

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS
DO SOLO E NO SISTEMA RADICULAR DE PLÂNTULAS DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum*, L.)

ÁLVARO PIRES DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Mestre em Agronomia. Área
de Concentração: Solos e Nutrição de
Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro, 1984

À minha família,

D E D I C O

AGRADECIMENTOS

Paulo Leonel Libardi

Otávio Antonio Camargo

Joelito de Oliveira Rezende

Francisco Lombardi Neto

Orlando Mello de Castro

Sidney Rosa Vieira

Sônia Carmela Falci Dechen

Funcionários da Seção de Pedologia do IAC

ESALQ/USP

CENA/USP

Instituto Agronômico - Campinas

EMBRAPA

Í N D I C E

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Compactação do solo.....	3
2.2. Umidade e compactação do solo.....	5
2.3. Compactação do solo e textura.....	7
2.4. Compactação do solo e porosidade.....	9
2.5. Compactação e água no solo.....	11
2.6. Compactação e sistema radicular.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1. Local.....	18
3.2. Preparo das amostras.....	18
3.3. O aparelho compactador.....	20
3.4. Processo de compactação.....	22
3.5. Determinação das propriedades físicas do solo.....	24
3.6. Determinação do desenvolvimento radicular.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1. Curva densidade do solo x umidade.....	30
4.2. Porosidade.....	34
4.3. Curva de retenção de água.....	43
4.4. Condutividade hidráulica saturada.....	50
4.5. Observações do sistema radicular do algodoeiro.....	53
5. CONCLUSÕES.....	60
6. LITERATURA CITADA.....	61
APÊNDICE.....	71

LISTA DAS TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
1 - Características químicas e físicas do Latossolo Roxo e do Latossolo Vermelho-Amarelo	19
2 - Dados de densidade do solo nas diversas umidades, quando os solos foram submetidos a uma mesma energia de compactação	72
3 - Dados de porosidade, nos três níveis de compactação, para os solos estudados	73
4 - Dados do teor de água retida em oito tensões, nos três níveis de compactação, para os solos estudados	74
5 - Dados da condutividade hidráulica saturada, nos três níveis de compactação, para os solos estudados	75

LISTA DAS FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	- Detalhes do equipamento usado e procedimento para a compactação das amostras de solo	21
2	- Curvas de compactação do Latossolo Roxo e do Latossolo Vermelho-Amarelo	31
3	- Porosidade total nos três níveis de compactação para os dois solos	35
4	- Porcentagem de macroporos nos três níveis de compactação para os dois solos	38
5	- Porcentagem de microporos nos três níveis de compactação para os dois solos	38
6	- Reduções percentuais de macroporos devido à elevação do nível de compactação para os dois solos	39
7	- Incrementos percentuais de microporos devido à elevação do nível de compactação para os dois solos	39
8	- Relação percentual dos níveis 1 e 2 de compactação, com a densidade máxima atingida em cada solo	41
9	- Porcentagem de macroporos em relação à porosidade total nos três níveis de compactação para os dois solos .	42

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
10	- Porcentagem de microporos em relação à porosidade total, nos três níveis de compactação para os dois solos	42
11	- Curva de retenção de água nos três níveis de compactação para o Latossolo Roxo sob floresta.....	44
12	- Curvas de retenção de água nos três níveis de compactação para o Latossolo Roxo sob cultivo.....	45
13	- Curvas de retenção de água nos três níveis de compactação para o Latossolo Vermelho-Amarelo	46
14	- Porcentagem de água retida a 0,01 MPa, 0,1 MPa e água disponível entre essas tensões	49
15	- Condutividade hidráulica saturada nos três níveis de compactação para os dois solos	51
16	- Redução da condutividade hidráulica saturada devido à elevação do nível de compactação para os dois solos	51
17	- Aspecto do sistema radicular de plântulas de algodão, desenvolvidas nas três amostras de solo, em três níveis de compactação.....	54
18	- Comparação do desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de algodão, desenvolvidas em dois níveis de compactação diferentes	58

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO
E NO SISTEMA RADICULAR DE PLÂNTULAS DE ALGODÃO (Gossypium hirsutum L.)

Álvaro Pires da Silva

Paulo Leonel Libardi

Orientador

RESUMO

Este trabalho visou estudar o comportamento de dois Latossolos quando submetidos à compactação e à influência desse nas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de algodão. O experimento foi conduzido com amostras compactadas artificialmente de um Latossolo Roxo argiloso e um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, ambos sob as condições de floresta e cultivo. A compactação foi feita até que a densidade do solo atingisse a condição natural, $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Pelas curvas densidade do solo versus umidade, verificou-se que o Latossolo Vermelho-Amarelo atingiu níveis de densidade

do solo maiores do que o Latossolo Roxo. Observou-se também que a umidade na qual se atingiu o nível máximo de compactação foi maior no Latossolo Roxo, notadamente na condição sob floresta, evidenciando a influência da matéria orgânica no referido nível de umidade. Na avaliação dos resultados de porosidade, constatou-se, nos dois solos, que a elevação do nível de compactação acarretou uma diminuição dos macroporos, com consequente aumento dos microporos. A porcentagem de água retida nas tensões estudadas, bem como a água disponível entre 0,01 e 0,1 MPa, aumentou, em ambos os solos, com a elevação do nível de compactação, sendo esses valores maiores no Latossolo Roxo, principalmente sob as condições de floresta. No que se refere aos dados da condutividade hidráulica saturada, evidenciou-se, nos dois solos, um declínio dos índices com a compactação, atingindo valores bastante baixos na densidade de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, principalmente no Latossolo Vermelho-Amarelo. Pela observação do sistema radicular das plântulas de algodão, verificou-se que, com o aumento do nível de compactação, houve menor desenvolvimento do sistema radicular.

INFLUENCE OF SOIL COMPACTION IN THE SOIL PHYSICAL PROPERTIES
AND ON THE ROOT SYSTEM OF COTTON (Gossypium hirsutum L.)

Álvaro Pires da Silva

Paulo Leonel Libardi

Adviser

SUMMARY

The objective of this work was to study (i) the behaviour of two Latosols under compaction and (ii) the influence of this process on the development of the root system of cotton seedlings. The experiment was conducted using artificially compacted soil samples of clayed dark red Latosol and a loam yellow red Latosol both of them under forest and cropping system. The compaction was done until values of the soil bulk density corresponding to, natural conditions, 1.3 and 1.5 g.cm⁻³ were were washed. From soil bulk density versus soil water content curves, it was shown that the yellow red Latosol could be compacted to greater values than the dark red Latosol. At the maximum compaction

level, soil-water content was also greater in the dark red Latosol, mainly under forest, reflecting the influence of the organic matter in that moisture level. From porosity results, it could be seen that the increase of compaction caused, in both soils, decrease in macropores and hence increase in micropores. The water retention and the available water between 0.01 and 0.1 MPa increased mainly for the dark red Latosol under forest. The saturated hydraulic conductivity for both soils decreased with increase of compaction, showing very low values at the 1.5 g.cm^{-3} soil bulk density value, mainly for the yellow red Latosol. The development of the cotton seedling root system decreased as the compaction level increased.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de equipamentos pesados dentro de uma cultura agrícola, desde o preparo do solo até a colheita, vem causando, em muitas regiões, a compactação do solo, isto é, alteração no arranjo de suas partículas sólidas com diminuição do seu espaço poroso. O efeito prejudicial da compactação consiste, portanto, em mudanças indesejáveis de importantes propriedades físicas do solo, relacionadas com o seu espaço poroso como a porosidade, estrutura, permeabilidade ao ar e à água, com consequente reflexo no desenvolvimento do sistema radicular e produtividade da cultura.

Diferentes tipos de solo apresentam comportamentos distintos quanto à susceptibilidade à compactação, na medida em que possuem características diferentes. A composição granulométrica é um dos fatores que mais determinam a variação desse comportamento, pois, quando do processo de compactação, o rearranjo das partículas varia de acordo com a distribuição dos componentes granulométricos. A matéria orgânica também exerce grande influência no processo, agindo como uma ponte flexível entre

os minerais.

Em nosso meio, medidas práticas vêm sendo adotadas para medir, caracterizar e combater os efeitos maléficos da compactação sob condições de campo havendo, contudo, pouca informação sobre a ação das características do solo na susceptibilidade à compactação. Outro ponto carente de estudos, em solos dos trópicos, é a intensidade de modificação nas propriedades físicas do solo, quando compactados a diferentes níveis e os reflexos desse processo no desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Visando verificar o comportamento de dois tipos de solo sob compactação foram estudadas, a partir de amostras compactadas artificialmente em laboratório, as variações de algumas de suas propriedades físicas e o desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de algodão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Compactação do solo

Segundo GROHMANN (1972), dá-se o nome de compacidade ao arrançamento ou agrupamento cerrado das partículas do solo em consequência de processos pedogenéticos ou decorrente do manejo. Caracteriza camadas adensadas como aquelas em que a sua compacidade é devida a processos pedogenéticos, reservando o termo camada compactada àquela em que sua compacidade é devida ao manejo do solo, o que está de acordo com GILL e VANDERBERG (1967), que descrevem a compactação como o resultado do movimento de aproximação de partículas por forças externas.

Para HARRIS (1971), a compactação é caracterizada por uma mudança no volume do solo, causada por forças mecânicas. O autor considera que o solo deve ser descrito em termos de um esqueleto de partículas sólidas de dimensões variáveis, circundadas por espaços, os quais devem conter substâncias líquidas ou gasosas. Quando é submetido a uma carga aplicada, capaz de causar uma mudança no seu volume, quatro tipos de ocorrência verificar-se-ão: uma compressão nas partículas sólidas, uma com-

pressão dos líquidos e gases contidos nos poros, uma mudança nos teores de líquidos e gases nos poros, e um rearranjo das partículas sólidas.

WEAVER e JAMIESON(1951) ressaltam que a camada compactada é consequência da aplicação de forças externas de compactação, tais como, implementos agrícolas e pisoteio intensivo. Essa camada compactada apresenta a mesma textura que as camadas adjacentes, o que exclui horizontes de iluviação (genéticos), adensados pela translocação de argila de horizontes superiores. Essas camadas ocorrem, normalmente, nos horizontes superiores até cerca de 20 cm de profundidade.

O tráfego de veículos sobre o solo é um dos fatores que mais determinam a compactação do solo, mas apesar desse fato, a medida dos esforços causados por uma roda em movimento sobre uma superfície como a do solo, constitui tarefa muito difícil, devido às interferências de vários fatores influenciando nos cálculos teóricos (CAMARGO, 1983).

A despeito desse problema, vários são os trabalhos realizados nesse sentido, como o executado por STEINBRENNER e GESSEL (1955), que estudaram os efeitos da ação do trator nas propriedades físicas do solo e determinaram um aumento de 15% na densidade do solo, quando compararam áreas compactadas a outras não compactadas. Esse fato foi corroborado por LUGO LOPEZ e ACEVEDO (1956) em solos argilosos, onde tiveram um aumento na densidade do solo da camada superficial de 1,14 para 1,33 g.cm⁻³ e de 1,30 para 1,39 g.cm⁻³ na camada sub-superficial.

O pastoreio também é agente causador da compactação do solo,

o que pode ser confirmado em trabalho realizado por VOORHESS et alii(1978) onde, solos sob pastagem apresentaram maior compactação, até 20 cm, quando comparados a áreas onde não havia pastoreio. A compactação diminuiu com a profundidade.

2.2. Umidade e compactação do solo

BODMAN (1967) e GROHAMNN (1972) relatam ser o teor de umidade fator primordial na compactação do solo, fato também observado por BAVER et alii (1972), onde afirmam que o aumento da densidade do solo é função do esforço de compactação e do conteúdo de água. Segundo esses autores, a força necessária para compactar um solo a uma dada densidade decresce exponencialmente ao aumentar o conteúdo de umidade, sendo que a densidade de um solo com determinada umidade aumenta exponencialmente ao aumentar a força aplicada. Ambos os efeitos foram relacionados com a orientação das partículas.

Esses três autores citados observaram também que a densidade de um solo, a um esforço constante de compactação, aumenta progressivamente ao aumentar o conteúdo de água até chegar a um máximo, e logo diminui com adições posteriores de água. Este máximo é chamado conteúdo "ótimo" para a compactação e foi determinado por Grohmann, citado por CAMARGO (1983), onde encontrou um valor pouco acima de 20% em peso num Latossol Vermelho Escuro.

BRUCE (1955) afirma que a umidade necessária para a compactação máxima aumenta com o melhoramento das condições físicas do solo, en-

quanto que GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965), PAUL (1973), FAURE (1976) e LARSON et alii (1980) atribuem o aumento da umidade "ótima" a um maior teor de argila.

BAVER et alii (1972) explica a forma da curva, densidade versus umidade, pela formação da camada dupla difusa e a orientação das partículas. À baixa umidade não há água suficiente para formar uma camada dupla. O solo está flocculado e as partículas estão distribuídas ao acaso. À medida que o teor de água aumenta, a camada dupla se expande, as películas ficam mais grossas para produzir lubrificação entre as partículas, as quais se orientam de modo a deslizarem umas sobre as outras e formam uma massa mais densa. Após atingir-se a umidade "ótima" ao aumentar a espessura da película de água, a densidade diminui devido ao efeito da diluição da água sobre a concentração das partículas por unidade de volume.

Além disso, a água e o ar, quando em altos teores, oferecem resistência à compactação, o que também explica, em parte, a diminuição da densidade a alto e baixo teor de umidade pois, nessas circunstâncias, a água e o ar estariam, respectivamente, ocupando o volume dos poros do solo.

DAY e HOLMGREEN (1952), ao examinarem microscopicamente amostras de solo compactadas, demonstraram que as alterações ocorridas no volume são decorrentes das deformações plásticas dos agregados. Quando a umidade se encontra no limite inferior de plasticidade, as deformações geram uma diminuição progressiva dos espaços entre os agregados, à medida que a energia de compactação aumenta. Conforme a umidade fica abaixo do limite inferior de plasticidade as deformações parecem estar localizadas

nas áreas de contato entre os agregados.

Outro aspecto decorrente da umidade, refere-se à profundidade de compactação, fenômeno estudado por SHULKA e RAVALO (1976) em experimentos de campo, quando a profundidade de compactação do solo aumentou com a umidade. Com o incremento da umidade de 27,41% para 48,32%, a profundidade de compactação passou de 15,42 cm para 45,72 cm. Tais fatos foram comprovados por JAMIESON et alii (1950), WEAVER e JAMIESON (1951) e COLETI e DEMATTÊ (1982). Esses autores concluíram que a profundidade de compactação aumentou com o conteúdo de umidade e o afrouxamento inicial do solo. Observaram também que a compactação máxima ocorreu com umidade perto do limite de plasticidade. Para minimizar os efeitos prejudiciais, sugerem que sejam projetados equipamentos de tração que imponham pressões unitárias mínimas ao solo, bem como a mobilização do solo seja feita a níveis de umidade abaixo da condição chamada "ótima" para a compactação.

2.3. Compactação do solo e textura

A textura do solo exerce grande influência na compactação devido a ser um dos fatores determinantes da relação entre o volume de sólidos e de poros.

Abordando esse tema, BODMAN e CONSTANTIN (1965) constataram que uma mistura de 80% de areia e 20% de argila mais silte podem ser compactados a menores porosidades que qualquer material puro. Outra observação foi a de que solos com agregados estáveis são mais resistentes à

compactação, fenômeno também relatado por SANCHEZ (1981), onde ressalta que muitos Oxissolos e Ultissolos arenosos sofrem facilmente compactação e erosão, devido a não terem suficiente teor de argila para formarem agregados estáveis, principalmente nas camadas aráveis.

Ao estudar a influência da argila na susceptibilidade à compactação dos solos, FAURE (1976) concluiu que as maiores densidades foram atingidas quando o teor de argila era de aproximadamente 20% e as menores densidades com teor próximo a 40%. Nessa mesma linha de pesquisa, FAURE (1980) observou que, a partir de solos com diferentes teores de montmorilonita, as amostras com menores quantidades desse tipo de argila atingiram níveis mais altos de densidade do solo o que contraria, em parte, os trabalhos feitos por LARSON et alii (1980) quando encontraram que o índice de compactação aumentou linearmente com o teor de argila até 33%, permanecendo constante com incrementos posteriores, alcançando valores máximos com solos contendo predomínio de argila do tipo 2:1.

