



IPEF: FILOSOFIA DE TRABALHO DE UMA ELITE DE EMPRESAS FLORESTAIS BRASILEIRAS

ISSN 0100-3453

CIRCULAR TÉCNICA Nº 163

OUTUBRO 1988

COMPACTAÇÃO DO SOLO DEVIDO À MECANIZAÇÃO FLORESTAL: Causas, Efeitos e Práticas de Controle

Fernando Seixas*

INTRODUÇÃO

Compactação é o ato ou ação de forçar a agregação das partículas do solo e, por sua vez, reduzir o volume por elas ocupado. Ela pode ser descrita em termos da tensão aplicada no solo e as mudanças resultantes nas condições do mesmo. As mudanças que ocorrem nas propriedades físicas do solo incluem: aumento na densidade natural do solo; decréscimo no volume de macroporos; infiltração e movimento interno de água mais lentos; aeração mais pobre; e maior resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes.

A compactação máxima ocorre quando os solos estão na ou próximos da capacidade de campo, quando os microporos estão preenchidos com água e os macroporos com ar⁽¹⁾ (BAVER et alii, 1972). Esta condição causa baixa coesão e elevada lubrificação entre as partículas do solo. Como resultado, o solo é fluido o suficiente para facilitar a compactação.

A intensidade de compactação do solo vai depender da pressão exercida pelos pontos de apoio dos veículos, suas cargas e equipamentos, o número de vezes que os caminhos são atravessados e da textura e agregação do solo. A paisagem de máquinas e caminhões, muitas vezes de grande porte, sobre a área de cultivo pode alterar sensivelmente, em alguns casos, as características físicas do solo. Esses distúrbios devido ao tráfego podem ser o início de uma séria erosão, além de efeitos no "site" hidrológico e no desenvolvimento das plantas.

CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS

* Professor – Depto. de Ciências Florestais – ESALQ/USP

⁽¹⁾ Macroporos – poros que não conseguem reter água até à tensão de 1/3 de “bar”.

Microporos – retém água até à tensão de 1/3 de “bar”.

A mudança no estado de compactação resulta de uma variação no volume do solo quando este é submetido a uma força de compressão. Isto ocorre principalmente devido a uma reorganização das partículas do solo, conferindo-lhe um comportamento plástico (LAMBE, 1958). Esta plasticidade realmente se deve à reorganização das partículas, pois as demais alterações que ocorrem no solo durante a compressão são reversíveis. A compressão das micelas coloidais e compressão e movimentação de gases e líquidos participam apenas na mudança temporária do estado de compactação, ocorrendo, após processada a força, a expansão das micelas e dos gases, com o líquido (água) retornando aos espaços entre as partículas.

Segundo Bodman & Constantin (1965), Roney & Edminister (1955), citados por BACCHI (1976), os solos mais susceptíveis à compactação são os de textura média à moderadamente grosseira (francos, franco arenosos e franco siltosos)~ a maior facilidade de reorganização de suas partículas. Obviamente, os solos altamente porosos são os mais susceptíveis ao processo de compactação que os solos menos porosos.

Em geral, para condições parcialmente saturados, quanto maior o teor de umidade do solo maior será a compactação para uma dada pressão aplicada. Na prática este é um dos fatores mais importantes no manejo do solo e, segundo WEAVER (1950), a umidade ótima para execução das operações de preparo do solo coincide aproximadamente com o teor que proporciona a máxima compactação do solo. Deve-se procurar trabalhar à umidades mais baixas ou a utilização de máquinas que exerçam o mínimo de pressão possível sobre o solo.

Quanto ao tráfego de veículos, MILES, 1981, e FROEHLICH, 1978, concluíram que a densidade do solo aumentava consideravelmente durante as primeiras, passagens sobre o solo, passando depois a um aumento gradativo" principalmente se fosse removida a camada orgânica. TAVLOR et alii (1979) registraram que três quartos do total de aumento na densidade do solo após quatro passagens de uma máquina sobre um mesmo local, ocorriam após a primeira passagem.

A magnitude da influência dessas alterações pode ser avaliada em termos da capacidade de recuperação natural de um solo. Em um estudo com estradas utilizadas para exploração florestal abandonadas em North Caroline Piedmont, DRISSI (1975) estimou que seriam requeridos 18 anos para completa restituição dos 5 cm superiores do solo e que entre 50 a 60 anos seriam necessários para que a camada de 10 a 15 cm retornasse as suas condições originais.

