**RELAÇÕES ENTRE DENSIDADE E UMIDADE EM TERRA
COMPACTADA E AGREGADA - Efeitos na porosidade e no
feijoeiro [*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69]**

SERAFIM DANIEL BALLESTERO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. ZILMAR ZILLER MARCOS

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
Novembro - 1984

Aos meus pais

Antonio e

Rosalina

pelo muito que contribuíram na
minha formação profissional

À esposa

Fátima,

que mesmo nas horas difíceis
procurou me incentivar

e à minha filhinha

Fabiana,

que através de seu sorriso
suaviza os caminhos da vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

- . Ao Prof. Dr. Zilmar Ziller Marcos, ESALQ, pela orientação e incentivo na execução do trabalho de dissertação;
 - . Ao Prof. Dr. Rubens Scardua, ESALQ, pelas sugestões e permissão para a utilização de seu laboratório de Física do Solo;
 - . Ao Prof. Dr. Ronaldo Ivan Silveira, ESALQ, pelas sugestões na área de adubação;
 - . Ao Engº Agrº José Damião de Jesus Filho, pelo incentivo e auxílio nos trabalhos de laboratório;
 - . Ao Departamento de Estatística e Computação, ESALQ, na pessoa do Engº Florestal Walter Diehl, pela realização das análises estatísticas;
 - . Às minhas cunhadas Marilde e Bete pelo auxílio na redação deste trabalho,
- e a todos aqueles que colaboraram na realização deste trabalho,

MUITO OBRIGADO.

Í N D I C E

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. Solo.....	14
3.2. Método.....	16
3.2.1. Método experimental.....	16
3.2.2. Método operacional.....	17
3.2.2.1. Teste de Proctor.....	17
3.2.2.2. Teste de Kieh1.....	20
3.2.2.3. Teste de compressão simples.....	22
3.2.2.4. Experimento com o feijoeiro <i>Vigna</i> <i>unguiculata</i> (L.) Walp, cv IPEAN - V- -69).....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1. Teste de Proctor.....	31
4.1.1. Resultados.....	31
4.1.2. Discussão.....	33
4.2. Teste de Kieh1.....	34
4.2.1. Resultados.....	34
4.2.2. Discussão.....	35

4.3. Teste de compressão simples.....	37
4.3.1. Resultados.....	37
4.3.2. Discussão.....	39
4.4. Estudo do comportamento do feijoeiro (<i>Vigna</i> <i>unguiculata</i> (L.) Walp. cv IPEAN - V - 69) cul tivado em terras com valores diferentes de den sidade do solo, em condições adubada e não a- dubada.....	40
4.4.1. Efeito da compactação e agregação na resistência à penetração do sistema ra dicular do feijoeiro (<i>Vigna unguicula- ta</i> (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) em con dições adubada e não adubada.....	40
4.4.2. Efeito da compactação e agregação na altura das plantas nas condições aduba da e não adubada.....	44
4.4.3. Efeito da compactação e agregação na produção de massa verde em condições a dubada e não adubada.....	46
4.4.4. Efeito da compactação e agregação na produção de raízes em condição adubada e não adubada.....	48

4.5. Efeito do crescimento do sistema radicular do feijoeiro (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp, cv TIEAN - V - 69) sobre os parâmetros de porosidade dos subtratamentos compactação e agregação, preparados a diferentes níveis de densidade em condições adubada e não adubada.....	52
4.5.1. Efeito na variação da porosidade total calculada.....	52
4.5.2. Efeito na variação da porosidade total determinada.....	55
4.5.3. Efeito na variação da macroporosidade.....	58
4.5.4. Efeito na variação da microporosidade.....	62
4.5.5. Efeito na quantidade de poros bloqueados.....	65
5. CONCLUSÕES.....	70
6. LITERATURA CITADA.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA

Página

1	Resultados da caracterização granulométrica e química da terra utilizada no estudo (horizonte B ₂ de um PVA) (média de três repetições).....	15
2	Valores das densidades do solo (g/cm ³) a diferentes graus de umidade nos tratamentos compactação e agregação nas condições adubada e não adubada.....	25
3	Análise de variância da regressão de densidade em relação aos níveis de umidade de amostras do horizonte B ₂ de um PVA.....	31
4	Análise de variância da regressão de densidades em relação aos níveis de umidade de amostras do horizonte B ₂ de um PVA.....	34
5	Dados de duas leituras de altura de plantas nos subtratamentos compactação	