Ao compararem as densidades atingidas por um Typic Haplustox com 33% de argila e 36% de areia com um Arenic Paleudult com 82% de areia e 2% de argila, os autores supra citados constataram que esse último atingiu densidades muito maiores, concluindo que a distribuição do tamanho de partículas do solo dominou o seu comportamento, fato corroborado por AKRAM e KEMPER (1979), onde encontraram densidades maiores em solos arenosos quando confrontados com argilo-siltosos. Essas observações não foram confirmadas por ERIKSON et alii (1974), ao estudarem o comportamento de solos com diferentes texturas quando submetidos à compactação, pois concluíram que as modificações ocorridas foram maiores em solos argilosos do que em arenosos.

No que concerne à matéria orgânica TAYLOR e HENDERSON (1959), trabalhando com amostras contendo diferentes teores dessa fração de solo, observaram que aqueles com maiores porcentagens apresentaram densidades menores quando submetidos à compactação, fato corroborado por LARSON e ALMARAS (1971) e BODMAN (1967).

A matéria orgânica, segundo SANCHEZ (1981), parece relacionada com a estabilidade dos agregados de Oxisolos, já que tem um papel aglutinador eficiente entre as partículas primárias. Essa propriedade é referendada por BRADY (1983), onde confere à matéria orgânica um aumento na capacidade de retenção de água pelo solo, fazendo com que solos com montante maior de matéria orgânica apresentem um conteúdo "ótimo" de água para a compactação mais elevado, fato também constatado por TAYLOR e HENDERSON (1959).

2.4. Compactação do solo e porosidade

A porosidade é uma propriedade do solo diretamente relacionada com o grau de compactação do mesmo. Sendo assim, torna-se evidente que ao alterar-se a densidade do solo, ocorrência advinda da compactação, alterar-se-á a porosidade de maneira inversa.

GROHMANN e QUEIROZ (1966), ao estudarem os efeitos da compactação em amostras superficiais de um Latossolo Roxo e de um Podzólico Vermelho-Amarelo orto, verificaram as seguintes variações nas amostras com

pactadas em decorrência da redução do volume total: a massa específica do solo aumentou com a intensidade de compactação, a porosidade total diminuiu, sendo inversamente proporcional à massa específica do solo; o volume relativo da matéria sólida aumentou e o teor de água bem como os poros livres de água (macroporos) diminuíram com o aumento da intensidade de compactação. Os autores também concluíram que Latossolo Roxo apresentou uma capacidade de compactação nitidamente superior à do Podzólico Vermelho Amarelo orto.

LUGO LOPEZ e ACEVEDO (1956) constataram, em solos argilosos, que ação de máquinas compactando o solo foi responsável por um decréscimo na porosidade total de 57 para 49,5%.

A influência da compactação na aeração do solo é ressaltada por CAMARGO (1983), onde expõe que o seu efeito é uma diminuição da porosidade ao ar com conseqüente queda na permeabilidade ao ar. Quando o solo está na capacidade de campo, a difusão dependerá muito do espaço poroso está na capacidade de campo, a difusão dependerá muito do espaço poroso livre de água. Se o solo está saturado, condição fácil de ser atingida em camadas compactadas, a difusão do oxigênio ou sua troca com a atmosfera será muito prejudicada.

Os efeitos maléficos da compactação na aeração do solo foram comprovados por SWARTZ e KARDOS (1963), TAYLOR e BURNETT (1963), como também por STEINBRENNER e GESSEL (1955), onde verificaram uma perda de 10% da macroporosidade quando os solos sofreram compactação por meio de tratores, sendo que no local onde as rodas passaram, a perda foi de 53%.

A perda da porosidade de aeração (poros maiores que 0,05mm) ocasiona um aumento dos microporos, fato que foi constatado por GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965) estudando solos de textura arenosa, barro arenoso e argiloso, submetidos à compactação, onde encontraram um aumento dos microporos à custa dos macroporos.

2.5. Compactação e água no solo

Desde a infiltração até a retenção, a dinâmica da água depende, fundamentalmente, de diversas propriedades físicas do solo. Como a compactação afeta sobremaneira algumas destas propriedades, é evidente esperar-se que o comportamento da água no solo também sofrerá modificações quando do rearranjo das partículas do solo devido a forças de compactação.

EAGLEMAN e JAMIESON (1962) realizaram medidas da velocidade, fluxo e gradiente hidráulico e mostraram que a água se transfere dos poros maiores para os menores com facilidade, sendo o inverso mais difícil. Ocorrendo quebras na estrutura do solo, com a compactação de diferentes camadas, aumenta o impedimento ao movimento da água.

CAMARGO (1983) relata que o volume de água que flui por um tubo na unidade de tempo é proporcional à quarta potência do raio. Assim sendo, como a compactação diminui a quantidade de poros grandes, ela terá uma influência muito grande na transmissão de água em um solo saturado, fato comprovado por GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965) quando a condutividade hidráulica saturada esteve diretamente relacionada aos macropo

ros. Em um Latossolo Vermelho Escuro, COLETI e DEMATTÊ (1982) verificaram uma diminuição na condutividade hidráulica saturada com o aumento da densidade do solo.

Quando se trata de condições não saturadas, a compactação aumenta a condutividade hidráulica, o que foi confirmado por WEHRLI (1964) e KEMPER et alii (1971).

LIBARDI e REICHARDT (1974) apresentam um estudo preliminar relacionado com a compactação e seus efeitos no comportamento do movimento horizontal da água. Nesse trabalho, as amostras de um determinado solo foram compactadas diferentemente produzindo três valores distintos de densidade do solo. Foi verificada a existência de uma relação linear entre uma constante de generalização e a densidade do solo. Nessa mesma linha CORSINI e LIBERA (1978), estudando a difusividade da água em Latossol Roxo, determinada em colunas horizontais de solo, concluíram que tal propriedade foi negativamente correlacionada com a densidade do solo e positivamente correlacionada com a macroporosidade.

Os efeitos da compactação diminuindo a infiltração de água no solo são relatados por PARKER e JENNY (1945), DONNEN e HENDERSON (1953) e BAVER et alii (1972).

Abordando esse tema Moura e Buol (1972), citados por SANCHEZ (1981), compararam os efeitos de 15 anos de cultivos anuais em Eustruox e observaram que as taxas de infiltração baixaram de 82 para 12 cm.h^{-1} com cultivo intensivo. A diminuição da infiltração estava associada com uma diminuição marcada nos poros maiores de 0,05 mm de diâmetro tan

to no horizonte A como no B. Considerou-se que a compactação produzida por máquinas pesadas era a causa da diminuição da macroporosidade.

Quando há interesse em diminuir-se as perdas de água por percolação, a compactação é benéfica, ocorrência constatada por HOWARY et alii (1981), bem como KHALID e SMITH (1978) que, utilizando um compactador de sulco, reduziram a taxa de infiltração de água para solos arenos até 40%. A crosta formada permitiu a economia de irrigação.

Observação interessante foi feita por HOWARY et alii(1981) onde, em solos compactados, os baixos índices nas taxas de infiltração foram aumentados através de secagem e molhamento.

No aspecto relativo à retenção de água BRADY (1983) relata que um solo argiloso retém muito maior quantidade de água, a um determinado nível de sucção, do que um barro ou areia. O autor também comenta que a estrutura de um solo também exerce influência nas suas relações de umidade. Um solo bem granulado possui um total de espaços maior do que um solo similar, cuja granulação tenha sido destruída, tornando-se compactado. Um solo compactado poderá apresentar uma proporção mais elevada de poros de tamanho médio e pequeno que tenderão a reter água com maior sucção do que os poros grandes.

CAMARGO (1983) observa que, em condições de saturação, a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, seguindo de perto a diminuição na porosidade total, de onde se conclui que uma amostra compactada, a baixas tensões, retém menos água que uma não compactada, entretanto essa relação se modifica a altas tensões, onde a compactada retém mais água, fato constatado por JAMIESON (1956), BOX e TAYLOR

(1962), ARCHER e SMITH (1972).

HILL e SUMMER (1966) e CAMARGO (1983) relatam que, na maioria dos solos, uma compactação moderada aumenta a água disponível. Já em solos muito compactados ARCHER e SMITH (1972) constataram que houve um prejuízo tanto para a água disponível como para a capacidade ao ar.

SANCHEZ (1981) observa que, em solos bem agregados dos trópicos, é possível que a faixa de água disponível esteja entre 0,01 e 0,1 MPa o que foi corroborado por WOLF (1975) que notou que a água retida entre 0,1 e 1,5 MPa é menos aproveitável pelas culturas que a retida entre 0,01 e 0,1 MPa.

2.6. Compactação e sistema radicular

Segundo BAVER et alii (1972), a adequação do solo como ambiente para o crescimento e funcionamento do sistema radicular da planta depende da disponibilidade de nutrientes, oxigênio e água; do grau de impedimento mecânico para a proliferação das raízes e da temperatura.

Para esse autor, os dois principais fatores que afetam o desenvolvimento de um bom sistema de raízes em um solo compactado são a aeração e o impedimento mecânico.

BARLEY (1962) obteve resultados interessantes referentes ao desenvolvimento de raízes. O primeiro deles diz que a baixos valores de resistência à penetração, onde o impedimento mecânico é um fator mínimo, a concentração de O_2 determina o grau de crescimento das raízes. Em segundo lugar mostra que as raízes não se desenvolvem em altos níveis de

impedimento mecânico, qualquer que seja o nível de O_2 . Finalmente observou que para uma concentração de O_2 dada, o desenvolvimento das raízes de cresce em proporções logarítmicas com o aumento da resistência à penetração.

O comportamento do sistema radicular em solos compactados varia com as espécies vegetais (VIEIRA, 1978), fato constatado por CINTRA e MIELNICZUK (1983), onde observaram o potencial de algumas espécies vege tais para a recuperação de solos compactados, concluindo que a colza e o tremoço, pela maior capacidade de penetração da raiz pivotante, revelaram se promissoras na recuperação de solos com esse problema.

WIERSUM (1957) investigou nas raízes de plantas jovens de aveia a capacidade para penetrar poros de diversos diâmetros e diversos graus de rigidez. Os dados demonstraram de modo conclusivo que tais raízes só penetram poros cujo diâmetro é maior que o das raízes muito jovens. A plasticidade da ponta das raízes jovens não lhes permite contrair-se pa ra introduzir-se em um poro estreito. WIERSUM (1960) constatou que as raízes não se alargaram quando a taxa de difusão de O_2 caía abaixo de um cer to mínimo. Existia uma boa correlação positiva entre a profundidade de pe netração das raízes e a taxa de difusão de oxigênio.

GILL e MILLER (1956) afirmaram que a rigidez dos poros limita o crescimento radicular havendo necessidade de a raiz forçar sua penetração no solo e isso só é possível quando o nível de impedimento físico permitir tal comportamento. Já AUBERTIN e KARDOS (1965) observaram que o crescimento radicular geralmente não ocorre através dos poros existentes e sim por meio de um caminho criado pelas raízes.

TAYLOR e GARDNER (1963) em estudos de penetração de raízes de algodão em amostras compactadas, onde a aeração não era limitante, demonstraram que o desenvolvimento das raízes, a uma dada densidade do solo, dependia da tensão de água do solo. Quanto maior era a tensão de umidade, menor era a porcentagem de penetração das raízes na amostra. A resistência do solo aumentou com a elevação da densidade do solo e com maiores tensões de umidade do solo. Já MIRREH e KETCHESON (1973) constataram que a níveis de resistência do solo inferiores a 10 bar as raízes eram normais, não importando o potencial matricial, que variou de -1 a -8 bar. Quando os níveis de resistência eram superiores a 10 bar, e o potencial matricial baixo, as raízes mostraram-se curtas, grossas e retorcidas. DAS BERG e MENDEL (1971) atribuem à menor condutividade hidráulica e não à maior tensão o efeito negativo da redução da umidade no crescimento radicular.

VEIHMEYER e HENDRICKSON (1948), trabalhando com girassol no estudo da relação entre a densidade de diferentes tipos de solo e a penetração de raízes, concluíram que o limite de densidade para o solo arenoso era de $1,75 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto que para os argilosos variava de 1,46 a $1,63 \text{ g.cm}^{-3}$.

LAWTON (1945) obteve uma diminuição no crescimento de raízes de milho quando a porosidade de aeração diminuiu devido à compactação, fato também notado por BERTRAND e KOHNKE (1957). Já MIRREH e KETCHESON (1973) atribuem ao aumento da resistência de penetração no solo a diminuição na alongação da raiz de milho.

FLOCKER et alii (1959), realizando experimentos em cultu-

ras de tomates em solos compactados, constataram uma redução na porcentagem de germinação, aumento no tempo de emergência das sementes, retardamento no florescimento e crescimento bem como diminuição da produção. Esses fatos também foram observados por ADAMS et alii (1960) em solos compactados, durante a semeadura, havendo uma diminuição de 54% na produção de batata. Os autores indicaram ser a diminuição do espaço poroso para a difusão dos gases a maior causa na queda da produção.

No que tange a experimentos feitos com algodão, TACKET e PEARSON (1964) mostraram que a penetração das raízes da plântula de algodão em amostras de solos compactados a diferentes valores de densidade do solo, foi afetada por diferentes níveis de oxigênio. A densidades maiores que $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ houve acentuada diminuição na penetração. Com densidades menores, o desenvolvimento de raízes aumentou rapidamente ao elevar a concentração de oxigênio chegando ao máximo com 10% de O_2 . Nestas densidades o fator dominante foi a aeração, comprovando os trabalhos feitos por GARDNER e DANIELSON (1964), onde encontraram uma correlação de 0,998 entre a penetração radicular de algodoeiro e a porcentagem de poros de arejamento.

Em estudos realizados por WANJURA et alii (1966) ficou evidenciado que o maior fator na redução da emergência de plântulas de algodão foi o impedimento físico causado pela compactação, o que foi corroborado por BRADY (1983) relatando que algumas camadas compactadas de solo exercem influência prejudicial sobre o algodão mais pelo impedimento à penetração do sistema radicular do que pelo montante de oxigênio disponível. LOWRY et alii (1970) ao estudarem o crescimento do algodoeiro em solos compactados responsabilizaram um volume radicular reduzido e conseqüente menor volume de solo explorado pela queda da produção.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

O experimento foi realizado utilizando-se amostras com estrutura deformada do horizonte superficial de dois tipos de solo, a saber: (i) Latossolo Roxo, textura argilosa, sob floresta e cultivo, localizado na Fazenda Santa Genebra, Campinas, SP, e (ii) Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, também sob floresta e cultivo, situado no Centro Experimental de Campinas do Instituto Agrônômico.

3.2. Preparo das amostras

Depois de coletadas, as quatro amostras foram secas à sombra, passadas por peneira de malha de 2 mm, sendo então feitas análises físicas e químicas, mostradas na Tabela 1.

Para a obtenção da curva densidade versus umidade do solo, as amostras foram compactadas a diversos teores de umidade, sempre com a mesma intensidade de compactação.

A quantidade de solo a ser compactado correspondeu, em todos os casos, sempre a 50 g de solo seco a 110°C.

O umedecimento das amostras foi feito por meio de um vaporizador manual. A partir do solo seco à sombra foram adicionadas diferen

TABELA 1 - Características químicas e físicas do Latossolo Roxo e do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Solo	Areia Grossa	Areia Fina	Limo Argila	pH		C (%)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Al ⁺³	H ⁺	ds	dp ₋₃		
				H ₂ O	KCl									meq/100 g	g.cm ⁻³
LR floresta	12	25	37	13	50	6,8	6,4	3,2	14,9	1,9	0,27	0,0	3,7	1,0	2,38
LR cultivo	10	25	35	07	58	5,2	4,5	1,6	3,2	0,4	0,20	0,2	4,9	1,1	2,56
LVA floresta	33	33	66	08	26	5,0	4,0	1,9	1,4	0,6	0,21	0,4	4,8	1,2	2,62
LVA cultivo	32	37	69	08	23	5,8	4,8	1,4	1,4	0,7	0,40	0,2	3,4	1,2	2,61

tes quantidades de água a fim de se conseguir uma amplitude de umidade.