Para ilustrar a influência da compactação sobre o desenvolvimento de essências florestais, são apresentadas a seguir duas tabelas que permitem exemplificar a resistência à penetração em relação a diferentes densidades e a capacidade de estabelecimento de raízes de espécies florestais em condições distintas de solos.

TABELA 1. Distribuição de tamanho de poros e resistência à penetração em tipos de solos com diferentes densidades naturais.

Densidade natural (g/m ³)	Tamanho de Poro		Resistência à penetração (“bar”)
	Macro (%)	Micro (%)	
	Franco-siltoso		
1.2	24.2	30.5	1.4
1.4	19.0	28.2	2.5
1.6	16.8	22.8	4.7
1.8	14.6	17.5	9.4
	Franco-arenoso		
1.2	41.2	13.5	0.6
1.4	28.9	18.3	1.2
1.6	23.7	15.9	2.4
1.8	18.6	13.5	3.7

FONTE: ZISA et alii (1980)

TABELA 2. Percentual de estabelecimento e profundidade de penetração de raízes de três espécies florestais em diferentes penetrabilidades de solo.

Resistência à penetração (“bar”)	Pitch Pine	Australian Pine	Norway Spruce
	Estabelecimento (%)		
0.6	92.5	75.0	73.6
1.2	87.5	79.8	87.5
1.4	91.2	76.7	75.0
2.4	90.0	75.0	77.8
2.5	86.2	83.4	91.5
3.7	88.7	76.7	79.1
4.7	87.5	63.3	68.0
9.4	56.3	45.0	53.4
	Penetração de raízes (cm)		
0.6	15.0	16.0	14.3
1.2	15.0	13.7	13.0
1.4	13.6	15.0	13.8
2.4	7.6	7.7	6.2
2.5	3.9	4.6	2.8
3.7	2.2	2.6	1.6
4.7	2.8	2.5	1.5
9.4	1.4	1.2	1.5

FONTE: ZISA et alii (1980)

Ilustrando as tabelas acima são colocadas as figuras representativas do crescimento alcançado pelas mudas de pinheiro austríaco em relação às diferentes densidades e tipos de solo.

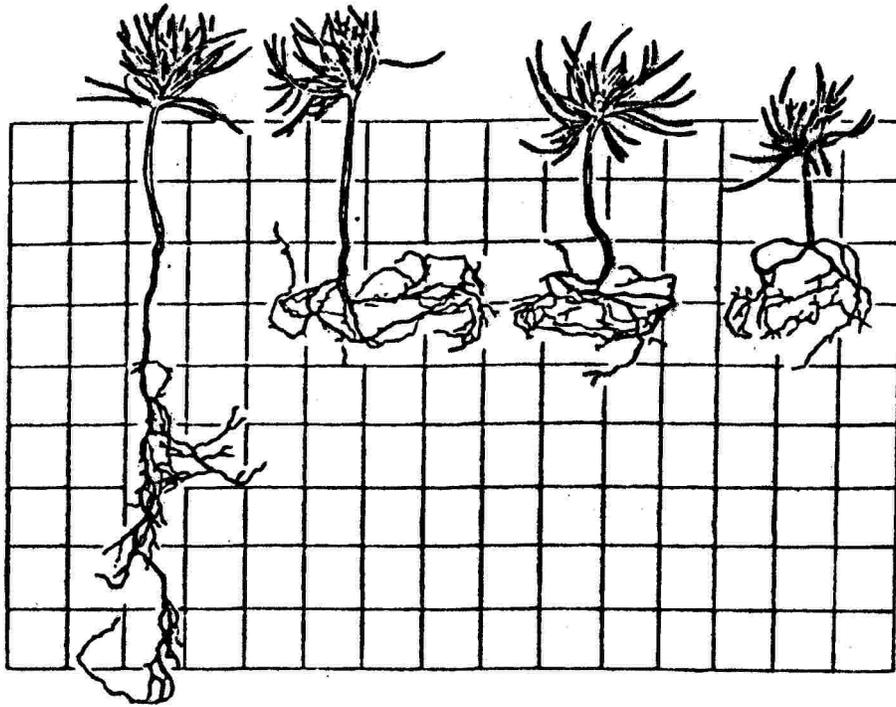


FIGURA 1. Efeito da densidade aparente a 1.2, 1.4, 1.6 e 1.8 g.cm⁻³ no crescimento de mudas de pinheiro austríaco em solo franco siltoso (2 cm de “gride”).