TABELA

Página

	e agregação a diferentes níveis de umi dade e suas respectivas densidades, em condição adubada e não adubada (média de três repetições).....	44
6	Dados de produção de matéria seca nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidades em condição adu bada e não adubada (média de três repe tições).....	46
7	Dados da produção de raízes secas em estufa nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umi dade e suas respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média de três repetições).....	49
8	Dados da porosidade total calculada a- pós cultivo nos subtratamentos compacta- ção e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média	

TABELA

Página

	de três repetições.....	53
9	Dados da porosidade total determinada <u>to</u> tal após cultivo nos subtratamentos com- pactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média de três repetições).....	56
10	Dados da porcentagem de macroporos após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umida- de e respectivas densidades para as con- dições adubada e não adubada (média de três repetições).....	59
11	Dados da porcentagem de microporos após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umida- de e respectivas densidades para as con- dições adubada e não adubada (média de três repetições).....	62

TABELA

Página

12	Dados da porcentagem de poros bloqueados após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada (média de três repetições).....	65
----	--	----

LISTA DAS FIGURAS

FIGURA		Página
1	Corte esquemático de um cilindro e soquete de Proctor.....	19
2	Betoneira de agregação e seus complementos.....	21
3	Relações entre densidade e umidade nos testes de compactação (Proctor) e agregação (Kiehl).....	32
4	Relações entre esforço e deformação de amostras de terra do horizonte B ₂ de um PVA a diferentes níveis de umidade pelo teste de compressão simples.....	38
5	Esquema representativo do comportamento do sistema radicular do feijoeiro nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade (para o subtratamento compactação as figuras representam as duas condições de adubação)...	43

RELAÇÕES ENTRE DENSIDADE E UMIDADE EM TERRA COMPACTADA E
AGREGADA - Efeitos na porosidade e no feijoeiro
(*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69)

Candidato: SERAFIM DANIEL BALLESTERO

Orientador: Prof. Dr. ZILMAR ZILLER MARCOS

RESUMO

Estudou-se a influência da variação da umidade na densidade do solo provocada pela compactação e agregação em amostras do horizonte B₂ de um Podzólico Vermelho Amarelo (PVA), série Quebra-Dente.

Para isso determinaram-se, em laboratório, as curvas de densidade versus umidade decorrentes da compactação pelo método de Proctor e da agregação pelo método de Kiehl (proposito).

Desenvolveu-se, também, um experimento em vasos com o objetivo de estudar o comportamento do sistema radicular e parte aérea do feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) em diferentes níveis de densidade do solo e de adubação.

Os métodos de Proctor e de Kiehl revelaram que, embora não haja uma coincidência no teor de água em que as den

sidades máxima e mínima ocorrem, os valores são próximos, indicando que a diferença fundamental entre os dois está na aplicação das forças de origem externa. Para os dois casos, constata-se que o ramo ascendente do gráfico, que relaciona densidade e umidade, é o importante para o uso do solo.

Após a análise e interpretação dos resultados , constatou-se que as variações de densidade provocam modificações na porosidade do solo, no armazenamento de água, na permeabilidade e no impedimento físico ao desenvolvimento e penetração do sistema radicular.

· MOISTURE - DENSITY RELATIONSHIPS IN COMPACTED
AND AGGREGATED SOIL SAMPLES

Effects on porosity and in the growth
of *Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69)

Author: SERAFIM DANIEL BALLESTERO

Adviser: Prof. Dr. ZILMAR ZILLER MARCOS

SUMMARY

The variation of soil bulk density as related to varying soil water content was studied by means of artificially induced compaction and aggregation (Proctor and Kiehl methods). For that purpose a large soil sample (180 kg) was taken from the B₂ horizon of a Red Yellow Podzolic, "Quebra-Dente" series.

The data obtained relating moisture content to compacted-bulk-density and aggregated-bulk-density was used as a guide in the preparation of treatment pots in which *Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) was grown for a period of 45 days.

Proctor and Kiehl methods applied independently showed that for these soil samples, maximum and minimum bulk density occurs at approximately the same water content, indicating that the fundamental distinction between the methods

lies on the point and direction of the applied external force. It was postulated that for both methods water content values lower than that for maximum and minimum bulk density are the ones of importance for soil use and management.

As to the effects related to the growth of *Vigna unguiculata* was found that the induced soil bulk density variation affected soil total porosity, pore size distribution, blocked pores and root growth. Root growth was also found to affect pore size distribution in the compacted treatments.