Os teores de água alcançados pelas quatro amostras, calculados a partir da fórmula

$$U\% = m_{\text{água}}/m_s \times 100$$

onde $m_{\text{água}}$ é a massa de água e m_s a massa de solo seco em estufa a 110°C , e U%, a umidade por cento em passa, foram as seguintes:

- Latossolo Roxo, sob floresta: 3, 7, 16, 19, 25, 27, 30 e 32%;
- Latossolo Roxo, sob cultivo: 5, 10, 13, 17, 22, 23, 24 e 25%;
- Latossolo Vermelho, textura média, sob floresta: 6, 9, 12, 13, 15, 17, 19 e 21%;
- Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, sob cultivo: 4, 8, 10, 11, 14, 15, 18 e 20%.

Como objetivava-se conseguir uma curva densidade versus umidade do solo, não havia necessidade de que as amostras apresentassem os mesmos teores de água. Fazia-se mister, contudo, que os teores abrangessem uma ampla faixa de variação.

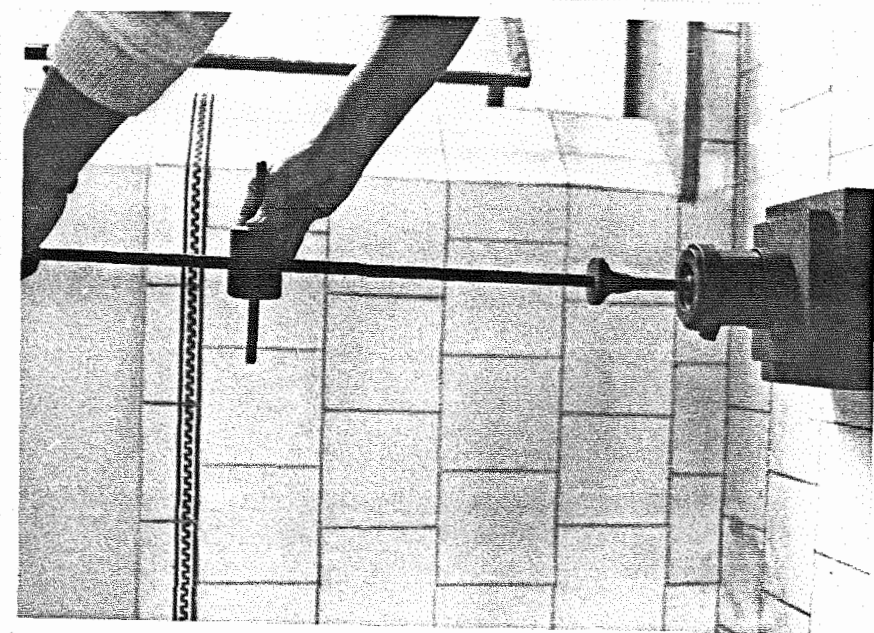
3.3. O aparelho compactador

O aparelho compactador utilizado foi o mesmo que aquele usado por GROHMANN e QUEIROZ (1966), sendo basicamente o instrumento descrito por BRUCE (1955), com pequenas adaptações feitas pelos autores supra-citados, com o intuito de facilitar o manuseio.

A Figura 1 (a) e (b) mostra este aparelho, o qual consta das seguintes partes:



(a)



(b)

FIGURA 1 - Detalhes do equipamento usado e procedimento para a compactação das amostras de solo.

- a) base de madeira para receber o porta-amostras;
- b) porta-amostras desmontável;
- c) pistão compactador com guia para um determinado peso;
- d) peso.

O peso utilizado foi de 1800 g e a altura de queda escolhida foi de 20 cm.

Para facilitar as determinações a serem executadas nas amostras, havia a necessidade de utilizarem-se estruturas que as mantivessem de uma maneira que pudessem ser manuseadas e transportadas sem perturbação das suas configurações. Para tal, lançou-se mão de tubos de PVC rígido com 6,9 cm de altura e 5 cm de diâmetro, sendo os mesmos colocados no porta-amostras para que neles se realizasse o processo de compactação.

3.4. Processo de compactação

Esse procedimento inicia-se com a colocação de 50 g de terra fina seca em estufa por meio de um funil, no tubo de PVC (Figura 1 a), nivelando-se, a seguir, a superfície do solo dentro do tubo com uma espátula. A amostra de solo assim colocada, ocupava pouco mais da metade do volume do tubo. A seguir, colocava-se a base do compactador sobre a amostra, mantendo-o em posição vertical. Deixava-se cair o peso escolhido da altura previamente determinada (Figura 1 b) tantas vezes quanto desejadas. No presente caso o peso foi lançado dez vezes, sendo que, após as cinco primeiras, o tubo era virado colocando-se a base do compactador novamente sobre a amostra e o peso solto por mais cinco vezes. Valeu-se desse recurso para tornar o solo uniformemente compactado evitando-se, assim, variações da densidade ao longo da amostra.

Findo o processo, a altura da amostra era medida pela dife

rença entre a altura total do tubo e aquela do espaço vazio, com auxílio de uma régua onde uma das extremidades era exatamente o início da escala. Sendo H a altura do tubo, valor conhecido, e L a altura registrada pela régua, a altura da amostra, h, era obtida pela diferença $h = H - L$.

Visto que a área interna do tubo é constante, a densidade do solo é proporcional à altura da amostra compactada. Numericamente tinha-se um volume de amostra igual ao produto da sua área pela altura, isto é:

$$V = S \times h$$

onde: V = volume da amostra;

S = área da amostra;

h = altura da amostra.

A seguir, as amostras eram colocadas na estufa a 70°C, durante 72 horas, para que se obtivesse o valor exato de massa e umidade do solo.

O uso da estufa à temperatura e ao tempo acima descritos deve-se ao fato de o tubo de PVC não suportar temperaturas mais altas sem que sua forma ficasse danificada. O período de 72 horas foi determinado a partir de aferições feitas onde o peso das amostras, após esse tempo, permaneceu constante.

Com os dados de massa do solo e volume total da amostra, a densidade foi calculada a partir da fórmula:

$$d_s = m_s / V_T$$

onde: d_s = densidade do solo, expressa em g.cm^{-3} ;

m_s = massa do solo seco em estufa, expressa em gramas;

V_T = volume total da amostra, expresso em cm^3 .

3.5. Determinação das propriedades físicas do solo

A segunda etapa do experimento, consistiu no estudo do comportamento de três amostras de solo com características diferentes, submetidas a três níveis de compactação, sendo analisadas as seguintes propriedades físicas:

- porosidade total, macro e micro: método de RICHARDS (1965)
- porosidade total calculada: pela fórmula

$$P = 1 - \frac{d_s}{d_p}$$

onde d_s é a densidade do solo e d_p é a densidade das partículas

- curva de retenção de água: método de RICHARDS (1965)
- condutividade hidráulica saturada: método de KLUTE (1965)

As determinações foram feitas com três repetições e os solos utilizados foram os mesmos da primeira etapa, excetuando-se o Latossolo Vermelho-Amarelo, sob floresta. A exclusão desse solo deveu-se à similaridade das suas características com as do Latossolo Vermelho, sob cultivo.

Os níveis de compactação corresponderam, respectivamente a:

0 - densidade natural;

1 - $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$;

2 - $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

A metodologia utilizada para compactar as amostras foi a mesma descrita na etapa anterior desse trabalho, porém, com os solos a um

mesmo teor de água. O número de golpes necessário para atingir a compactação desejada, foi determinado através de ensaios preliminares.

Visando facilitar as determinações, após o processo de compactação, os tubos de PVC foram vedados na extremidade inferior com papel de filtro.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada pelo método descrito por KLUTE (1965), através da expressão:

$$K = \frac{Q}{A \cdot t} \times \frac{L}{\Delta H}$$

onde: K = coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica saturada ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

A = área da secção transversal da amostra (cm^2);

Q = volume de água medido (cm^3);

L = comprimento da amostra (cm);

ΔH = diferença de potencial hidráulico entre o topo e a base da amostra (cm).

Nessa expressão, K tem dimensões de velocidade ($\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$).

A carga hidráulica constante sobre a amostra foi mantida através de um frasco de Mariotte e seu valor igual à diferença entre a altura do tubo e a da amostra.

Para se fazer as análises de porosidade, pensou-se em se utilizar as mesmas amostras em que foram efetuadas as avaliações da condutividade hidráulica saturada. Isto não foi possível porque depois da determinação de K, verificou-se que as amostras apresentavam uma forma irre

gular, não permitindo, portanto, a medida precisa do volume ocupado pela amostra de solo.

Em vista disso, novas amostras foram compactadas pela metodologia já descrita aos mesmos níveis de compactação mencionados anteriormente.

Para o cálculo da porosidade (macro e micro), bem como para elaborar a curva de retenção de água, recorreu-se ao método descrito por RICHARDS (1965), ressaltando-se que as amostras foram compactadas artificialmente. Utilizaram-se nove pontos de tensão na elaboração da curva de retenção de água, a saber: 0; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01; 0,02; 0,05 e 0,1 MPa.

A tensão empregada para separar a macro e micro porosidade foi calculada a partir da fórmula

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

onde: h = altura de coluna de água que extrai água de poros com o raio maior que o utilizado na fórmula;

σ = tensão superficial da água que pode ser tomada como constante e igual a 73 erg.cm^{-2} na temperatura de 20°C ;

ρ = densidade da água igual a 1 g.cm^{-3} ;

g = aceleração da gravidade, igual a 980 cm.s^{-2} ;

r = raio considerado limite entre macro e micro porosidade que, nesse caso, foi igual a 0,0025 cm.

Com esses dados, h ficou assim determinado:

$$h = \frac{2,73}{1 \cdot 980 \cdot 0,0025}$$

$$h = \frac{146}{2,45} = 60 \text{ cm de coluna de água ou } 0,006 \text{ MPa}$$

3.6. Determinação do desenvolvimento radicular

A última etapa do trabalho contou do plantio de sementes de algodão nas amostras de solo contidas nos tubos de PVC, para se fazer uma avaliação do comportamento do sistema radicular nos diferentes níveis de compactação.

Com o propósito de padronizar a tensão com a água ficaria retida nas amostras, estas foram primeiramente saturadas e, posteriormente, submetidas a uma tensão 0,002 MPa na placa de Richards. Após ter atingido o equilíbrio, iniciou-se o processo de plantio.

As sementes de algodão utilizadas eram da variedade IAC-20 e foram previamente tratadas com fungicida Capton WP-50. Após esse tratamento, as sementes foram colocadas em cartuchos para que iniciasse a germinação, a fim de se obter sementes pré-germinadas para o plantio, evitando-se com isso problemas ocasionados por possíveis falhas oriundas de possível baixo poder germinativo. As sementes selecionadas apresentavam radícula já emitida, com comprimento de 1 a 2 cm.

O plantio das sementes selecionadas nas amostras de solo contidas no tubo de PVC iniciou-se com a colocação de uma camada solta de solo, em cima da amostra compactada, com altura suficiente para cobrir a semente, permitindo que se desenvolvesse um pouco antes de atingir a camada compactada. A seguir, a superfície da amostra era levemente umedeci

da, aumentando assim, o contato semente-solo solto. Quanto ao solo compactado, a tensão da água era a mesma para todas as amostras, como já mencionamos anteriormente.

Para que as condições de umidade do solo não fossem alteradas e o meio ambiente para o desenvolvimento das plantas estivesse padronizado, as amostras foram colocadas em estufa própria para germinação de sementes onde a umidade e a temperatura eram mantidas constantes. A temperatura foi mantida a 25°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) e a alta umidade relativa do ar (saturado) evitava perdas de água por evapotranspiração.

Depois de oito dias, as plântulas apresentavam um desenvolvimento suficiente para que pudessem ser feitas avaliações do seu sistema radicular. A não ampliação do prazo de manutenção das plântulas na estufa deveu-se à limitação a um maior crescimento dessas em virtude do pequeno volume de solo contido no tubo de PVC. Apesar desse prazo ser bastante curto em relação ao ciclo da planta, foi suficiente para que ocorressem diferenças no comportamento do sistema radicular quando desenvolvido em solos com níveis distintos de compactação.

A retirada das plântulas dos tubos foi feita através da sua submersão em água para diminuir a resistência do solo, evitando-se com isso, que o sistema radicular fosse danificado com o processo. Com o solo totalmente saturado e com o auxílio de pequenas escarificações, foi possível retirar as raízes da plântula, sem maiores prejuízos. Feito isso, foram lavadas, organizadas e fotografadas, para que se pudessem fazer as comparações.

Como o plantio do algodão visava um efeito mais ilustrativo do que quantitativo do experimento, achou-se por bem não fazer, nestas condições, nenhum estudo mais aprofundado do comportamento do sistema radicular, pois as condições desse trabalho, no que se refere a volume de solo e tempo para o desenvolvimento da planta, não permitiam tal procedimento, o que, no entanto, não invalida as diferenças visuais observadas e fotografadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Curva densidade do solo x umidade

Ao analisar as curvas de compactação, mostradas na Figura 2, observa-se nos quatro solos que, para a aplicação de uma mesma energia de compactação, a densidade do solo aumentou com a umidade até atingir um máximo. Após atingir esse ponto, adições posteriores de água acarretaram uma diminuição na densidade do solo, corroborando com os trabalhos desenvolvidos por BODMAN (1967), GROHMANN (1972) e BAVER et alii (1972), que classificam de "ótimo" para a compactação o teor de água no qual a densidade for máxima.

Se se comparar o Latossolo Roxo sob cultivo com o Latossolo Vermelho Amarelo sob cultivo, onde o teor de matéria orgânica é praticamente o mesmo, nota-se que a umidade "ótima" para o Latossolo Roxo é maior que para o Latossolo Vermelho-Amarelo. Este fato pode ser atribuído à diferença na quantidade de argila, confirmando as afirmações de GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965), PAUL (1973), FAURE (1976) e LARSON et alii (1980). Entre

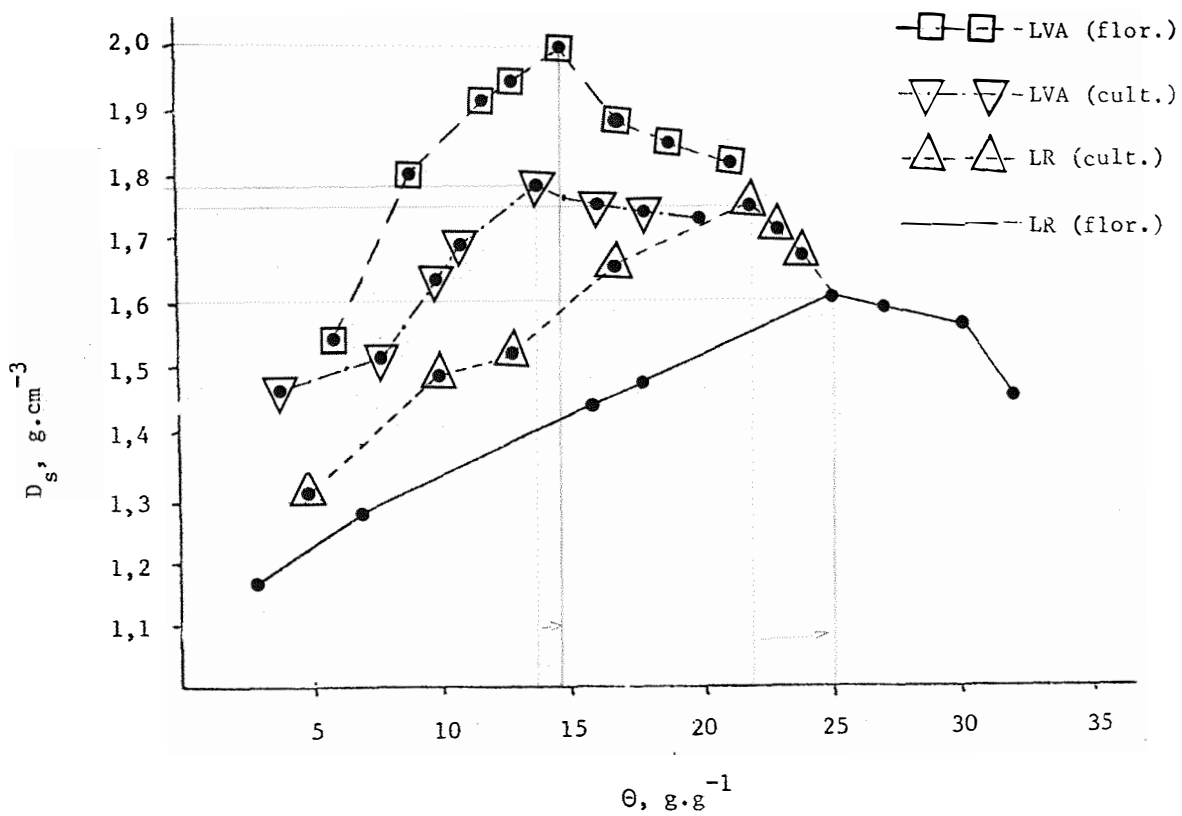


FIGURA 2 - Curvas de compactação do Latossolo Roxo e do Latossolo Vermelho-Amarelo.

tanto, se solos com mesmo teor de argila e diferentes concentrações de matéria orgânica forem comparados, como é o caso do Latossolo Roxo sob floresta e cultivo, constata-se que a umidade ótima para o primeiro é maior que para o segundo, muito provavelmente devido à diferença no teor de matéria orgânica que é maior no solo sob floresta, concordando com os experimentos de TAYLOR e HENDERSON (1959).

