



MODELAGEM DA RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO E O IMPACTO DE OPERAÇÕES AGRÍCOLAS EM ÁREAS FLORESTAIS⁽¹⁾.

Reginaldo Barboza da Silva⁽²⁾; Piero Iori⁽³⁾; Jesod Munoz Moya⁽⁴⁾; Ricardo Nakamura⁽⁵⁾; Francisca Alcivania de Melo Silva⁽³⁾ e Zigomar Menezes de Souza⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do CNPq (Processo nº 302919/2011-2) e Suzano Papel e Celulose.

⁽²⁾ Professor do curso de Agronomia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bolsista produtividade do CNPq; Registro, São Paulo; rbsilva@registro.unesp.br; ⁽³⁾ Professor do curso de Agronomia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; ⁽⁴⁾ Estudante de Agronomia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; ⁽⁵⁾ Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; ⁽⁶⁾ Professor do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

RESUMO: A resistência ao cisalhamento (RC), propriedade dinâmica do solo de aplicação fundamental em estudos de mecânica do solo, pode constituir-se em importante indicador da avaliação estrutural dos solos agrícolas. O trabalho teve como objetivo quantificar o impacto (negativo e, ou positivo) da intensidade de tráfego/operações agrícolas sobre a resistência ao cisalhamento de duas classes de solo em áreas florestais. A pesquisa foi realizada em Unidades Florestais da empresa Suzano Papel e Celulose (Itararé, SP). A avaliação do impacto considerou essencialmente a ação dos equipamentos e rodados dos conjuntos motomecanizados sobre a estrutura do solo da camada superficial (0 a 0,10 m) na umidade de campo ($\theta_{\text{médio}} = 0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), para cinco intensidades de tráfego/operações agrícolas seguintes: i) colheita (Co); ii) baldeio com Forwader (BFW); iii) baldeio com trator autocarregado (BTA); iv) linha de tráfego (LT) e v) linha de plantio (LP), condição sob menor impacto ou alívio das tensões provocadas pelas subsolagem, sendo, portanto, considerada a condição de referência na pesquisa. Os ensaios foram realizados *in situ*, utilizando-se do método torcional e considerou quatro níveis de tensão normal (σ_n): 162, 325, 487 e 650 KPa. Os resultados evidenciam o impacto das diferentes condições de intensidade de tráfego/operações agrícolas empregadas no cultivo do eucalipto sobre a RC. Tanto as envoltórias, quanto os parâmetros de coesão (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) revelam o impacto negativo da operação do baldeio (BFW e BTA), seguido da operação da colheita..

Termos de indexação: atrito do solo, coesão, eucalipto.

INTRODUÇÃO

No setor florestal a intervenção da mecanização em busca de procedimentos mais eficientes, que vão do preparo à colheita, apesar da sua contribuição inquestionável, também causa danos

irreparáveis à estrutura do solo. O problema mais recorrente é o processo de compactação e as consequências a ele associados. Em um estágio mais avançado, está a ruptura do solo, que quando não desejável leva à depauperação da estrutura, especialmente quando as ferramentas de preparo não consideram a capacidade de suporte de carga (CSC) e superam a resistência do solo ao cisalhamento (ruptura).

Quando se trata de ruptura, os estudos dos solos agrícolas não deveriam desconsiderar a estimativa da resistência do solo ao cisalhamento (RC) e os parâmetros a ela associada. Trata-se de uma propriedade dinâmica e importante em estudos na interação máquina-solo (Baver et al., 1960).

A determinação da resistência do solo ao cisalhamento é feita por meio dos parâmetros intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ) (Cooper & Nichols, 1959), cujos valores variam consideravelmente de acordo com o teor de água, tamanho das partículas, preparo do solo, dentre outros (Terzaghi et al., 1996). Segundo estes autores esses dois parâmetros podem ser estimados pela equação empírica de Coulomb $\tau = c + \sigma_n \text{tg}\phi$, em que τ é a tensão cisalhante (kPa), c é o intercepto de coesão (kPa), σ_n é a tensão normal (kPa) e $\text{tg}\phi$ é o coeficiente de atrito, cujo arco tangente é o ângulo de atrito interno do solo.