1. INTRODUÇÃO

O estado de compactação dos solos, que pode ser quantificado pela densidade, é muito importante no desenvolvimento dos vegetais, uma vez que dele dependem certos atributos do solo que afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas. Alguns desses atributos são comentados a seguir.

A porosidade total dos solos é um parâmetro que depende do estado de compactação do solo. Em solos que possuem alto teor de areia varia de 35% a 50% e em solos de textura argilosa varia de 40% a 60%. Mas a porosidade total pode ser reduzida a 25% ou 30%, dependendo do grau de compactação, principalmente em solos de textura argilosa.

A densidade do solo é um parâmetro passível de variação, motivo pelo qual é, ainda, denominada por alguns de aparente. Sua variação está intimamente relacionada com a variação do teor de água do solo e com a compressão. Para um grau de umida

de crítico poderá atingir um valor máximo, onde os espaços porosos, reduzidos de tamanho, provocam uma diminuição na aeração, afetam o movimento e armazenamento de água e aumentam a resistência à penetração das raízes.

O valor da densidade do solo, no qual há impedimento físico à penetração de raízes, é variável em relação aos solos. Segundo a literatura, porém, poucas raízes conseguem penetrar solos com valores de densidade superiores a $1,9 \text{ g/cm}^3$.

A aeração ótima do solo está situada entre 20% a 30% da porosidade total, ficando prejudicada quando abaixo de 10%, causando dificuldade na respiração das raízes e na absorção de alguns nutrientes como o fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estudar as variações de certos atributos físicos em função da densidade do solo. Há, entretanto, necessidade de mais estudos, principalmente no campo, a fim de se obter relações numéricas e expressões quantitativas desses efeitos.

Este trabalho foi concebido para se obterem dados complementares a respeito dessas relações. Trata-se de um estudo sobre métodos de caracterização das relações entre densidade e água e aplicação dos métodos testados. Dentre os dois métodos utilizados, o denominado método de Proctor é conhecido, enquanto que o método de Kiehl é apresentado, nesta ocasião, como um novo método para caracterizar relações entre densidade e água sob condições que conduzem a um teor crítico de água em

que a densidade é mínima.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e teve como objetivo específico estudar as variações de densidade do solo (D_s) em função do teor de água e seu efeito na porosidade total ($E\%$), porosidade livre de água ($Pl\%$), resistência à penetração do sistema radicular e produção de massa verde em condições adubadas e não adubadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O desenvolvimento harmonioso de uma planta, desde a sua fase semente até a produção, está intimamente ligado a uma série de fatores físicos e químicos do solo, adequados para a espécie e variedade: oxigênio (aeração), calor (temperatura), água (umidade), pH, resistência mecânica do solo (penetrabilidade) e os nutrientes minerais.

Esses fatores físicos e químicos são influenciados pelas características e propriedades do solo, destacando-se o volume poroso, lugar comum a todos os fenômenos físicos, químicos e biológicos vitais para o bom desenvolvimento vegetal.

O volume poroso é uma função da estrutura do solo, conceituada por ARENA (1941) como sendo a "disposição que tomam os constituintes mecânicos elementares ao serem agrupados pelos componentes coloidais (argila e húmus), para consti-

tuir agregados, podendo ser estudada pela investigação da porosidade, da dinâmica da água e da análise de agregados".

A definição de estrutura oferecida por BAVER (1956), inclui, além do arrançamento das partículas primárias do solo, a forma e o tamanho dessas partículas e o arrançamento dos agregados por ele denominados de "partículas secundárias".

Mais recentemente, porém, BREWER (1964) deu um entendimento mais amplo à estrutura do solo, ao considerar em sua conceituação, além da parte sólida, os espaços vazios do solo. Segundo ele, a estrutura representa a própria constituição física do solo, expressa pelo tamanho, forma e distribuição ou arrançamento, dos espaços vazios e das partículas sólidas do solo, sejam elas primárias ou secundárias.

O interesse dos pesquisadores no estudo da estrutura do solo é periodicamente reavivado ou ocasionalmente incentivado, por algum autor. Assim, apenas para ilustrar, cite-se FORSYTHE (1975) que afirma: "existe atualmente um contínuo interesse entre os cientistas do solo em avaliar a estrutura, para indicar se a mesma proporciona um ambiente favorável ou desfavorável para as práticas agrícolas e o crescimento das plantas".