Nos dados obtidos com o Latossolo Vermelho Amarelo sob floresta e cultivo, praticamente não foi constatada diferença na umidade ótima ($U\% = 15$ no sob floresta; $U\% = 14$ no sob cultivo), podendo este fato estar relacionado com a semelhança nos valores da matéria orgânica e da argila encontradas neste solo sob as duas condições.

É interessante observar, então, que um solo com maior quantidade de matéria orgânica pode sofrer ação de forças externas com umidade muito maior antes de atingir o mesmo nível de densidade de um solo com baixo teor de matéria orgânica. Esta observação é muito importante no que diz respeito à umidade ótima de preparo do solo.

O nível de compactação foi maior no Latossolo Vermelho-Amarelo, notadamente na condição de floresta, onde a densidade máxima foi de $1,98 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto que na condição de cultivo, esse índice foi de $1,77 \text{ g.cm}^{-3}$. No Latossolo Roxo, as densidades máximas foram de $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente, para as condições de floresta e cultivo. Esse comportamento pode ser explicado a partir dos dados da análise granulométrica, onde observa-se que o Latossolo Vermelho-Amarelo tem maior porcentagem de areia e tal condição não permite a formação de grânulos estáveis, tornando-o mais susceptível à compactação, segundo conclusões de

BODMAN e CONSTANTIN (1965), SANCHEZ (1981), AKRAM e KEMPER (1979) e LARSON et alii (1980).

Ao considerar-se o teor de argila dos solos estudados, nota-se que o Latossolo Vermelho Amarelo, mais compactado, continha teores próximos a 20%, enquanto o Latossolo Roxo, menos compactado, possuía valores próximos a 40%, resultado análogo ao observado por FAURE (1976).

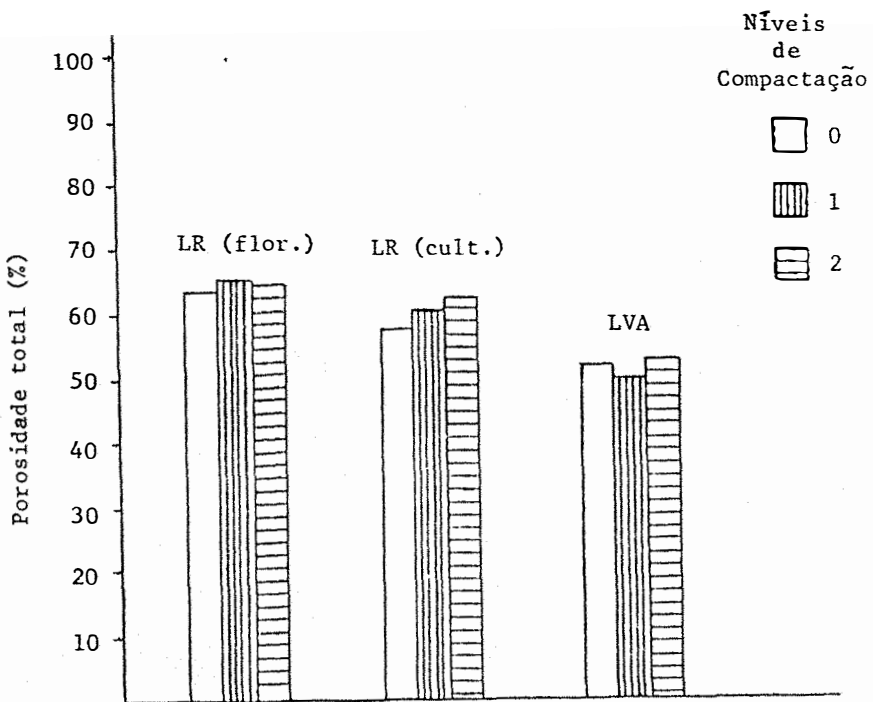
A participação da matéria orgânica no comportamento dos solos, quando sujeitos à compactação, pode ser confirmada pelos resultados apresentados pelo Latossolo Roxo sob floresta (Figura 2), o qual mostrou uma densidade muito menor ($d_s = 1,60 \text{ g.cm}^{-3}$) que sob cultivo ($d_s = 1,74 \text{ g.cm}^{-3}$), confirmando os resultados relatados por TAYLOR e HENDERSON (1959), BODMAN (1967) e LARSON e ALMARAS (1971). Já no Latossolo Vermelho-Amarelo tal desempenho não se verificou, havendo maior compactação sob floresta. Cumpre relembrar que a diferença no teor de matéria orgânica no Latossolo Vermelho-Amarelo entre as condições de floresta e cultivo é muito menor que a encontrada para o Latossolo Roxo. A menor susceptibilidade à compactação desse solo, quando comparado ao Latossolo Vermelho Amarelo, pode ser explicada a partir de sua estrutura. Como SANCHEZ (1981) descreve, o Latossolo contém microagregados extremamente estáveis, do tamanho de grãos de areia, que lhe conferem um comportamento semelhante a um solo arenoso, apesar de possuir teores de argila acima de 50%. Por ocasião do processo de compactação, esses microagregados, analogamente ao que acontece com os grãos de areia, sofrem um rearranjo mais denso pela diminuição dos espaços entre os microagregados ou grãos de areia. Ocorre que, por serem formados

pela união de partículas de argila, os microagregados possuem microporos no seu interior, conferindo-lhes uma menor densidade. Já no grão de areia isso não acontece, pois o mesmo não tem microporos e devido a esse fato a apresenta maior densidade, após sofrer a mesma intensidade de compactação.

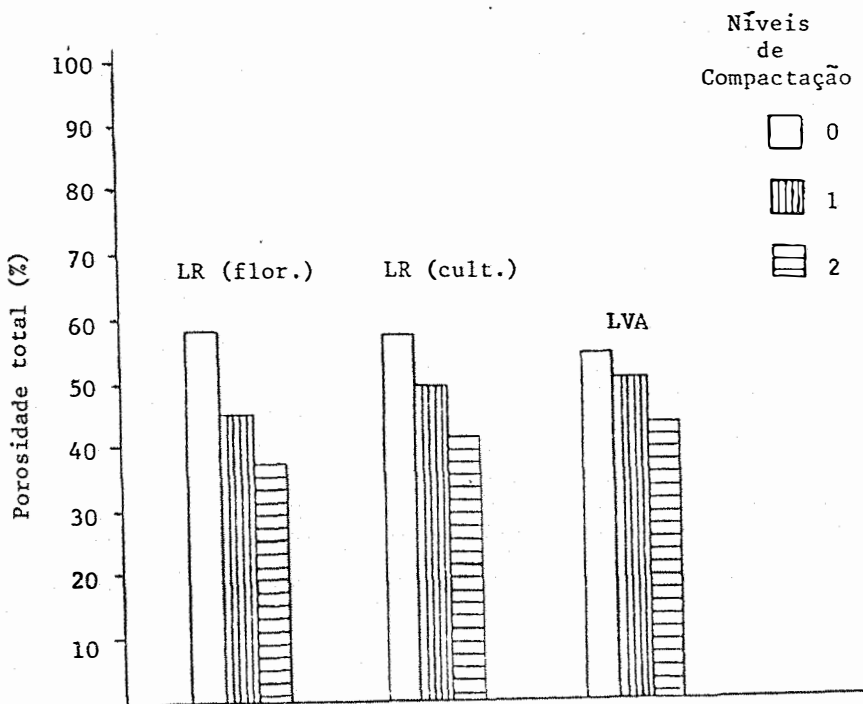
4.2. Porosidade

Os dados referentes à porosidade total determinada (Figura 3(a)) mostraram-se bastante semelhantes, não havendo grandes variações nos seus valores com a elevação do nível de compactação. O Latossolo Roxo sob cultivo apresenta uma tendência de aumento da porosidade total nessa situação. Esse comportamento não foi encontrado em trabalhos feitos por LUGO LOPEZ e ACEVEDO (1956) e GROHAMN e QUEIROZ (1966), onde sustentam ser o volume de sólidos praticamente indeformável, atribuindo à redução no volume de poros o menor volume total do solo quando da compactação.

Uma possível explicação para tal fato poderia estar no aspecto da porosidade total ser calculada pelo volume de água retida pelo solo quando saturado. Sendo assim, como os solos estudados, quer pelo teor de areia ou pela quantidade de microagregados, apresentam um comportamento de solo arenoso, no que tange ao movimento de água, a simples retirada da amostra da bandeja de saturação para a colocação na balança poderia acarretar uma inevitável perda de água pela amostra na condição 0 de compactação, devido ao excessivo afrouxamento do solo. Isto seria suficiente para causar as pequenas diferenças alcançadas. Com a elevação da compactação para os níveis 1 e 2, há um rearranjo mais denso das partí-



(a)



(b)

FIGURA 3 - Porosidade total: (a) determinada; (b) calculada.

culas do solo, determinando uma acentuada diminuição na perda de água na referida fase da metodologia empregada.

Os problemas ocasionados por essa metodologia na determinação da porosidade total podem ser confirmados quando confontra-se os dados da porosidade determinada (Figura 3(a)) com os da porosidade calculada (Figura 3(b)).

Pode-se notar que, com a elevação da densidade do solo, a porosidade calculada decresce, visto ser esta inversamente proporcional aquela e lembrando não haver alteração na densidade das partículas com a compactação.

A redução da porosidade calculada foi maior no Latossolo Roxo sob floresta, havendo perdas de 21% de poros quando o nível de compactação foi elevado da condição 0 para 2. Essa mesma alteração na densidade do solo acarretou uma diminuição nos poros de 16 e 11%, respectivamente, para o Latossolo Roxo sob cultivo e Latossolo Vermelho Amarelo.

A menor porosidade calculada observada nos Latossolo Roxo sob florestas em relação aos outros solos deve-se, no níveis 1 e 2 de compactação, a menor densidade de partículas apresentada por esse solo.

Em condições normais, a porosidade calculada é um pouco superior a determinada e a diferença entre ambas é compactada aos poros bloqueados que ao não serem preenchidos pela água durante o processo de satu

ração ocasionam uma subestimação da porosidade. Em nosso estudo esse fato não ocorreu em virtude dos problemas mencionados na determinação da porosidade total.

No que concerne aos resultados obtidos de macro e micro porosidade em relação ao volume de solo (Figuras 4 e 5), notou-se, de maneira geral, que ao se aumentar o nível de compactação, houve um aumento de microporos à custa da diminuição dos macroporos, concordando com os estudos realizados por STEINBRENNER e GESSEL (1955), SWARTZ e KARDOS (1963), TAYLOR e BURNETT (1963) e GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965).

Em todos os solos, as maiores perdas de macroporos e, conseqüentemente, os maiores acréscimos de microporos aconteceram quando o nível de compactação passou da condição 0 para a 2. Os macroporos diminuíram de 29% para 10% no Latossolo Roxo sob floresta, de 26% para 17% no Latossolo Roxo sob cultivo e de 32% para 25% no Latossolo Vermelho-Amarelo.

No Latossolo Roxo, sob floresta e cultivo, a mudança do nível 0 para o nível 1 de compactação, causou maiores modificações na distribuição de poros que a alteração do nível 1 para o nível 2, exatamente o oposto do ocorrido com o Latossolo Vermelho-Amarelo.

Ao utilizar-se das Figuras 6 e 7, elaboradas tomando-se a macro e micro porosidade no nível 0 de compactação como 100%, constatase, no aspecto relativo à distribuição dos poros nas três amostras de solo, que no Latossolo Roxo sob floresta ocorreram as maiores perdas de macroporos (66%) e os maiores acréscimos de microporos (57%), fato ocorrido quando o nível de compactação foi elevado da condição 0 para a 2. Nas

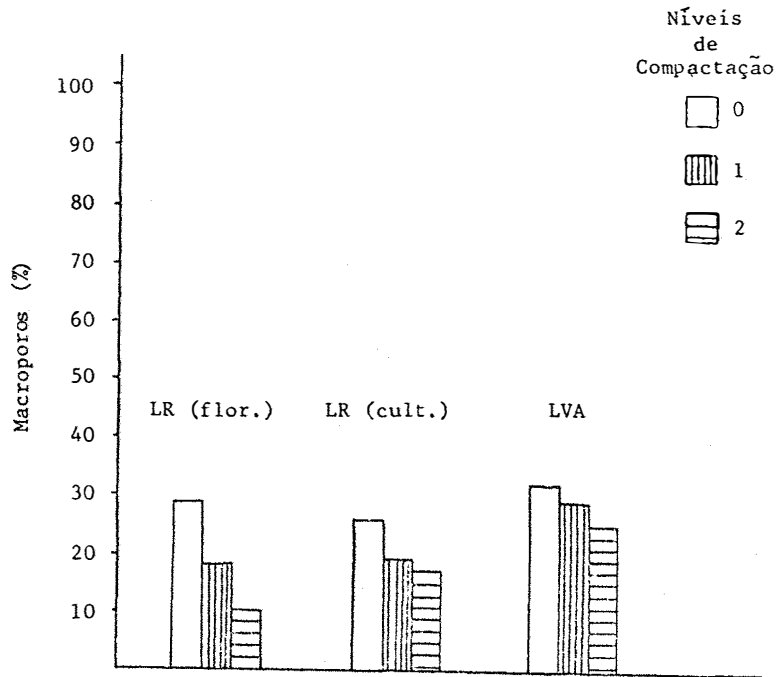


FIGURA 4 - Porcentagem de macroporos nos três níveis de compactação para os dois solos.

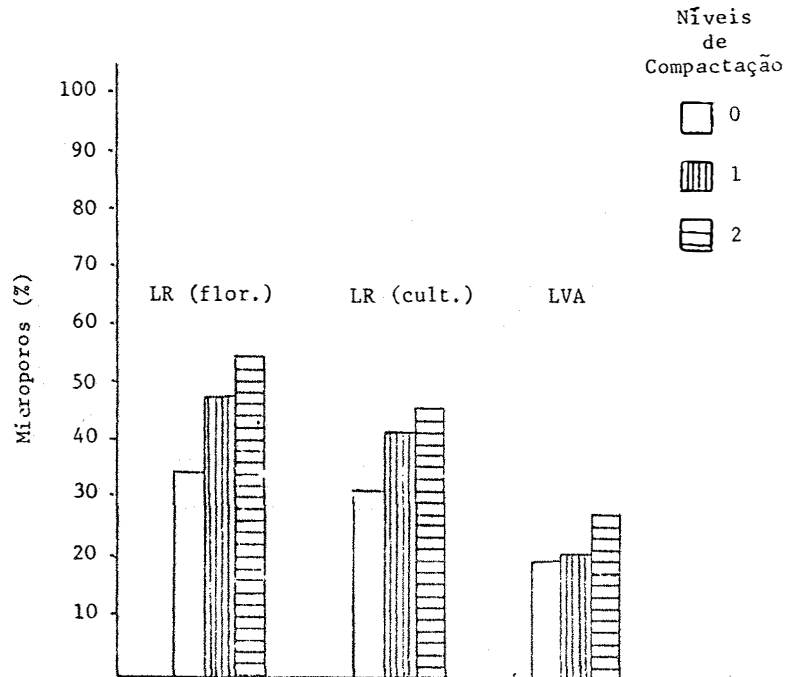


FIGURA 5 - Porcentagem de microporos nos três níveis de compactação para os dois solos.