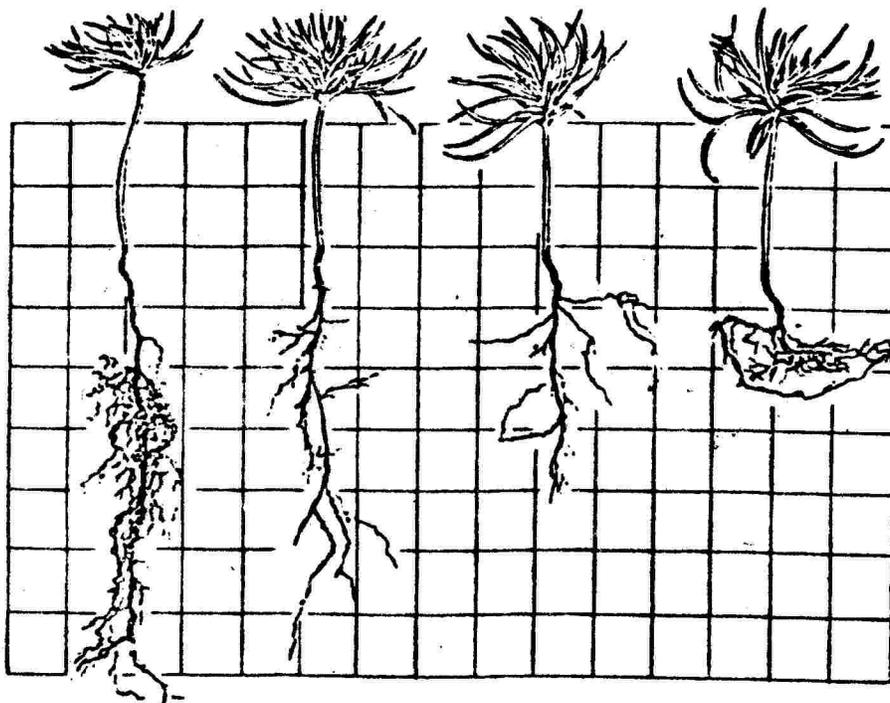


FIGURA 2. Efeito da densidade aparente a 1.2, 1.4, 1.6 e 1.8 g.cm⁻³ no crescimento de mudas de pinheiro austríaco em solo franco arenoso (2 cm de “gride”).

FORÇAS RESPONSÁVEIS PELA COMPACTAÇÃO

1. Compactação sob as rodas dos veículos

A distribuição de pressão no solo sob as rodas dos veículos dependerá: 1) do peso do veículo que determinará o total da força exercida; 2) do tamanho da área de contato entre a roda e o solo, que determinará a quantidade de pressão exercida; 3) da distribuição da força da área de contato e 4) do conteúdo de umidade e da densidade do solo (Soenne, 1958, citado por BACCHI, 1976).

Segundo BILL & REAVES (1956) a compactação resulta das forças horizontais causadas pelo deslocamento lateral do solo, bem como das forças verticais produzidas pela carga.

REAVES & COOPER (1960) apresentam um gráfico onde se pode observar a distribuição de pressões no perfil de um solo de textura barro limosa sob as rodas de um trator de pneus, à esquerda, e de um trator de esteiras à direita. As pressões exercidas na superfície do solo forma de 0.865 kgf/cm^2 para o trator de esteira de 1.786 kgf/cm^2 para o trator de pneus, embora ambos apresentassem o mesmo peso total, devido à maior área de contato da esteira.