Dentre os métodos existentes, o torcional (tangencial), apesar de não ser o mais divulgado (Lambe, 1951), deveria pela sua simplicidade e possibilidade de avaliação *in situ* (vai depender do equipamento) ser mais largamente utilizado e constituir-se em importante alternativa de ensaio para determinar os parâmetros c e $\text{tg}\phi$ e, por conseguinte, da resistência do solo ao cisalhamento. Larney & Kladvko (1989) verificaram que a resistência ao cisalhamento determinada, usando "vane shear test", foi significativamente aumentada na superfície em solos cultivados com arado de aivecas. Munkholm et al. (2001) verificaram incrementos significativos na coesão aparente em solos sob cultivo mínimo, quando



comparados aos valores de cisalhamento avaliados no sistema de convencional.

Considerado o exposto, foi objetivo deste trabalho, quantificar o impacto da intensidade de tráfego/operações agrícolas, por meio da resistência ao cisalhamento, de duas classes de solo em áreas de unidade florestais.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área

A pesquisa foi realizada na Fazenda Santana, UP 54C226, em áreas de Unidades Florestais da empresa Suzano Papel e Celulose (Itararé, SP), localizadas nas seguintes classes de solos: i) ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico, A moderado, textura média/argilosa, fase concrecionária, relevo ondulado (PVAd5) de 7,52 há; ii) LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado ou proeminente, textura argilosa, álico, relevo plano a suavemente ondulado (LVd2) de 5,6 ha.

O povoamento florestal é proveniente de clone híbrido de *Eucalyptus grandis*, com idade média de 7,36 anos, sendo o último ciclo plantado no período de 09 a 23 de maio de 2007. De acordo com inventário de 2013 a produtividade média foi de $64,10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O preparo do solo consistiu de uma operação com subsolador na profundidade de 40 cm utilizando um Trator 7020 com massa de 5.250kg e Subsolador com massa de 1.700kg, associada com a adubação de base. A colheita (Co) consistiu de corte e processamento mecanizado, executado com a Escavadeira Florestal Komatsu, PC 200F provida com cabeçote processador 378E, cuja massa do conjunto é de aproximadamente 22 toneladas. O baldeio foi realizado com equipamento do tipo Forwarder Komatsu 890.3 (BFW) e Trator (com massa total de 8.500 Kg) mais um conjunto Autocarregavel Florestal TMO AC7612 com massa total de 6.850 Kg (BTA).

Tratamentos e condições experimentais

Os tratamentos e, ou condições experimentais foram definidas em função dos seguintes fatores: a) Classes ou grupamentos de solo (PVAd5 e LVd2). b) Intensidades de tráfego: a avaliação do impacto da intensidade tráfego considerou essencialmente a ação dos rodados dos conjuntos motomecanizados em suas respectivas operações agrícolas para as cinco condições seguir: i) colheita (Co); ii) baldeio com Forwarder (BFW); iii) baldeio com trator autocarregado (BTA); iv) linha de tráfego (LT), cujos

efeitos do tempo de cultivo (média de 7 anos) guardaram a memória da tensão acumulada advinda de todas às operações necessárias às boas práticas da cultura e v) linha de plantio (LP), condição sob menor impacto ou alívio das tensões provocadas pelas subsolagem.

Sabido da alta plasticidade (elevados teores de argila) dos dois grupamentos de solos e, portanto, a elevada suscetibilidade à compactação e alteração estrutural em função do conteúdo d'água, a avaliação do impacto considerou essencialmente a ação dos rodados dos conjuntos motomecanizados sobre a estrutura do solo da camada superficial (0 a 0,10 m) na umidade de campo ($\theta_{\text{médio}} = 0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), determinados *in situ*, por meio do sensor de umidade ML2X da Delta –T Devices Ltda.

Ensaio de cisalhamento

As avaliações de resistência do solo ao cisalhamento foram feitas *in situ* pelo método tangencial, utilizando-se o equipamento denominado cisalhômetro (**Figura 1**), desenvolvido por Silva & Lanças (2006).

O procedimento consistiu em cravar o prato cisalhante nº 2 (área total de $23,75 \text{ cm}^2$ e área cisalhante de $11,9 \text{ cm}^2$, definida pela porção de solo contida pelas *aletas* dispostas em 145°) e submetê-lo ao torque necessário para cisalhar (cortar) o solo por rotação. Para construção das envoltórias de Coulomb, quatro níveis conhecidos de tensão normal ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ e σ_4) foram aplicados: 162; 325; 487 e 650 KPa, os quais possibilitaram quantificar em resposta ao esforço aplicado ao solo, quatro tensões de cisalhamento, isto é, τ_1, τ_2, τ_3 e τ_4 .