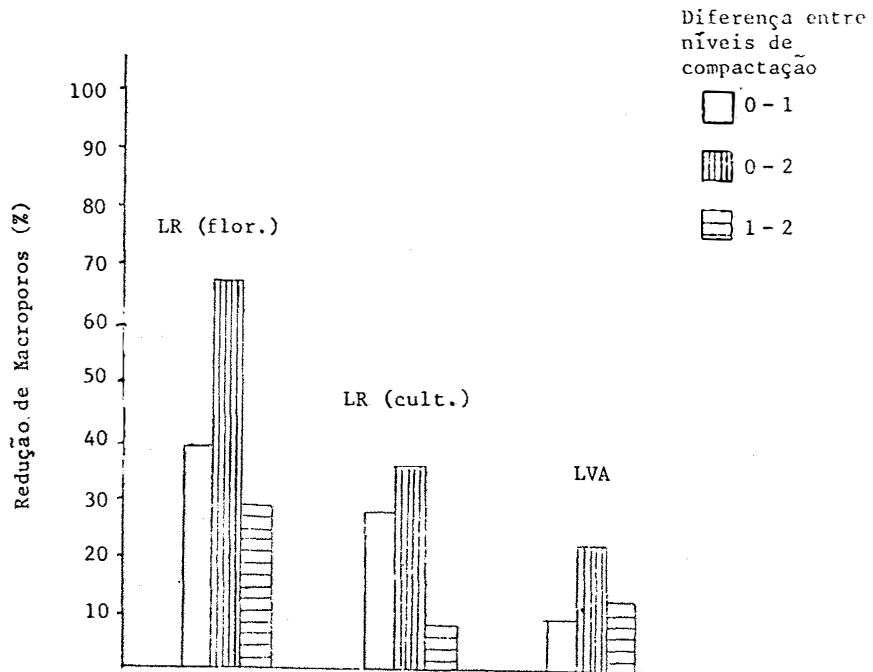


FIGURA 6 - Reduções percentuais de macroporos devido à elevação do nível de compactação para os dois solos.

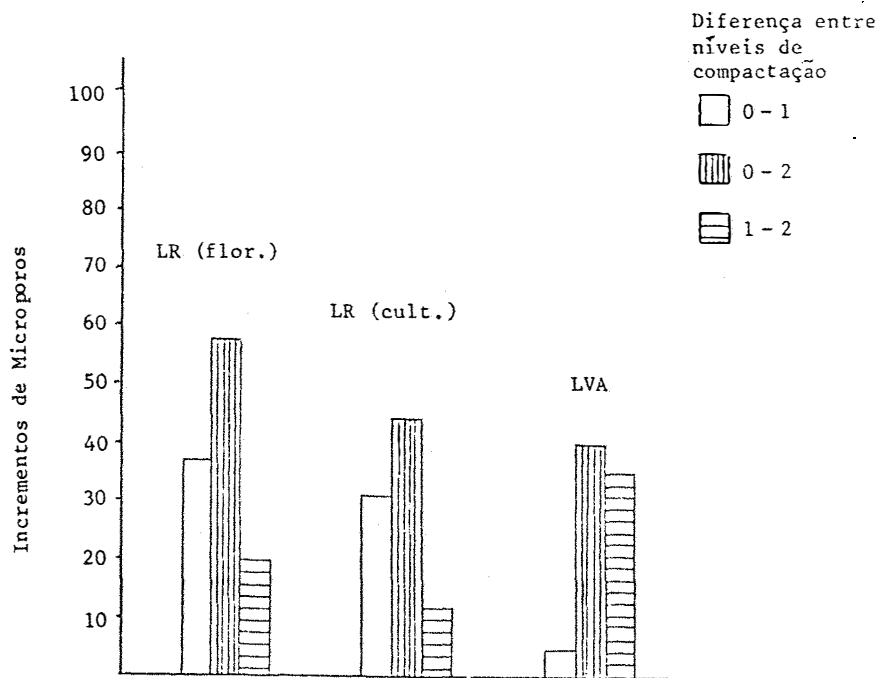


FIGURA 7 - Incrementos percentuais de microporos devido à elevação do nível de compactação para os dois solos.

outras amostras de solo as alterações havidas, quando da elevação do nível de compactação citado, foram menores já que as perdas de macroporos atingiram a 35 e 22%, respectivamente para o Latossolo Roxo sob cultivo e para o Latossolo Vermelho-Amarelo.

A pequena variação constatada nos dados do Latossolo Vermelho-Amarelo pode ser explicada a partir da análise feita das curvas densidade do solo versus umidade (Figura 2), onde se fez referência ao fato de o Latossolo Vermelho-Amarelo atingir densidades maiores que o Latossolo Roxo. Se atribuir-se à densidade máxima alcançada pelas amostras o valor de 100% na Figura 8, tem-se que, para o nível 1 de compactação, correspondendo à densidade do solo de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$, o Latossolo Vermelho-Amarelo terá um valor correspondente a 66% da sua compactação máxima, enquanto o Latossolo Roxo sob floresta e sob cultivo atingirá os índices de 81% e 75% respectivamente; no nível 2 de compactação, ou seja, para densidade $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, esses números correspondem a 94%, 86% e 76%, respectivamente no Latossolo Roxo sob floresta, sob cultivo e no Latossolo Vermelho-Amarelo.

Esses índices permitem afirmar que a intensidade de modificação nas propriedades do solo, devido à alteração da sua densidade, tinha valores distintos, sendo maior no Latossolo Roxo sob floresta e menor no Latossolo Vermelho-Amarelo.

As Figuras 9 e 10 mostram a porcentagem de macro e microporos em relação à porosidade total e nela observa-se que a compactação alterou essa relação. No nível 0 de compactação, o Latossolo Vermelho-Amarelo tem maior porcentagem de macroporos em relação aos microporos, ao contrário do ocorrido com o Latossolo Roxo, tanto sob floresta como sob cul-

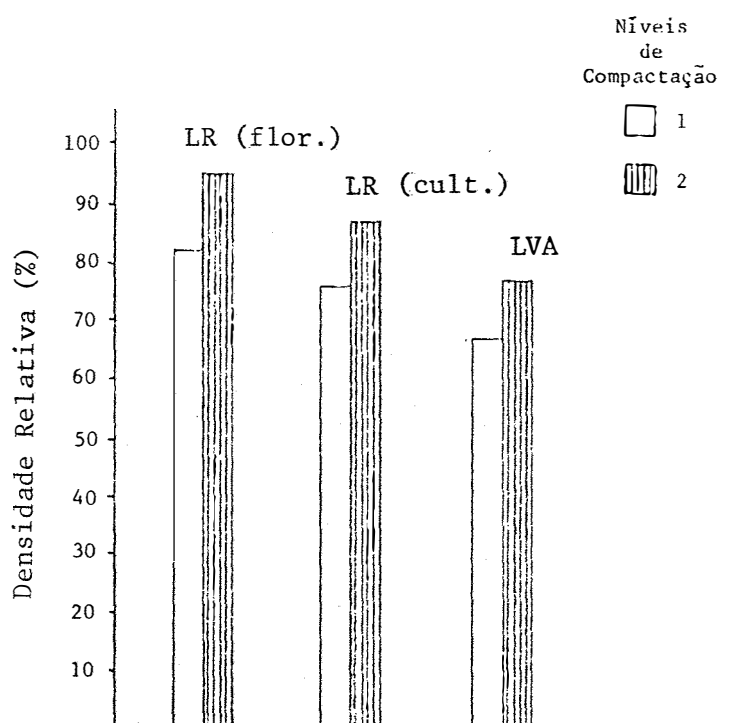


FIGURA 8 - Relação percentual dos níveis 1 e 2 de compactação, com a densidade máxima atingida em cada solo.

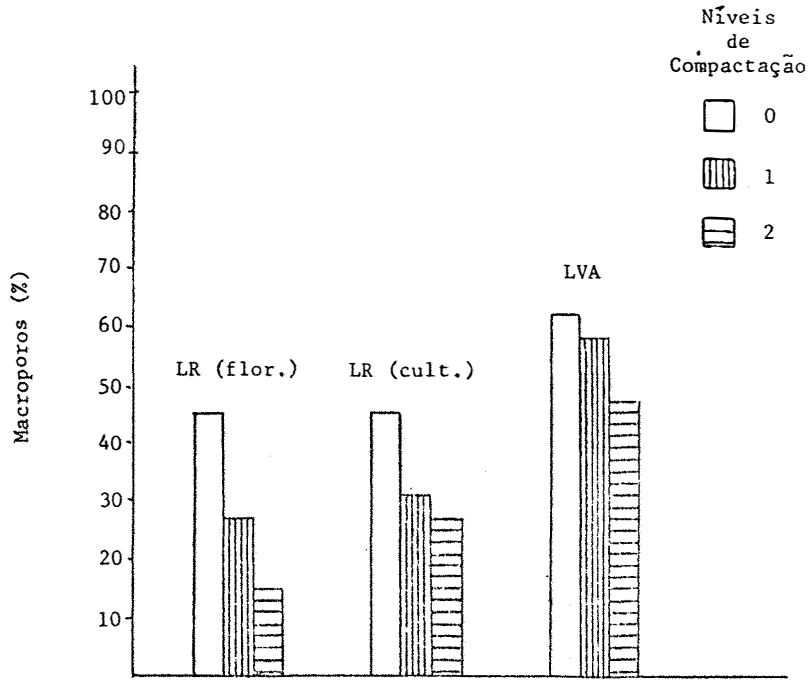


FIGURA 9 - Porcentagem de macroporos em relação à porosidade total nos três níveis de compactação para os dois solos.

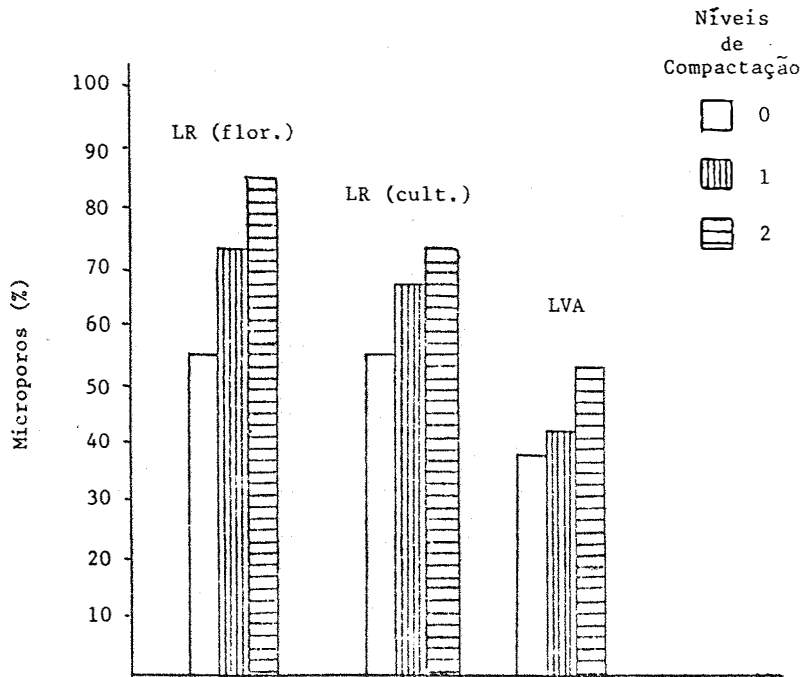


FIGURA 10 - Porcentagem de microporos em relação à porosidade total nos três níveis de compactação para os dois solos.

tivo.

Quando da mudança do nível 0 de compactação para o nível 1 essa relação pouco se modificou no Latossolo Vermelho-Amarelo, enquanto que no Latossolo Roxo, em ambas as condições, aumentou a porcentagem de microporos, notadamente na condição de floresta. Na alteração do nível 0 de compactação para o nível 2, o aumento de microporos em relação à porosidade total ficou bastante evidenciado, chegando a valores de até 85% no Latossolo Roxo sob floresta e a 73% nesse mesmo solo sob condição de cultivo. Essa porcentagem também se alterou, embora em pequena escala, no Latossolo Vermelho-Amarelo, chegando a atingir 53%.

Em todos os níveis de compactação houve, no Latossolo Roxo, nas duas condições, uma maior porcentagem de microporos, sendo que no Latossolo Vermelho-Amarelo esse fato só se deu no nível de compactação 2.

Baseado na afirmação de KIEHL (1979), que a proporção ideal para um solo corresponde a 2/3 de microporos e 1/3 de macroporos, observa-se que é para o Latossolo Roxo sob cultivo, no nível 1 de compactação, onde a porcentagem de macroporos é de 31% e a de microporos atinge a 67%, que se tem a condição que mais se aproxima da ideal.

4.3. Curva de retenção de água

Analisando-se as curvas de retenção de água, representadas pelas Figuras 11, 12 e 13, observa-se que o solo com maior teor de argila, no caso o Latossolo Roxo sob floresta e sob cultivo, reteve maior quanti-

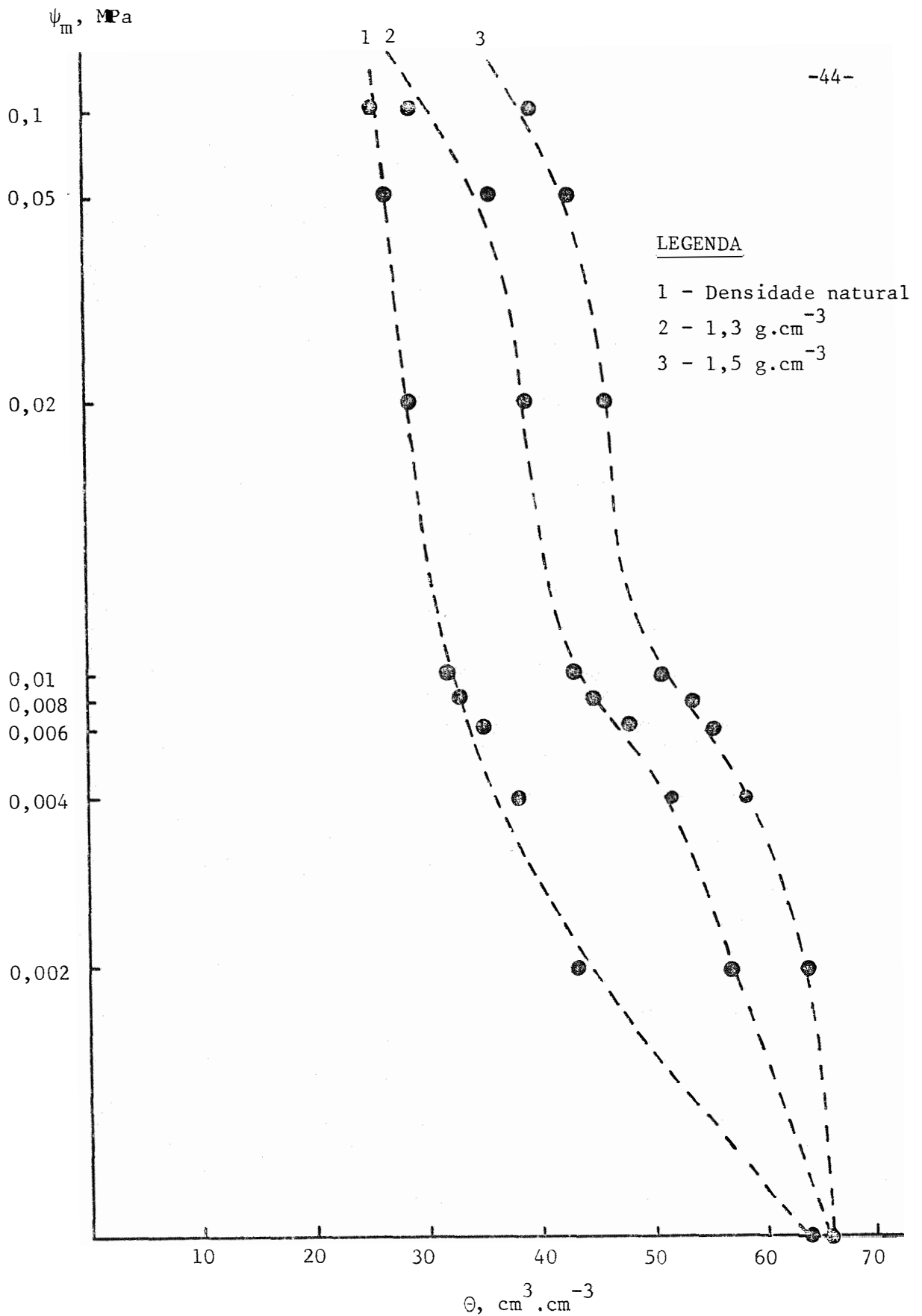


FIGURA 11 - Curvas de retenção de umidade nos três níveis de compactação para o Latossolo Roxo sob floresta.