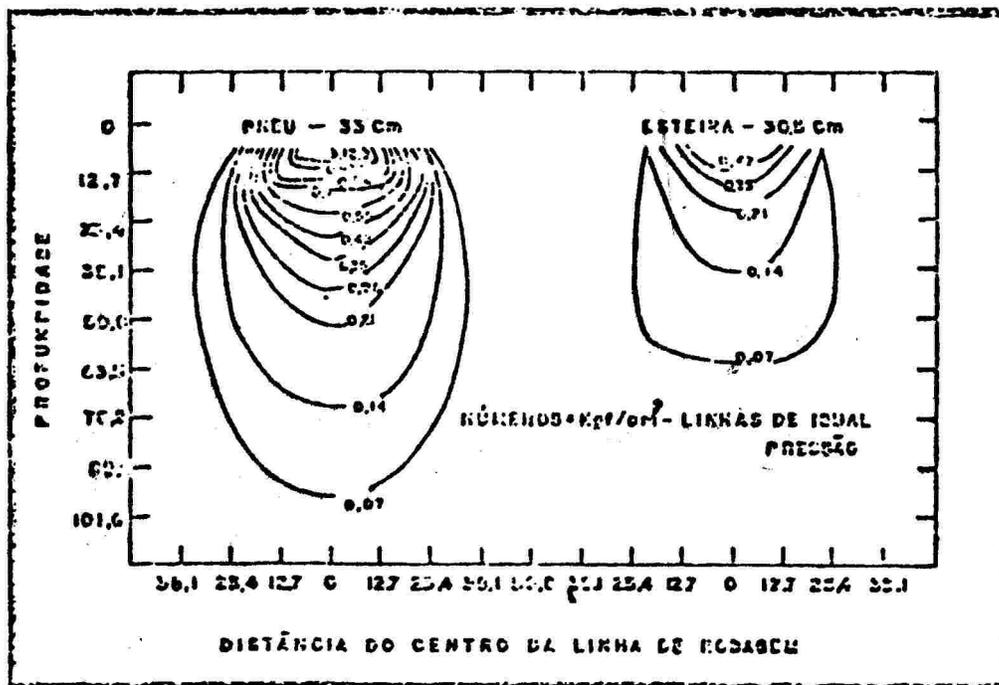


FIGURA 3. Linhas de igual pressão perpendicularmente à direção do caminhamento para um trator de pneus e um de esteiras igualmente carregados (REAVES & COOPER, 1960).

2. Compactação por implementos de preparo de solo

Em determinados tipos de solos, principalmente os argilosos, as ferramentas podem dar origem às chamadas soleiras. Estas superfícies compactadas pela ação dos implementos reduzem a permeabilidade do solo à água e restringem o desenvolvimento do sistema

radicular às profundidades de ação das ferramentas, podendo após vários anos de cultivo anular os efeitos benéficos iniciais de tais operações.

Quando as arações e gradagens são feitas sempre à mesma profundidade o problema pode se agravar, até que seja necessário quebrar aquela camada compacta que se forma, utilizando-se ferramentas de ação mais profunda, como os subsoladores. No entanto, o mesmo efeito ocorre com os subsoladores, de modo que a sua utilização apenas significa a transferência do problema para uma superfície mais profunda (Trowse & Baver, 1965, citados por BACCHI, 1976). Estas superfícies compactas surgem pela ação de compressão das ferramentas, acompanhada pelo atrito das mesmas com as partículas de argila que formam uma fina camada na superfície superior da camada compactada.

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO

Além da interferência no desenvolvimento de plantas, de maneira direta, através do impedimento físico à propagação de raízes, outros efeitos podem ser computados.

1. Aeração

A aeração do solo depende primariamente dos macroporos que drenam rapidamente após uma chuva ou irrigação. A compactação e pulverização dos agregados do solo podem destruir quantidades suficientes de macroporos capazes de restringir a transferência de O₂ para as raízes e microorganismos. Reduzir o tamanho dos agregados ou incrementar a densidade aparente do solo afeta a difusão de gases da mesma maneira, ambos reduzem a porosidade e difusão de ar. Muitos resultados indicam que a difusão de gases é zero quando os poros de ventilação representam menos de 10% e crescem aproximadamente na proporção de dez terços do poder de difusão quando os poros de ventilação estão entre 10 e 40%.

2. Nutrientes – Disponibilidade

A compactação do solo pode afetar o "status" dos nutrientes tanto de maneira benéfica como em seu detrimento. A compactação aumenta as taxas de movimentação dos nutrientes para as raízes por difusão e osmose. Por outro lado, compactação do solo resulta em um decréscimo na quantidade de nutrientes mineralizados da matéria orgânica do solo. Se a compactação causa um incremento no "run-off" e reduz a água do solo, isto ocasionará uma diminuição do fluxo interno, e em consequência, um menor transporte de nutrientes.

3. Erosão

O grau de erodibilidade de um solo é definido pela susceptibilidade. Que o mesmo apresenta à erosão hídrica, em função das suas características inerentes como: textura, tipo de mineral de argila, teor de matéria orgânica, estrutura, estabilidade de agregados, infiltração, condutividade hidráulica etc. Em geral, a erodibilidade do solo tende a decrescer com o aumento de areia grossa, argila, matéria orgânica e permeabilidade (ROSA, 1981). A compactação irá atuar em sentido inverso por afetar a estabilidade dos agregados e permeabilidade.