A partir do conjunto de tensões normal e de cisalhamento ($\sigma_1; \tau_1$) foram construídas as envoltórias de resistência de Coulomb e ajustado às respectivas equações de acordo com o modelo: $\tau = c + \sigma_n \cdot tg\phi$, onde τ é a tensão cisalhante (kPa), c é o intercepto de coesão (kPa), σ_n é a tensão normal (kPa) e $tg\phi$ é o coeficiente de atrito, cujo arco tg é o ângulo de atrito interno do solo.

Análise estatística

Na comparação entre as médias dos parâmetros de c e ϕ , quando o valor de F foi significativo, procedeu-se com o teste de Scott-Knott (1974), com $P < 0,05$ de probabilidade. A comparação entre as equações geradas para as envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento foi feita utilizando-se de rotinas e planilhas eletrônicas dos procedimentos sugeridos por Snedecor & Cochran



(1989).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **figura 2** são apresentadas as equações ajustadas, de acordo com a sugestão de Coulomb de todas as condições de intensidade de tráfego/operações agrícolas investigadas nesta pesquisa. Notadamente, a envoltória obtida para linha de plantio (LP) descreve uma menor resistência, enquanto o baldeio com forwader (BFW) descreve uma maior do solo ao cisalhamento, nas duas classes de solo e em todos os quatro níveis de tensão normal (σ_n) aplicados.

Tanto em PVAd5, quanto em LVd2, as envoltórias diferiram estatisticamente, segundo procedimento de Snedecor & Cochran (1989) (**Tabela 1**), possibilitando inferir a seguinte sequência de impacto sobre esta propriedade dinâmica do solo: BFW>BTA>Co>LT>LP.

Uma análise mais detalhada (Tabela 1), utilizando-se da ANAVA e da comparação por médias (Scott & Knott, com $p<0,05$) permite verificar que no PVAd5 a coesão aparente do solo (c) não diferiu estatisticamente entre as distintas condições de intensidade de tráfego e/operações agrícolas (LT, Co, BFW e BTA), quando comparada aos resultados obtidos na linha de plantio (LP), corroborando o impacto da trafegabilidade solicitado por estas operações sobre a estrutura do solo. Na classe de solo LVd2, as operações de colheita (Co) e baldeio (BFW) não diferiram, sendo superiores estatisticamente ao BTA e LT seguido de LP. De maneira geral, quando compara-se classes de solo, o PVAd5 possibilitou maiores valores médios de coesão (c), especificamente em BTA, BFW e LR, respectivamente.

Quanto ao ângulo de atrito interno do solo (ϕ), nota-se que em PVAd5 a operação do baldeio com forwader (BFW) foi o que mais impactou o acirramento das partículas deste solo, seguido pelo BTA e Co os quais não diferiram estatisticamente entre si e por último LT e LF que também não diferiram. O impacto das operações agrícolas sobre este parâmetros também é evidenciado no LVd5 em que as operação de baldeio (BTA e BFW) apresentaram os maiores valores médios, não diferindo da linha de tráfego (LT).

Quando são comparadas as classes de solo, notadamente o LVd2 apresenta os maiores valores médios de ϕ , com exceção nas operações de colheita (Co) e baldeio (BFW) que não diferiram estatisticamente.

As respostas diferentes entre classes de solo para este parâmetro (c) é explicado pela constituição e

caracterização dos atributos, intrínseco a cada solo, principalmente, teor de argila, silte e areia, MOS e o teor de água no solo. A constituição pedogenética do LVd2 confere a este solo uma maior suscetibilidade à compactação, portanto uma maior consolidação quando da distribuição de tensão provocada pela pressão de contato dos rodados, que invariavelmente, tem sido maior do a CSC dos solos.

CONCLUSÕES

Os Modelos de resistência ao cisalhamento do solo (envoltória de Coulomb), possibilitaram avaliar ao impacto das diferentes condições de intensidade de tráfego/operações agrícolas empregadas no cultivo do eucalipto, sobre esta propriedade dinâmica na camada superficial (0,0 a 0,10 m) das classes de solo PVAd5 e LVd2.