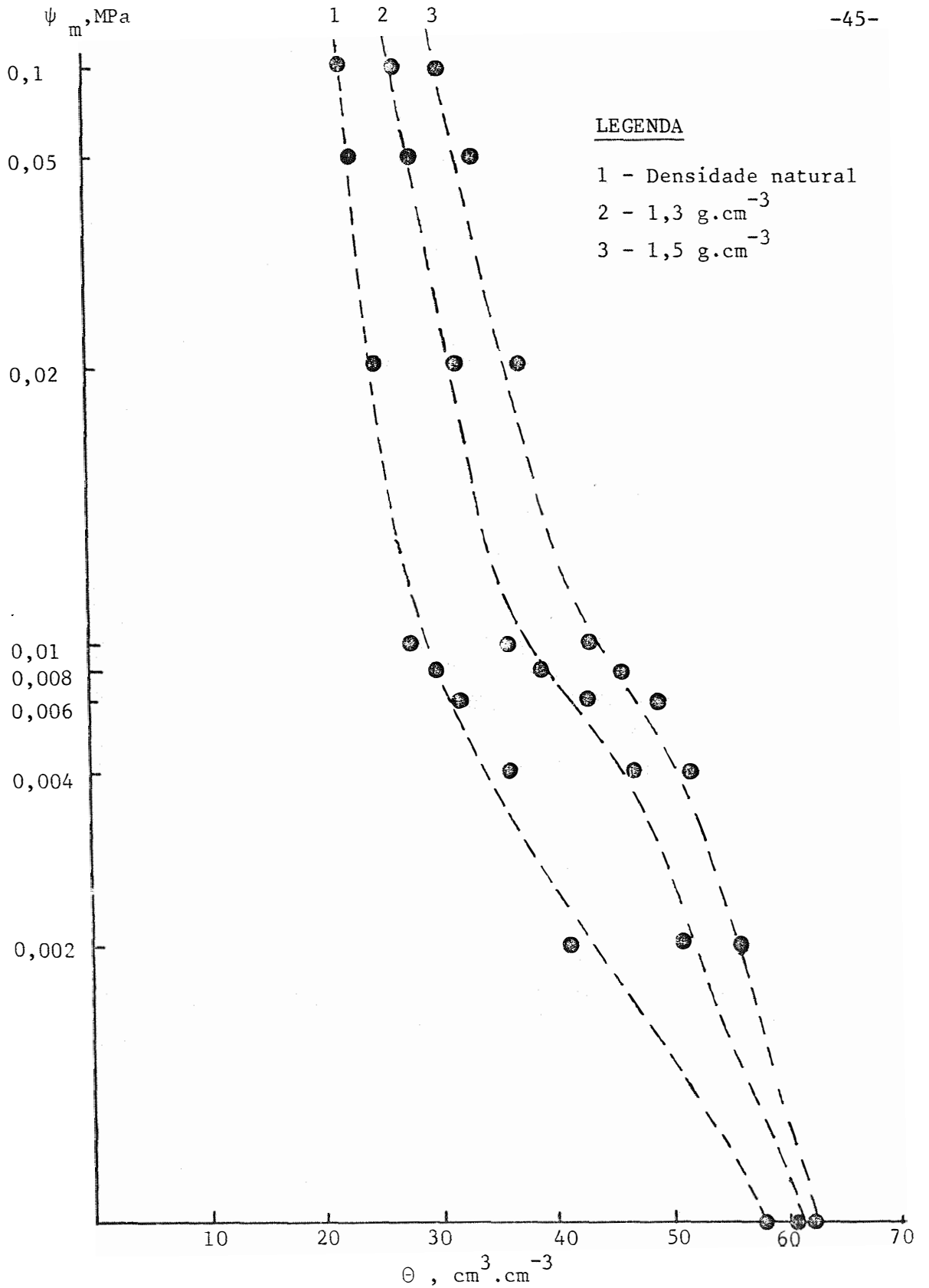


FIGURA 12 - Curva de retenção de umidade nos três níveis de compactação para o Latossolo Roxo sob cultivo.

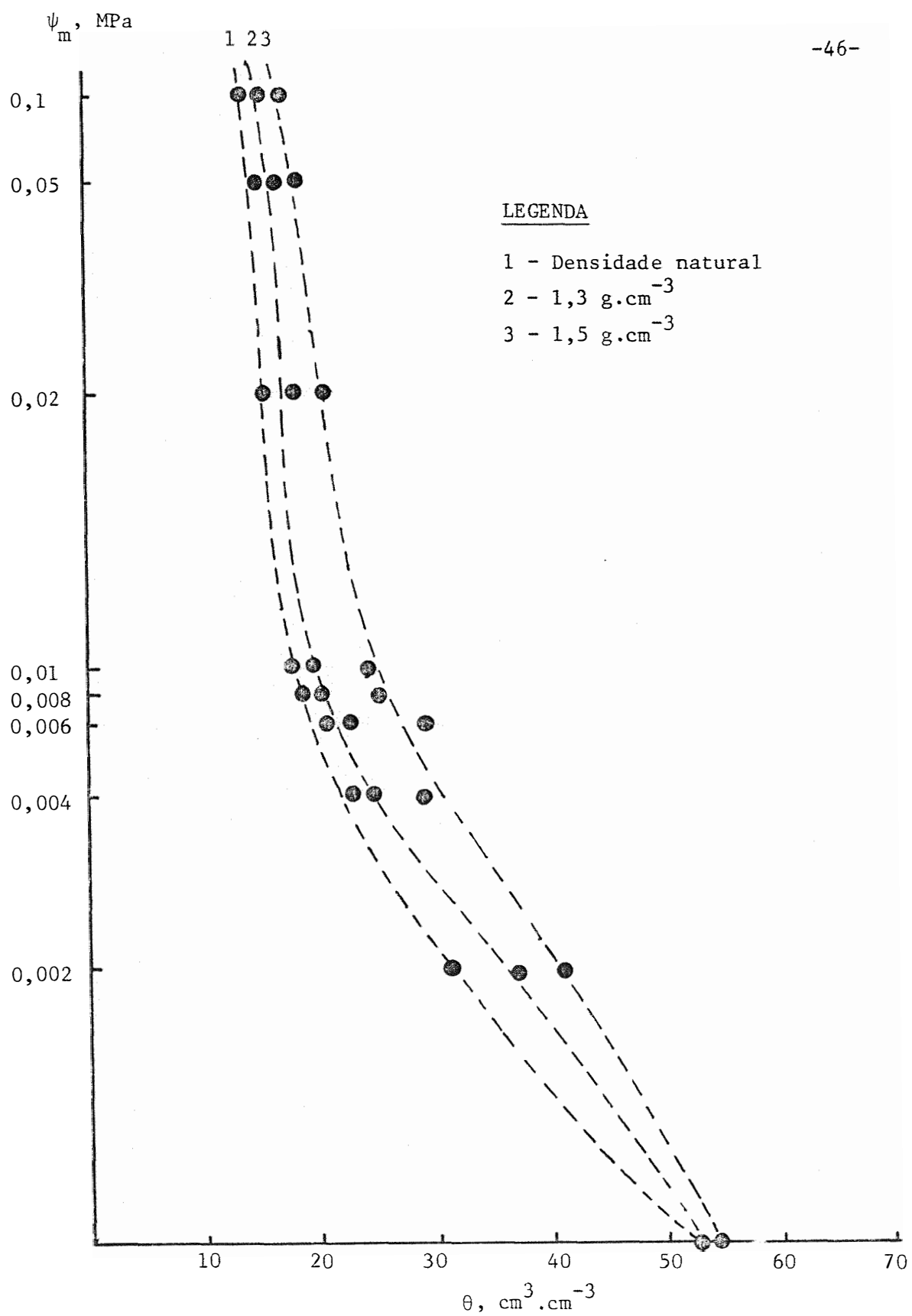


FIGURA 13 - Curvas de retenção de umidade nos três níveis de compactação para o Latossolo Vermelho-Amarelo.

dade de água em todas as tensões, reafirmando as conclusões feitas por REICHARDT (1978) e BRADY (1983).

A influência da matéria orgânica nessa propriedade do solo é bastante evidenciada quando se comparam os resultados do Latossolo Roxo sob floresta (Figura 11) com aqueles obtidos para este solo sob cultivo (Figura 12). É fácil verificar que o solo sob floresta, com maior teor de matéria orgânica, contém maiores quantidades de água em todas as tensões, concordando com as observações de BAVER et alii (1972), KIEHL (1979) e BRADY (1983).

No que diz respeito às diferenças ocorridas entre os níveis de compactação ficou demonstrado, nas três amostras de solo, que a compactação aumentou a retenção de água em todas as tensões, sendo encontradas maiores diferenças quando o nível de compactação passou de 0 para 2. Tomando-se como exemplo a tensão 0,006 MPa, observamos um incremento na quantidade de água retida de 21% para o Latossolo Roxo sob floresta, de 17% para o Latossolo Roxo sob cultivo e de 8% para o Latossolo Vermelho-Amarelo. O aumento na retenção de água foi devido ao incremento de microporos nos solos compactados (Figura 7), visto serem os mesmos os responsáveis por essa propriedade na faixa estudada.

Um fato muito esclarecedor é a verificação de uma relação bastante estreita entre os dados de porosidade e os da curva de retenção de água.

Quando o solo estava saturado, ou seja, tensão nula, observou-se uma pequena diferença entre a quantidade de água retida nos três níveis de compactação, havendo, contudo, maior teor nos níveis mais elevados, comprovando os dados de porosidade (Figura 3), notadamente os do Latossolo

Vermelho-Amarelo. Essa situação contraria as afirmações de JAMIESON (1956), BOX e TAYLOR (1962) e ARCHER e SMITH (1972), segundo as quais, uma amostra compactada retém menos água a baixas tensões, que uma não compactada.

As explicações dadas sobre os problemas metodológicos na determinação da porosidade total esclarecem, em parte, esse resultado pois utiliza-se o mesmo método para determinar a porosidade total e a água retida a 0 MPa.

Observou-se também a influência da porosidade na amplitude de variação da água retida com a compactação que foi maior no Latossolo Roxo sob floresta (Figura 11), semelhante ao ocorrido com a variação dos microporos (Figura 5). A pequena alteração observada no Latossolo Vermelho-Amarelo, quando da passagem do nível 0 de compactação para o nível 1, é compatível com o incremento de microporos ocorrido nessa mesma condição, como pode ser observado na Figura 7.

Considerando-se a afirmação feita por SANCHEZ (1981) de que a amplitude de água disponível para as plantas nos Oxissolos tropicais se encontra entre as tensões de 0,01 e 0,1 MPa, constata-se para as três amostras de solo, que o aumento do nível de compactação ocasionou um incremento na porcentagem de água disponível, sendo esse valor maior quando o solo foi submetido ao mais alto grau de compactação (Figura 14), referendando afirmações de HILL e SUMMER (1966) e CAMARGO (1983).

Verifica-se ainda, através da Figura 14, que os valores de água disponível foram praticamente iguais para os três níveis de compactação quando se compara o Latossolo Roxo sob Floresta ao sob cultivo, sendo que ambos foram superiores aos encontrados no Latossolo Vermelho-Amarelo, fato que pode ser atribuído à maior porcentagem de microporos daquelas amostras em relação a essa, conforme pode ser observado na Figura 10.

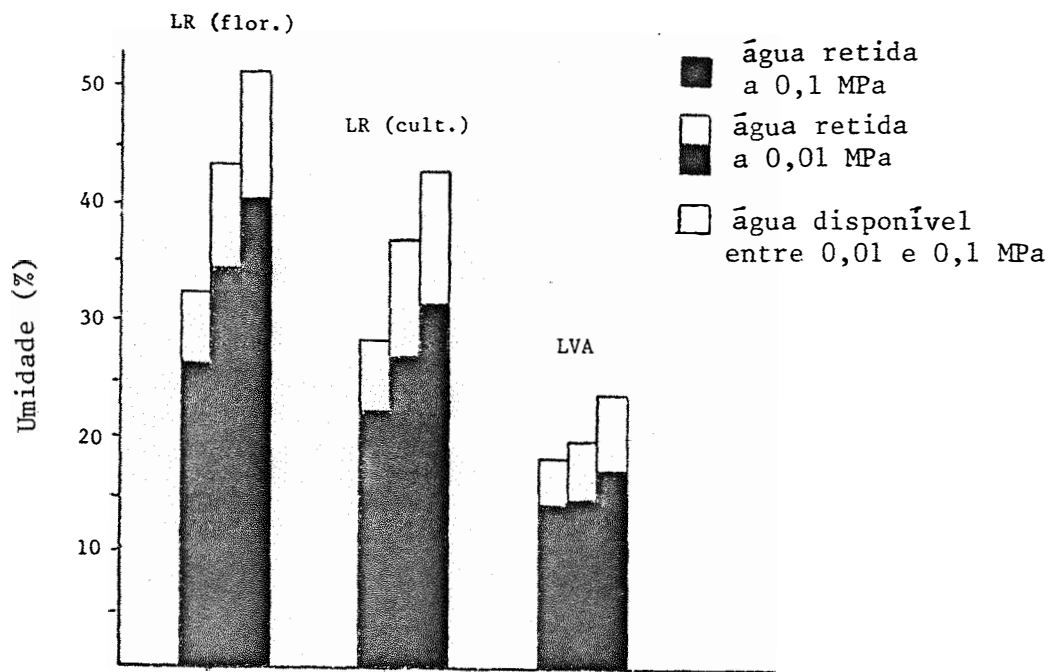


FIGURA 14 - Porcentagem de água retida a 0,01 MPa, 0,1 MPa e água disponível entre essas tensões.

4.4. Condutividade hidráulica saturada

Os resultados da Figura 15 mostram, nas três amostras de solo estudadas, que a elevação do nível de compactação ocasionou uma acentuada queda na condutividade hidráulica saturada, fato também observado por GHILDYAL e SATYANARAYAMA (1965) e COLETTI e DEMATTÊ (1982). Na elevação do nível de compactação de 0 para 1, a condutividade hidráulica saturada passou de 15 cm.h^{-1} para 8 cm.h^{-1} no Latossolo Roxo sob floresta, de $11,8 \text{ cm.h}^{-1}$ para 6 cm.h^{-1} no Latossolo Roxo sob cultivo e de $17,8 \text{ cm.h}^{-1}$ para $5,6 \text{ cm.h}^{-1}$ no Latossolo Vermelho-Amarelo.