4. Infiltração

Infiltração é o processo pelo qual a água penetra no solo através de sua superfície. A infiltração da água no solo é afetada pela intensidade e tipo de chuva, umidade atual do solo, tipo de solo, declividade do terreno, grau de mobilização do solo, cobertura da superfície do solo, crosta e rugosidade superficial, existência de camada compactada próxima à superfície do solo, altura da camada de água que se mantém em contato com o solo e pela velocidade do escoamento superficial da água da chuva.

A infiltração de água é possivelmente a característica do solo que melhor indica a ocorrência de um processo de degradação das características físicas do mesmo. Em solos cultivados, o surgimento da camada compactada, onde se observa uma redução dos macroporos e aumento dos microporos, determina uma maior retenção de água e uma diminuição do espaço vazio. Em decorrência disto observa-se uma diminuição da infiltração e menor armazenamento de água no solo (ROSA, 1981).

MEDIDAS DE PREVENÇÃO E COMBATE A COMPACTAÇÃO

A mecanização das práticas florestais é uma medida de caráter irrevogável, visto a necessidade de incremento de produção e ampliação da área florestal em nosso País. Contudo, a implantação de sistemas mecanizados deve vir acompanhada de técnicas que possibilitem a menor alteração possível nas características físicas dos solos, permitindo a contínua utilização produtiva dessas áreas e evitando o seu abandono, transformadas em terras degradadas e impróprias para qualquer tipo de cultura.

Algumas sugestões, no caso de se prevenir a compactação devido à utilização de máquinas, podem ser dadas, como o chamado "controle de tráfego" que significa restringir a movimentação de veículos a uma menor área, diminuindo os efeitos no desenvolvimento das culturas. Ou mesmo o desenvolvimento de máquinas que realizassem diversas operações de preparo de solo a um só tempo, diminuindo a movimentação de equipamento pesado sobre o solo. Outras técnicas, como cultivo mínimo (plantio direto), devem ser encaradas como boas soluções, mas de aplicação restrita à condições específicas de solo e cultura, sem que se permita a sua aplicação generalizada.

Outro tipo de controle é confinar o tráfego de veículos às épocas quando o solo é menos sensível à compactação. Por exemplo, quando os solos estão secos eles são comparativamente mais resistentes à compactação. Operando-se os veículos à velocidades maiores irá se diminuir o tempo de deformação do solo.

Para diminuir a compactação, ou confiná-la à profundidades menores, os pneus de tratores florestais devem possuir uma carcaça flexível, baixa pressão de inflação, diâmetro largo e uma pequena largura de secção. Logicamente, todos esses itens dificilmente serão satisfeitos ao mesmo tempo, mas a otimização de um desses fatores irá minimizar a compactação.

No caso de tráfego intenso de veículos sobre a área de cultivo, recomenda-se restringir a movimentação sobre um número menor de caminhos, resultando em mais movimentação em um mesmo caminho, mas afetando somente uma pequena fração da área total (BRADSHAW, 1979). Complementando, STAAF & WIKSTEN, 1984, recomendam que se deixe uma camada de galhos e folhas no caminho dos veículos de transporte de madeira para se diminuir os danos às raízes.

1. Recuperação de solos compactados

A recuperação de solos fisicamente degradados pelo cultivo pode ser obtida através de práticas culturais e mecânicas. As práticas culturais consistem no emprego de plantas,

que possuem o sistema radicular com capacidade de recuperação da estrutura e penetração em camadas compactadas do solo, em sistema de rotação de culturas, com o aproveitamento dos Testos culturais e adubação orgânica. Entre as práticas mecânicas encontram-se a lavra, escarificação, gradagem, plantio direto, tratos culturais e, em casos especiais, a subsolagem.

O solo para ser mobilizado deve estar friável, isto é, quando seus torrões podem ser facilmente rompidos em frações menores entre os dedos, sem aderir aos mesmos. O solo Quando em estado seco apresenta alta coesão, exigindo potentes máquinas e implementos para realização do trabalho, sendo que o solo nesse estado rompe-se em grandes torrões. Na situação oposta, o solo molhado apresenta estado de máxima adesão, com os filmes de água ao redor das partículas funcionando como lubrificante que favorece a desagregação pela pressão exercida pela máquinas e implementos. Nesse caso, o solo ao invés de tornar-se mais solto sofre compactação (ROSA, 1981).

