água de 33 kPa, na profundidade de 0 a 0,03 m.

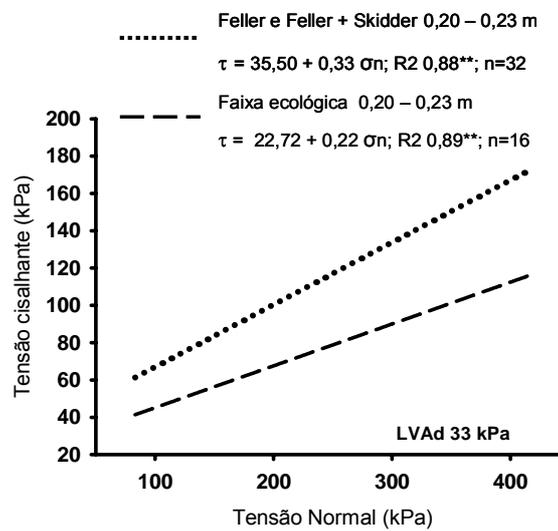


FIGURA 4 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras de solo equilibradas à tensão de água de 33 kPa, na profundidade de 0,20 a 0,23 m.

O manejo FE, nas duas profundidades, apresentou menor resistência ao cisalhamento (Figuras 3 e 4) em relação aos demais manejos, em ambas as profundidades. Considerando a faixa ecológica como referência em qualidade estrutural, essa menor resistência observada é um indicativo de que os demais manejos causam alterações na estrutura do solo, devido à compactação promovida pelas atividades mecanizadas, concordando com Azevedo (1999). Este autor relata que solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento em razão da menor distância entre as partículas, o que reflete em uma maior coesão aparente.

Nas duas profundidades, observou-se que os manejos FS e F apresentaram maior resistência ao cisalhamento (Figura 4) em relação ao manejo FE, indicando que tais manejos causam alterações na estrutura do solo, pois apresentam um maior valor de coesão aparente (c). O ângulo de atrito interno (ϕ) não foi significativo estatisticamente (Tabela 2). Esses resultados demonstram que, na área estudada, a alteração da estrutura não está ocorrendo somente na profundidade de 0 a 0,03 m, mas também na profundidade de 0,20 a 0,23 m.

TABELA 2 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto com as amostras equilibradas à tensão de água de 33 kPa, nas profundidades de 0 a 0,03 e 0,20 a 0,23m.

Manejos	Ângulo de atrito interno (ϕ)	Coesão aparente (c) (kPa)
0 – 0,03 m		
FS e F	15,64	29,10
FE	14,57	20,01
0,20 a 0,23 m		
FS e F	18,26	33,50
FE	12,40	22,72

A maior resistência ao cisalhamento conferida nos manejos F e FS deve-se ao tráfego de máquinas e à intervenção mecânica a que esta área foi submetida, como evidenciado pelo seu histórico de manejo.

As envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras saturadas coletadas nas profundidades de 0 a 0,03 e 0,02 a 0,23 m, respectivamente, estão representadas nos gráficos das Figuras 5 e 6.

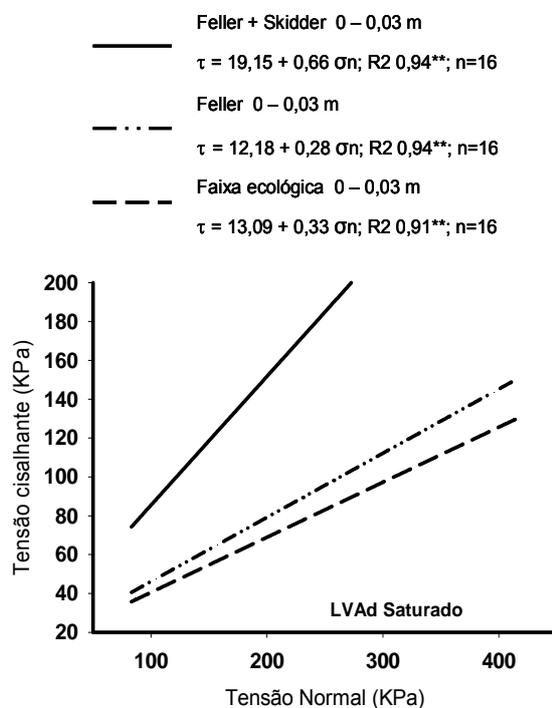


FIGURA 5 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras saturadas, na profundidade de 0 a 0,03 m.