Tomando-se a condutividade hidráulica saturada no nível 0 de compactação como 100%, constataram-se (Figura 16) perdas em todos os outros níveis, principalmente no nível 2, onde chegaram a 86% no Latossolo Roxo sob floresta, 84% no Latossolo Roxo sob cultivo e 97% no Latossolo Vermelho-Amarelo. Nesse nível de compactação, para as três amostras de solo, os valores de condutividade hidráulica foram muito baixos (Figura 15), notadamente para o Latossolo Vermelho-Amarelo, atingindo um valor de $0,68 \text{ cm.h}^{-1}$.

Ao comparar-se os resultados do Latossolo Roxo com os do Latossolo Vermelho-Amarelo, nos mesmos níveis de compactação (Figura 15), nota-se não ter havido grandes variações, apesar da diferença textural existente entre as amostras de solo, valendo dizer que a composição granulométrica é uma das características mais determinantes da condutividade hidráulica saturada.

Esse fato vem confirmar os aspectos abordados por SANCHEZ.

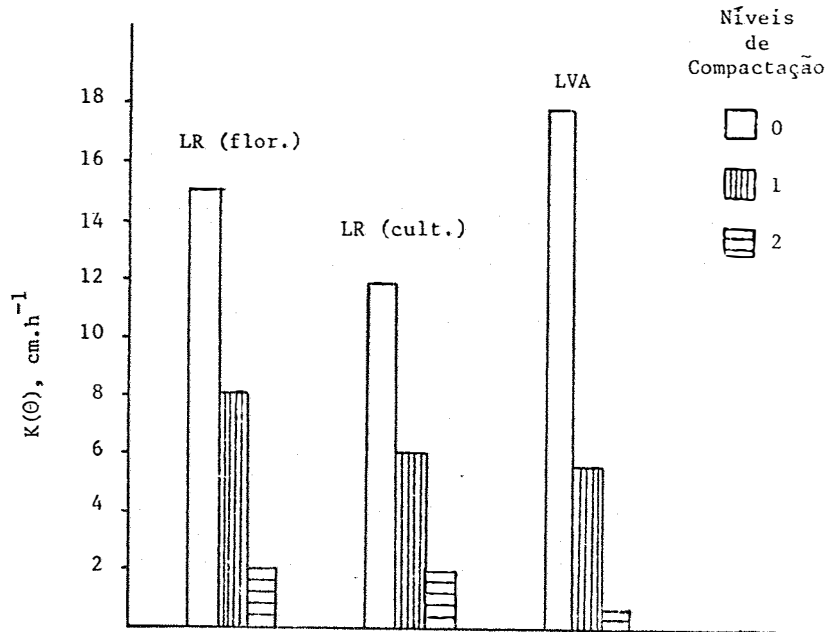


FIGURA 15 - Condutividade hidráulica saturada nos três níveis de compactação para os dois solos.

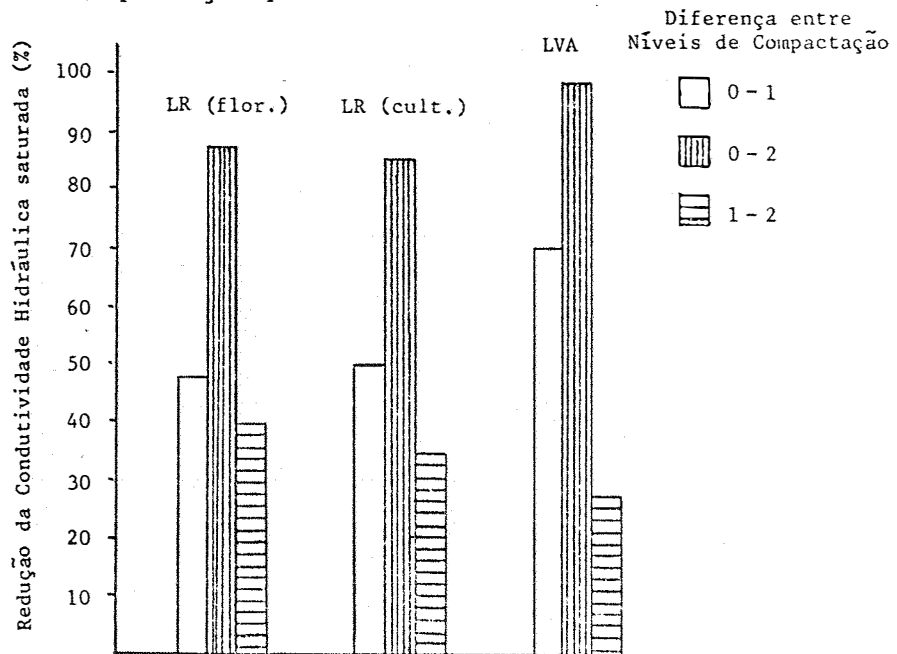


FIGURA 16 - Redução da condutividade hidráulica saturada devido à elevação do nível de compactação para os dois solos.

(1981), onde se ressalta a influência dos microagregados do Latossolo Roxo conferindo ao mesmo, apesar de bastante argiloso, um comportamento típico de um solo de textura média a arenosa, no que diz respeito ao movimento de água.

O confronto dos dados de condutividade hidráulica saturada (Figura 16) com as de macroporosidade (Figura 6) é bastante elucidativo no Latossolo Roxo sob floresta, em menor grau no Latossolo Roxo sob cultivo e muito pouco esclarecedor no Latossolo Vermelho-Amarelo. No primeiro solo a diminuição da condutividade hidráulica saturada é acompanhada, de maneira proporcional, da queda de macroporos, isto é, as perdas percentuais desses valores, com a elevação do nível de compactação, tem valores próximos, ao contrário do ocorrido com as outras amostras de solo, principalmente o Latossolo Vermelho-Amarelo, onde a elevação do nível de compactação do nível 0 para o nível 2 ocasiona uma perda percentual de condutividade hidráulica saturada acima de 90%, enquanto que, nessa mesma situação, a perda percentual de macroporos apresenta valores próximos a 20%. Cabe ressaltar que os macroporos estão diretamente relacionados com a condutividade hidráulica saturada, conforme CAMARGO (1983).

Sobre o Latossolo Vermelho-Amarelo, cabe aqui uma explicação, visto que a mudança da densidade do solo da condição natural para $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ ocasionou uma grande queda na condutividade hidráulica desse solo, de maneira semelhante ao ocorrido com o Latossolo Roxo. Acontece que, para alterar-se o nível de compactação citado, os acréscimos na densidade do solo foram de $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente para o Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Roxo sob cultivo e Latossolo Roxo sob

floresta, de onde conclui-se que, para diferentes acréscimos na densidade do solo, ocorreram mudanças na condutividade hidráulica saturada num mesmo grau de intensidade.

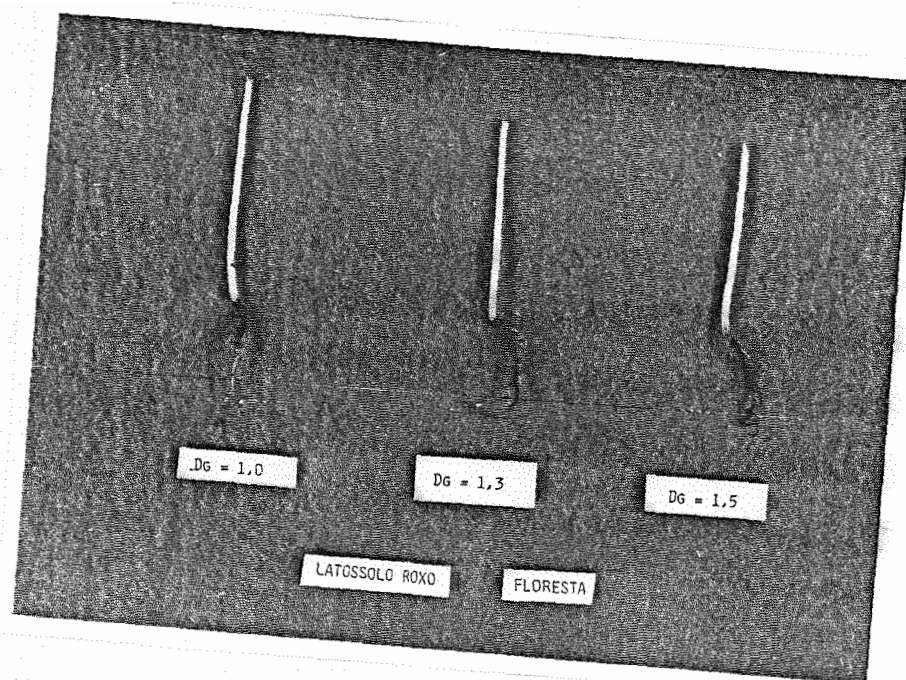
4.5. Observações do sistema radicular do algodoeiro

As observações foram feitas visualmente, sem aplicação de qualquer método quantitativo, para analisar o comportamento do sistema radicular de plântulas de algodão.

Observa-se na Figura 17 (a), (b) e (c) que a elevação do nível de compactação no Latossolo Roxo, tanto sob cultivo como sob floresta, ocasionou danos ao desenvolvimento do sistema radicular das plântulas de algodão, notadamente quando a densidade do solo atingiu valores de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

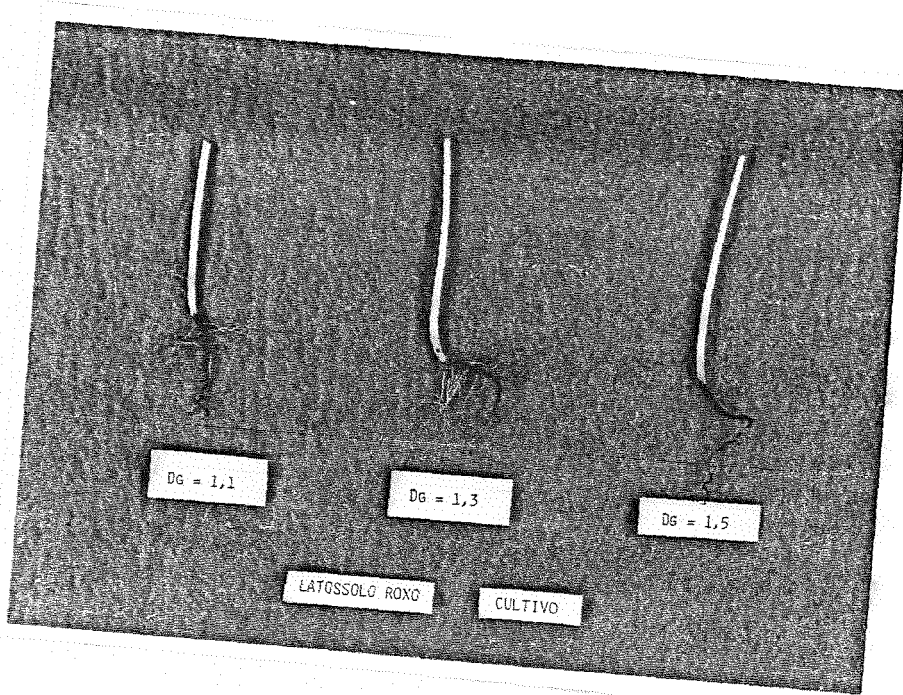
Enquanto no Latossolo Roxo sob floresta, as modificações ocasionaram um menor crescimento, nota-se para a condição sob cultivo, além de menor crescimento, um desvio bastante acentuado da raiz principal quando essa encontrou a camada compactada. A raiz, não conseguindo penetrar no solo, desenvolveu-se horizontalmente até encontrar um espaço com menor resistência, sendo que essa situação foi encontrada no limite entre a parede do tubo de PVC e o solo, aspecto bem evidenciado na Figura 17 (b).

Os resultados descritos estão perfeitamente compatíveis com

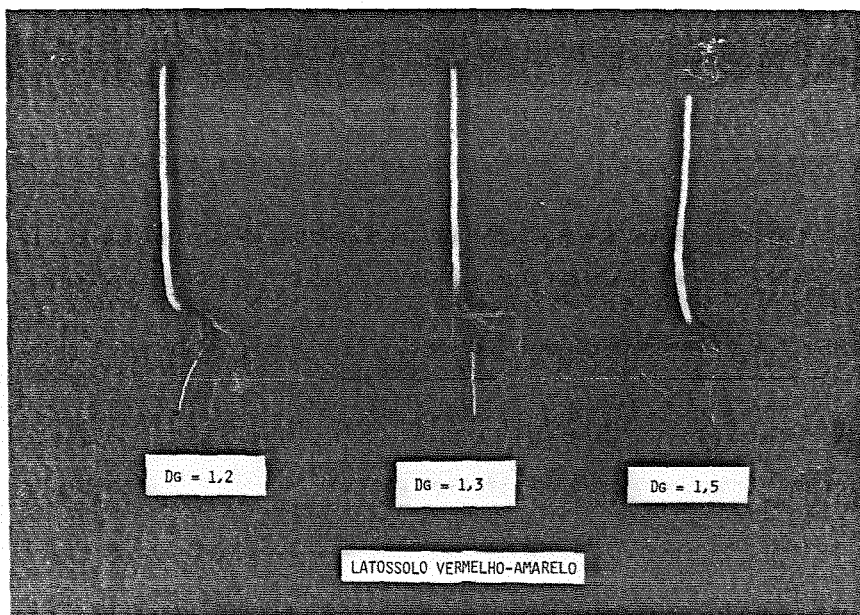


(a)

FIGURA 17 - Aspecto do sistema radicular de plântulas de algodão, desenvolvidas nas três amostras de solo (a, b, c), em três níveis de compactação.



(b)

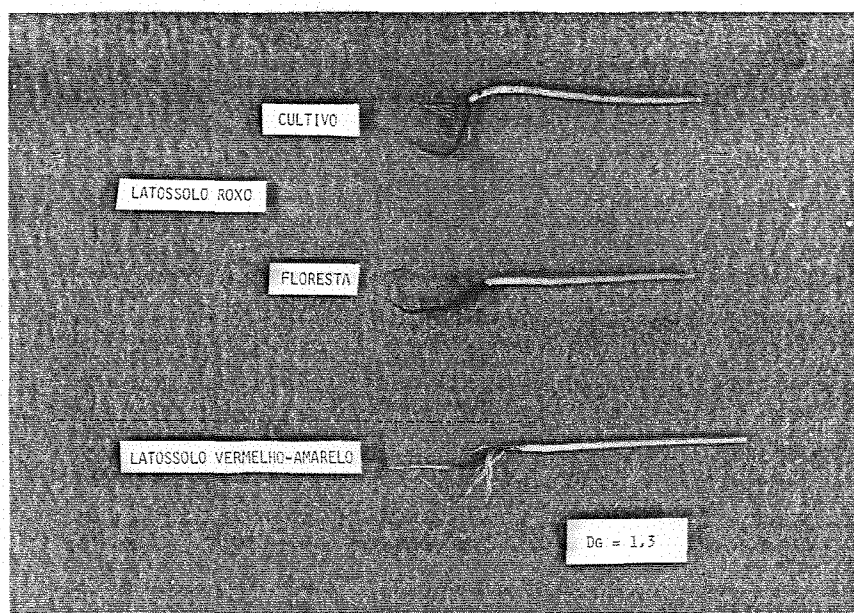


(c)

os trabalhos desenvolvidos por LAWTON (1945), GILL e MILLER (1956), BERTRAND e KOHNKE (1957), FLOCKER et alii (1959), GARDNER e DANIELSON (1964) e BRADY (1983), quando atribuíram à menor porcentagem de macroporos a menor penetração radicular, fato que pode ser constatado nesses solos (Figura 8).