TABELA 3. Condições características do solo para aplicação de tratamentos corretivos e limite de propriedades físicas que serão melhoradas

Características do local	Tratamento	Fatores limites modificados
Áreas alagadas	Drenagem	Incrementar aeração; auxiliar traficabilidade
	Bedding	Melhorar aeração e estrutura do solo.
Excesso de escoamento superficial (“run-off”)	Terraceamento	Impede “run-off” superficial.
	Ripagem e Subsolagem	Impede “run-off” superficial; incrementa infiltração e permeabilidade; reduz competição
Superfície do solo; alta resistência do solo, estrutura massiva, compactação / cimentação	Discos, Bedding, Ripagem e Subsolagem	Melhorar aeração; reduzir resistência do solo; melhorar infiltração/permeabilidade; reduzir competição.
Sub-solo: alta resistência do solo, estrutura massiva, camada compacta rasa	Ripagem e Subsolagem	Reduzir resistência do solo; melhorar infiltração e permeabilidade.
Superfície de solo pedregoso, argiloso, etc.	Ripagem e Subsolagem	Orientação de pedras; melhora na qualidade e facilidade de plantio.

FONTE: ASAE (1981).

1.1. Subsolagem

Esta prática objetiva reduzir a densidade do solo e a resistência à penetração de raízes, aumentar a permeabilidade, como também diminuir o escoamento superficial da água de chuva em áreas declivosas e o encharcamento em terrenos planos. A eficiência da

subsolagem é dependente da umidade atual do solo, do ajuste correto do implemento em função da profundidade e do espaçamento entre as hastes, como também da potência do trator.

O solo, na profundidade de trabalho, deve apresentar um teor de umidade tal que sua consistência exiba transição entre os estados duro e friável; conseqüentemente, as camadas superiores estarão mais secas. Para que este efeito seja mais duradouro é necessário reduzir a mobilização do solo e adotar um sistema de rotação de culturas com espécies que possuam um sistema radicular abundante e profundo, que penetre nas fendas abertas pelo subsolador, além da utilização dos restos culturais para proteger a superfície do solo contra a formação da crosta (ROSA, 1981).

No rompimento da camada compactada do solo, pode também ser utilizado o arado de disco, o de aiveca ou pé-de-pato, à profundidade necessária para rompê-la.

- Tipos de subsoladores

Existem vários tipos de subsoladores: o tipo de haste lisa, o alado e o tipo alado mais dente. TAYLOR & BELTRAME (1980), baseados em estudos de Spoor & Goodwin (1978), afirmam que para um grande número de tipos de solos, desde que em estado friável, a haste do implemento tem uma profundidade máxima para trabalhar, considerada ótima e definida como crítica, que varia entre 5 a 7 vezes a largura da ponta da haste.

Quanto à distância entre as hastes, no caso de implemento de haste lisa, estas devem estar distantes entre si 1 a 1,5 vezes a profundidade de trabalho; se a haste for alada é de 1,5 a 2 vezes a profundidade de trabalho; e se a haste for alada mais dente suplementar a distância é de 2,5 vezes. No caso da profundidade, observaram que um aumento de 7 cm na profundidade de trabalho de um implemento de haste lisa impõe um aumento de 96% na força efetuada pelo trator. Quando a profundidade de trabalho é reduzida de 5 a 10 cm, o número de hastes possíveis de serem tracionadas aumenta em até 100%, dependendo da severidade da compactação a ser eliminada.

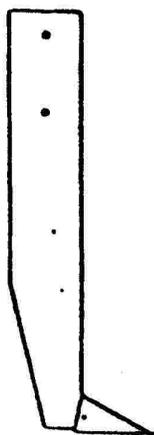


FIGURA 4. Subsolador de haste reta.

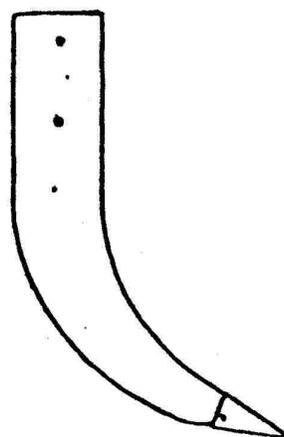


FIGURA 5. Subsolador de haste semi-parabólica.