Tanto as envoltórias, quanto os parâmetros de coesão (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) evidenciaram o impacto negativo da operação do baldeio (BFW e BTA), seguido da operação da colheita.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de produtividade ao primeiro autor e a Suzano Papel e Celulose pelo apoio logístico dado à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil physics. Nova York: John Wiley, 1972. 498 p.
- COOPER, A.W. & NICHOLS, M.L. Some observations on soil compaction tests. *Agric. Eng.*, 40:264-267, 1959.
- LAMBE, W. T. The engineering behavior of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations. Division. ASCE (1655):* 1-34, 1958.
- LARNEY, F.J. & KLADIVKO, E.J. Soil strength properties under four tillage systems at three long-term study sites in Indiana. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1539-1545, 1989.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJONNING, P. & RASMUSSEN, K.J. Non-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. *Soil Till. Res.*, 62:1-14, 2001.
- SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics*, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512, 1974.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 8.ed. Ames, Iowa State University, 1989. 503p.
- TERZAGHI, K.; PERCL, R.B. & MESRI, G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3.ed. New York, John Wiley Sons, 1996. 549p.



Figura 1. UP 54C226, Fazenda Santana. Detalhes do ensaio de resistência do solo ao cisalhamento realizado in situ.

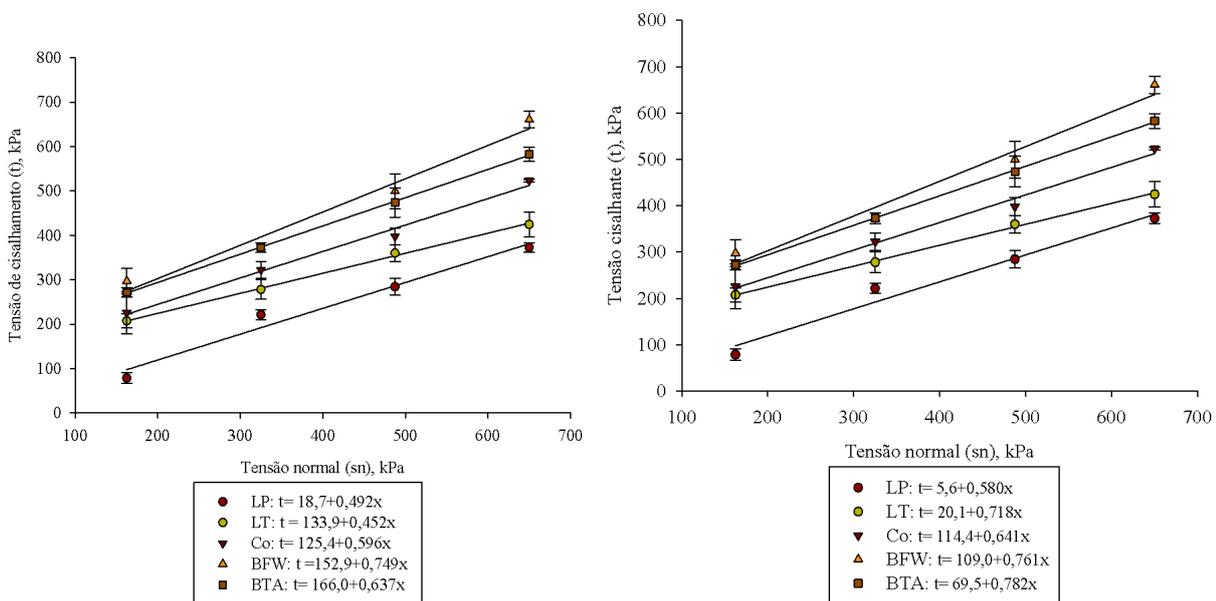


Figura 2. Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo da camada superficial (0,05 a 0,10 m) do PVA d5 (à esquerda) e do LV d2 (à direita), obtidas nas diferentes condições de intensidade de tráfego/operações agrícolas.

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros das envoltórias de Coulomb obtidos na camada superficial (0,05 a 0,10 m), para diferentes condições de intensidade de tráfego/operações agrícolas de duas classes de solo, em unidades florestais do estado de São Paulo.

Classe de solo	Intensidade de tráfego/operação agrícola				
	LP	LT	Co	BFW	BTA
	Coesão do solo (c), kPa				
LVd2	6 Ac	20 Bc	114 Aa	110 Ba	69 Bb
PVA d5	19 Ab	134 Aa	125 Aa	153 Aa	167 Aa
	Ângulo de atrito interno do solo (ϕ), °				
LVd2	30 Ab	36 Aa	33 Ab	37 Aa	38 Aa
PVA d5	26 Bc	24 Bc	31 Ab	37 Aa	32 Bb

Para cada parâmetro da envoltória de Coulomb, letras maiúsculas comparam classes de solo e letras minúsculas comparam operação agrícola, pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$).