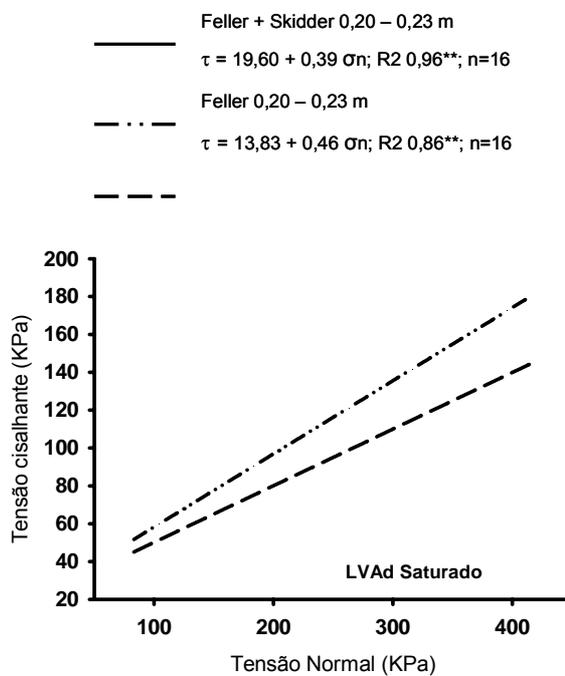


FIGURA 6 Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um LVAd submetido a diferentes manejos, com amostras saturadas, na profundidade de 0,20 a 0,23 m.

Na Tabela 3 é apresentado o resumo da análise estatística das envoltórias de resistência ao cisalhamento do LVAd com amostras saturadas, nos diferentes manejos e operações mecanizadas com as respectivas profundidades.

TABELA 3 Teste de significância de acordo com Snedecor & Cochran (1989) (teste F) entre as envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho–Amarelo distrófico com amostras saturadas, nas profundidades de 0 a 0,03 e 0,20 a 0,23 m.

Manejo	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
0 – 0,03 m			
Feller vs Feller + Skidder	NH	**	*
Feller vs Faixa ecológica	NH	NS	NS
Feller + Skidder vs Faixa ecológica	NH	**	*
0,20 – 0,23 m			
Feller vs Feller + Skidder	NH	NS	**
Feller vs Faixa ecológica	NH	NS	*
Feller + Skidder vs Faixa ecológica	NH	NS	*

H: homogêneo; NH: não homogêneo; NS: não significativo; *:significativo (P<0,05); **:significativo (P<0,01).

Nesse caso, todas as envoltórias diferiram estatisticamente, mantendo-se cada tratamento com uma envoltória de resistência ao cisalhamento.

De modo geral, observa-se a mesma tendência para os manejos FS e F, com maiores valores de coesão aparente quando comparados com o manejo FE (Figuras 5 e 6). O ângulo de atrito interno e a coesão apresentaram variação em função da tensão de água no solo, se apresentando maiores à medida que o solo se encontrava mais seco. A ordem decrescente de resistência ao cisalhamento dos manejos estudados para as duas profundidades foi: FS>F>FE.

Nota-se, nas análises realizadas em amostras saturadas, que o tráfego de máquinas contribuiu para um aumento na resistência ao cisalhamento do solo, devido à compressão do solo causada pelo impacto dos rodados.

TABELA 4 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto com as amostras saturadas nas profundidades de 0 a 0,03 e 0,20 a 0,23m.

Manejos	Ângulo de atrito interno (ϕ)	Coesão aparente (c) (kPa)
0 – 0,03 m		
FS	33,42	19,15
F	18,26	13,09
FX	15,64	12,18
0,20 a 0,23 m		
FS	21,30	13,83
F	16,69	19,60
FX	25,17	5,59

O alívio da resistência mecânica promovido pela saturação induzida em laboratório contribuiu para que os valores da coesão aparente (c) para as amostras saturadas (Tabela 4) se apresentassem menores, comparado às amostras equilibradas à tensão de água de 33 kPa (Tabela 2).

O efeito da água sobre o ângulo de atrito interno está associado ao efeito lubrificante que a água exerce quando recobre as partículas sólidas. Assim, à medida que a tensão aplicada sobre a água do solo aumenta, os filmes de água existentes sobre as partículas vão se desfazendo, reduzindo seu efeito lubrificante e, portanto, aumentando o atrito entre as mesmas.

4 CONCLUSÕES

1. A resistência ao cisalhamento e seu uso possibilitaram analisar a sustentabilidade estrutural do LVAd.

2. A operação de colheita do eucalipto realizada pelo feller-buncher e baldeio feito pelo skidder foi a mais impactante para a estrutura do solo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa - MG.** 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics.** 4.ed. New York: J. Wiley, 1960. 229p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. 212 p.

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

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop reduction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

MANTOVANI, E. S. Compactação do Solo. **Informativo Agropecuario**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p.52-55, mar. 1987.

ROCHA, W. W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG.** 2003. 101 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ROCHA, W. W.; BORGES, S. R.; VICTORIA, E. P.; NUNES, A. H.B. Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In: ABREU, M.H.N (Org.). **Ciências ambientais: abordagem multidisciplinar.** Belo Horizonte: UEMG, 2007. p. 87-124.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 165-173, 2004.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods.** 8.ed. Ames: Iowa State University, 1989.503p.

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

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 509 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 499 p.