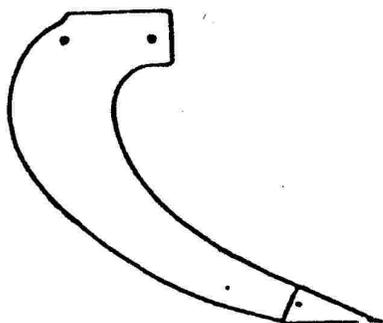


FIGURA 6. Subsolador de haste parabólica.

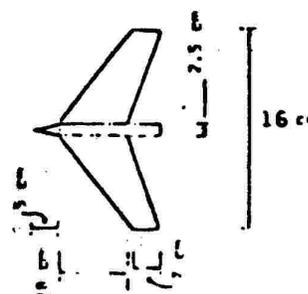
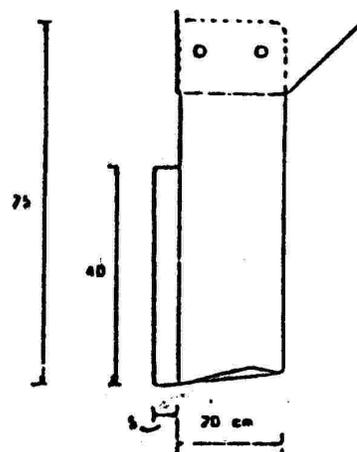


FIGURA 7. Subsolador alado.

CONCLUSÕES

As principais conclusões que podemos tirar são:

1. Deve-se procurar, na maioria das vezes, realizar as operações de preparo de solo em níveis mais baixos de umidade, para se diminuir a compactação.
2. Deve-se alternar os níveis de profundidade alcançado pelas operações de aração e gradagem, evitando a formação da camada compactada, ou retardando a sua ocorrência.
3. O controle de tráfego de caminhões e máquinas florestais e o plantio direto são medidas a serem consideradas com a devida segurança para se evitar a compactação.
4. A escolha de espécies mais aptas a se desenvolverem em solo mais compactado, é uma medida efetiva de controle de compactação e possui menor custo de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE – **Forest regeneration**. St. Joseph, 1981.

BACCHI, O.O.S. – **Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1976. 67p. (Tese-Mestrado-ESALQ).

BAVER, L.D. et alii – **Soil physics**. 4.ed. New York, John Wiley, 1972. 498p.

BRADSHAW, G. – Preplanned skid trails and wicking versus conventional harvesting on a partial cut. **Forest research note. Oregon State University**, Corvallis (62), 1979.

- DRISSI, D.K. – **Recovery and abandoned logging road soil in the North Carolina Piedmont**. Raleigh, 1975. (Tese-Mestrado-NCSU).
- FROEHLICH, H.A. – Soil compaction from low around pressure, torsion-suspension logging vehicles on three forest soils. **Research paper. FRL**, Corvallis (36): 1-12, 1978.
- GILL, W.R. & REAVES, C.A. – Compaction patterns of smooth rubber tires. **Agr. Eng.**, 37: 677-80, 1956.
- LAMBE, W.T. – The engineering behavior of compacted clay. **J. soil mech. Fdns div. ASCE** (1655): 1-34, 1958.
- MILES, J.A. et alii – A soil compaction study on the Blodgett Experiment Forest. In: **ASAE-Forest regeneration**. St. Joseph, 1981. p.72-81.
- REAVES, C.A. & COOPER, A.W. – Stress distribution in soil under tractor loads. **Agr. Eng.**, 41: 20-1, 31, 1960.
- ROSA, A. – **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo-solo Santo Ângelo (latossolo roxo distrófico)**. Porto Alegre, 1981. 136p. (Tese-Mestrado-UFRS).
- STAAF, R.A.G. & WIKSTEN, N.A. – **Tree harvesting techniques**. Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1984. 371p.
- TAYLOR, J.C. & BELTRAME, L.F.S. – Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura arroeira**, Porto Alegre (33): 34-44, 1980.
- TAYLOR, J.H. et alii – Multipass behavior of a pneumatic tire in tilled soils. St. Joseph, ASAE, 1979. 9p.
- WEAVER, H.A. – Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. **Agr. Eng.**, 31: 182-3, 1950.
- ZISA, R.P. et alii – Establishment and early growth of conifers on compact soils in urban areas. **USDA. Forest Service. NE research paper**, Broomall (451): 1-8, 1980.