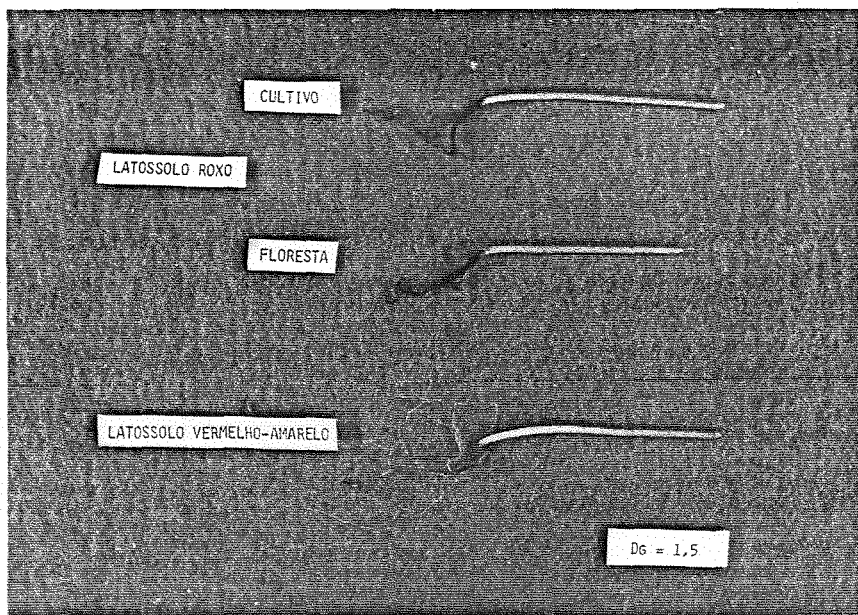
O comportamento do sistema radicular no Latossolo Roxo não se repetiu no Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 17 c), onde se verifica não haver grande diferença no sistema radicular das plântulas entre os níveis 0 e 1 de compactação havendo, contudo, uma maior tortuosidade da raiz no nível 0. No nível 2 constatou-se que, apesar de ter um crescimento maior, a raiz principal apresentou maior tortuosidade, como também um menor diâmetro em relação aos outros dois níveis.

A Figura 18 (a) e (b) permite a comparação do desenvolvimento do sistema radicular das plântulas de algodão, nas três amostras de solo, nos níveis 1 e 2 de compactação. Pode-se observar, em ambos os casos, um melhor desenvolvimento do sistema radicular no Latossolo Vermelho-Amarelo, confirmando as conclusões de VEIHMEYER e HENDRICKSON (1948) que afirmam ser o limiar de densidade do solo limitativo ao crescimento radicular maior em solos arenosos, quando comparados com os argilosos.



(a)

FIGURA 18 - Comparação do desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de algodão, desenvolvidas em dois níveis de compactação diferentes (a e b).



(b)

5. CONCLUSÕES

(a) O Latossolo Vermelho-Amarelo atingiu níveis de densidade do solo maiores em relação ao Latossolo Roxo, quando os solos foram submetidos à mesma energia de compactação.

(b) A umidade na qual atingiu-se a máxima compactação foi maior no Latossolo Roxo, notadamente sob floresta.

(c) A elevação do nível de compactação acarretou, em ambos os solos, diminuição dos macroporos, com conseqüente aumento dos microporos.

(d) A porcentagem de água retida nas tensões estudadas e a água disponível entre 0,01 e 0,1 MPa aumentou, nos dois solos, com a elevação do nível de compactação.

(e) Os índices de condutividade hidráulica saturada apresentaram acentuado declínio com a compactação, nos dois solos.

(f) Com a elevação do nível de compactação, houve menor desenvolvimento do sistema radicular das plântulas de algodão, em ambos os solos.

6. LITERATURA CITADA

ADAMS, E.P.; G.R. BLAKE; W.P. MARTIN e D.H. BOELTER, 1960. Influence of soil compaction in corn growth and development. Int. Cong. Soil Sci., 7^o, 1960. Anais, 26: 607-614.

AKRAM, M. e W.D. KEMPER, 1979. Infiltration of soils as affected by the pressure and water content at the time of compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., 43(6): 1080-1086.

ARCHER, J.R. e P.D. SMITH, 1972. The relation between bulk density available water capacity and air capacity of soils. J. of Soil Sci., 23: 475-480.

AUBERTIN, G.M. e L.T. KARDOS, 1965. Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 29: 290-293.

- BARLEY, K.P., 1962. The effects of mechanical stress on the growth of roots. J. Exp. Botany, 13: 95-110.
- BAVER, L.D.; W.H. GARDNER e W.R. GARDNER, 1972. Física de suelos. Union Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México.
- BERTRAND, A.R. e H. KOHNKE, 1957. Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 21: 135-140.
- BODMAN, G.B. e G.K. CONSTANTIN, 1965. Influence of particle size distribution in soil compaction. Hilgardia, 36: 567-591.
- BODMAN, G.B., 1967. The bulk volume of compacted soil as affected by water content and particle size. Anales de Edafologia e Agrobiologia, 26: 171-176.
- BOX, J.E. e S.A. TAYLOR, 1962. Influence of soil bulk density on matrix potential. Anales de Edafologia e Agrobiologia, 26: 119-122.
- BRADY, N.C., 1983. Natureza e propriedades dos solos. Livraria Freitas Bastos, Rio de Janeiro.
- BRUCE, R.R., 1955. An instrument for the determination of soil compactibility. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 19: 253-255.

- CAMARGO, O.A., 1983. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Fundação Cargill, Campinas. 44 p.
- CINTRA, F.L.D. e J. MIELNICZUK, 1983. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. R. bras. Ci. Solo, 7: 197-201.
- COLETI, J.T. e J.L.I. DEMATTÊ, 1982. Compactação artificial em solos. Experiências e dados. Informativos Álcool e Açúcar, 2: 34-38.
- CORSINI, P.C. e C.L.L.F. LIBERA, 1978. Efeitos da estrutura do solo na difusividade no Latossol Roxo. Científica, 6(3): 401-406.
- DASBERG, S. e K. MENDEL, 1971. The effects of soil water and aeration on seed germination. J. Ex. Botany, 22(73): 992-998.
- DAY, P.R. e G.C. HOLMGREN, 1952. Microscopic changes in soil structure during compression. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16: 73-77.
- DONNEN, L.D. e D.W. HENDERSON, 1953. Compaction of irrigated soils by tractors. Agric. Engng., 34: 94-95.
- EAGLEMAN, J.R. e V.C. JAMISON, 1962. Soil layering and compaction effects on unsaturated moisture movement. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26: 519-522.

ERIKSON, J.; I. HAKASON e DANFORS, 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Swedish Institute of Agricultural Engineering Buletin 354. 101 p.

FAURE, A., 1976. Influence of the clay fraction of soil susceptibility to compaction. Science du Soil, (2): 121-130.

FAURE, A., 1980. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. Soil and Tillage Research, 1: 97-105.

FLOCKER, W.J.; J.C. LINGLE e J.A. VOMOCIL, 1959. Influence of soil compaction on phosphorus absorption by tomato plants from an applied phosphate fertilizer. Soil Sci., 88: 247-250.

GARDNER, H.R. e R.E. DANIELSON, 1964. Penetration of wax layers by cotton roots as affected by some soil physical conditions. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 26: 183-186.

GHILDYAL, B.P. e T. SATYANARAYAMA, 1965. Effects of compaction on the physical properties of four different soils. Indian J. Indian Soc. Soil Sci., 13: 149-155.

GILL, W.R. e R.D. MILLER, 1956. A method for study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20: 154-157.

- GILL, W.R. e G.E. VANDENBERG, 1967. Soil dynamics in tillage and traction. USDA, Agr. Res. Ser., Agriculture Handbook, nº 316.
- GROHMANN, F. e J.P. QUEIROZ NETO, 1966. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de algodão. Bragantia, 25: 421-432.
- GROHMANN, F., 1972. Compacidade. In: MONIZ, A.C. (coord.), Elementos de pedologia. São Paulo, Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo, p. 93-99.
- HARRIS, W.L., 1971. The soil compaction process in compaction of agricultural soils. American Society of Agricultural Engineers.
- HILL, J.N.S. e M.E. SUMMER, 1966. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. Soil Sci., 103: 234-238.
- HOWARY, R.F.; M.J. SINGER e G.A. FRANTZ, 1981. Effects of soil properties water content, and comparative effort on the compaction of selected California forest and range soils. Soil Sci. Am. J., 45(2): 231-236.
- JAMIESON, V.C., 1956. Pertinent factors governing the availability of soil moisture to plants. Soil Sci. Am. J., 81: 459-471.
- JAMIESON, V.C.; H.A. WEAVER e I.F. REED, 1950. The distribution of tractor tire compaction effects in Cecil clay. Proc. Soil Sci. Amer., 15:34-37.

- KEMPER, N.D.; B.A. STEWART e L.K. PORTER, 1971. Effects of compaction on soil nutrient status. In: Compaction of agricultural soils. BARNES, K.K. (org.). St. Joseph, ASAE, p. 178-179.
- KHALID, M. e J.L. SMITH, 1978. Control of furrow infiltration by compaction. Transactions of the ASAE, 21(4): 654-657.
- KIEHL, E.J., 1979. Manual de edafologia: relações solo/planta. São Paulo, Ceres. 263 p.
- KLUTE, A., 1965. Laboratory Measurements of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil. In: Agron 9: Methods of Soil Analysis. Part I (Madson, Wisc.: American Society of Agronomy).
- LARSON, W.E. e R.R. ALLMARAS, 1971. Management factors and natural forces as related to compaction. In: BARNES, K.K. (org.), Compaction of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, p. 367-430.
- LARSON, W.E.; S.C. GUPTA e R.A. USECHE, 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44.
- LAWTON, K., 1945. The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrients by corn plants. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 10: 263-268.
- LIBARDI, P.L. e K. REICHARDT, 1974. Efeito da compactação na infiltração

da água no solo. II Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos.
Anais, vol. 2, p. 141-145.

LOWRY, F.E.; H.M. TAYLOR e M.G. HUCK, 1970. Growth rate and yield of
cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans. Soil
Sci. Soc. Am. Proc., 34(2): 306-309.

LUGO LOPEZ, M.A. e G. ACEVEDO, 1956. Effects of tractor traffic
compaction on the physical properties of on irrigated soil in
Samtweste Puerto Rico. J. Agric. Univ. Puerto Rico, 40: 235-240.

MIRREH, H.F. e J.W. KETCHESON, 1973. Influence of soil water matric
potential and resistance to penetration on corn root elongation.
Can. J. Soil Sci., 53: 383-388.

PARKER, E.R. e H. JENNY, 1945. Water infiltration and related soil
properties as affected by cultivation and organic fertilization.
Soil Sci., 60: 353-376.

PAUL, C.L., 1973. Compaction characteristics of four soils. Proceedings,
West Indies Sugar Tech., Barbados. p. 76-81.

REICHARDT, K. 1978. A água na produção agrícola. Editora McGraw-Hill do
Brasil Ltda., São Paulo. p. 119.

RICHARDS, L.A., 1965. Physical Conditions Water in Soil, In: Agron 9:

Methods of Soil Analysis, Part I (Madison, Wisco: American Society of Agronomy).

SANCHEZ, P.A., 1981. Suelos del trópico: características y manejo.

Inst. Inter. de Coop. para la Agricultura. San José, Costa Rica.

SHULKA, L.N. e E.J. RAVALO, 1976. Soil compaction in sugar cane fields due to transport carts. Sugar y Azucar, 71(8): 24-26.

STEINBRENNER, E.C. e S.P. GESSEL, 1955. The effect of tractor logging on physical properties of some forest soils in South Western Washington. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 19: 372-375.

SWARTZ, W.E. e L.T. KARDOS, 1963. Effects of compaction on physical properties of sand soil peat mixtures at various moisture contents. Agron. J., 55: 7-10.

TACKETT, J.L. e R.W. PEARSON, 1964. Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28: 600-605.

TAYLOR, H.M. e E. BURNETT, 1963. Some effects of compacted soil pans on plant growth in the Southern Great Plains. J. Soil Water Conserv., 18: 235-236.

TAYLOR, H.M. e D.W. HENDERSON, 1959. Some effects of organic additives on compressibility of Yolo silt loam soil. Soil Sci., 88: 101-106.

- TAYLOR, H.M. e H.R. GARDNER, 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Sci., 96: 153-156.
- VEIHMEYER, F.J. e A.H. Hendrickson, 1948. Soil density and root penetration. Soil Sci., 65: 487-493.
- VIEIRA, M.J., 1978. Propriedades físicas do solo que afetam a produtividade agrícola. In: IAPAR, ed. Manual Agropecuário para o Paraná. Londrina, 2: 37-44.
- VOORHESS, W.B.; C.G. SENST e N.M. NELSON, 1978. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J., 42(2): 344-349.
- WANJURA, D.F.; E.B. HUDSPETH e I.W. KIRK, 1966. Effects of compaction on cotton emergence. Tex. Agr. Expt. Sta. Wisc. Pub. 800.
- WEAVER, H.A. e V.C. JAMISON, 1951. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. Soil Sci., 71: 15-23.
- WEHRLI, A., 1964. The residual effect of tractor action on soil structure and crop yield in a stand of winter wheat. Schweizlandu Forsch., 3: 26-33.
- WIERSUM, L.K., 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and Soil, 9: 75-85.

WIERSUM, L.K., 1960. Some experiences in soil aeration measurements and relationships to depth of rooting. Neth. J. Agr. Sci., 8: 245-256.

WOLF, J.M., 1975. Soil-water relations in Oxisols of Puerto Rico and Brazil. In: BORNEMISZA, E. e A. ALVARADO (eds.). Soil management in tropical Latin America. North Carolina State University, RAleigh. p. 145-153.

A P Ê N D I C E

TABELA 2 - Dados de densidade do solo nas diversas umidades, quando os solos foram submetidos a uma mesma energia de compactação.

Solo	Umidade (%)	Densidade do Solo (g . cm ⁻³)
LR (floresta)	3	1,16
	7	1,27
	16	1,43
	19	1,47
	25	1,60
	27	1,59
	30	1,55
LR (cultivo)	32	1,44
	5	1,30
	10	1,48
	13	1,51
	17	1,65
	22	1,74
	23	1,70
LVA (floresta)	24	1,66
	25	1,60
	6	1,53
	9	1,79
	12	1,90
	13	1,93
	15	1,98
LVA (cultivo)	17	1,87
	19	1,71
	21	1,65
	4	1,46
	8	1,51
	10	1,62
	11	1,68
LVA (cultivo)	14	1,77
	16	1,75
	18	1,74
	20	1,63

TABELA 3 - Dados de porosidade (total, macro e micro), nos três níveis de compactação para os solos estudados.

Solo	Níveis de Compactação	Porosidade		
		Total Calculada	Determinada	Macro Micro
LR (flor.)	0	58	64	29 35
	1	45	66	18 48
	2	37	65	10 55
LR (cult.)	0	57	58	26 32
	1	49	61	19 42
	2	42	63	17 46
LVA	0	54	52	32 20
	1	50	50	29 21
	2	53	53	25 28

TABELA 4 - Dados do teor de água retida em oito tensões, nos três níveis de compactação, para os solos estudados.

Solo	Nível de Compactação	Tensão (MPa)									
		0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,05	0,1	0,1
		----- θ (V_{H_2O}/V_T) -----									
	0	64,03	43,23	38,12	35,03	33,15	31,92	29,37	27,16	25,75	
LR (flor.)	1	65,82	57,43	52,38	48,51	45,53	43,32	38,96	36,25	33,32	
	2	65,71	67,42	58,48	56,64	53,68	51,21	45,92	42,78	40,13	
	0	58,22	40,91	36,03	32,47	30,11	28,35	25,50	23,23	22,35	
LR (cult.)	1	61,32	51,20	46,66	43,65	39,21	36,50	31,62	28,17	26,63	
	2	61,35	56,10	52,35	49,18	46,32	42,62	36,71	32,90	30,87	
	0	52,73	30,91	22,93	20,76	18,55	18,32	16,34	14,94	13,82	
LVA	1	52,85	36,92	24,45	21,72	20,13	19,44	17,62	15,84	14,61	
	2	53,92	40,80	29,22	29,22	24,62	23,60	21,21	18,53	17,08	

TABELA 5 - Dados da condutividade hidráulica saturada nos três níveis de compactação, para os solos estudados.

Nível de Compactação	$K(\theta)$, cm.h^{-1}		
	LF (flor.)	LR (cult.)	LVA
0	14,93	11,71	17,81
1	7,96	5,98	5,58
2	2,11	1,93	0,68