Mas o fato é que o efeito da estrutura é indireto, conforme consideram KOHNKE (1968), BULLOCK e MURPHY (1976). Dizem esses autores que a estrutura do solo, embora não seja considerada em si, um fator de crescimento para as plantas, exerce influência nos suprimentos de água e ar às culturas, na dis

ponibilidade de nutrientes e na penetração e desenvolvimento das raízes.

A alteração na estrutura original do solo pode provocar um aumento ou uma diminuição do volume poroso. Essa variação reflete-se no parâmetro densidade do solo. As variações de aumento estão relacionadas, segundo WATSON Jr. *et alii* (1951) a adensamento ou compactação.

MONIZ (1981) considera que num perfil de solo, em função de processos pedogenéticos ou decorrentes de seu manejo, podem aparecer camadas com graus diferentes de compactação. Aquelas em que a sua compactação é devida a processos pedogenéticos, são chamadas de "camadas adensadas", reservando o termo "camada compactada" àquela em que sua compactação é devida ao manejo do solo.

A literatura sobre compactação do solo, entretanto, segundo CAMARGO (1983), registra que o rearranjo de partículas primárias e agregados, por implementos agrícolas, pode ser considerada como sendo a maior causa da compactação.

O aumento da densidade do solo, obtido através da aplicação de uma determinada força, é afetada pelo seu grau de umidade, uma vez que este influi no rearranjo das partículas, resultando na diminuição do volume poroso do solo. Isto, porém, ocorre até um determinado valor, além do qual a água passa a atuar em sentido inverso.

PROCTOR (1933), estudando a variação da densidade do solo em relação ao aumento da umidade, através da aplica

ção de uma força constante, verificou que a densidade do solo aumentava até um máximo a um determinado grau de umidade, para em seguida decrescer. Os valores máximos da densidade do solo e o grau de umidade correspondente, eram variáveis de acordo com as características do solo, principalmente a textura. Essa relação foi posteriormente comprovada por BRUCE (1955) ao pro-por um novo método para o estudo da compactibilidade dos so-los. Esse autor verificou que esta relação é afetada pela adi-ção de matéria orgânica, calcáreo e fosfato de rocha. compactação dos solos agrícolas ocorre, geralmente, pelo tráfego de máquinas. A pressão resultante provoca a ruptura dos agregados e a aproximação das partículas (BAVER, 1956; PEARSON, 1966; VIEIRA, 1978; PAUL e DE VRIES, 1979). O fenômeno pode ocorrer, também, em função do tempo de uso associado ao manejo intensivo do solo (MAN NERING *et alii*, 1966; LAL, 1976; FRANÇA DA SILVA, 1980).

A compactação dos solos pode ocorrer também devido ao decréscimo do teor de matéria orgânica no solo. Confor me cita BAVER (1956), a matéria orgânica favorece a formação de grandes agregados estáveis, conferindo ao solo maior porosidade total. Este é o efeito indireto da matéria orgânica observado por DA COSTA (1983). Esse autor verificou que há um efeito direto da matéria orgânica sobre a densidade do solo, resultante de sua simples presença e também um efeito indireto resultante de seu efeito modificador na

estrutura do solo.

A densidade do solo é um parâmetro muito utilizado para indicar a ocorrência de compactação nos solos, devendo ser relacionada com a textura e a densidade das partículas para sua correta interpretação. Pois é assim que se torna possível estabelecer correlações entre a densidade do solo e propriedades como a taxa de difusão de oxigênio (aeração) e disponibilidade de oxigênio, condutividade hidráulica, disponibilidade de água e com a resistência à penetração das raízes. MIRREH e KETCHESON, 1972; GUMBS e WARKENTIN, 1972; HEMSATH e MAZURAK, 1974; VIEIRA, 1978, são alguns dos autores que tem relatado sobre esse tipo de relacionamento.

A dependência da condutividade hidráulica em relação à porosidade do solo, permite afirmar, segundo CHILDS (1969), que a condutividade hidráulica é função da densidade e da estrutura do solo, bem como de sua umidade.

BELTRAME *et alii* (1981) estudando a condutividade hidráulica em solos com diferentes densidades, verificaram que ocorre uma redução gradual da condutividade com o aumento da densidade do solo. Os mesmos autores, estudando a resistência à penetração em solos com diferentes graus de umidade e densidades, verificaram que, com o aumento da densidade, ocorre um aumento na resistência à penetração e, com o aumento da umidade, uma diminuição. O grau de umidade intervém modificando a coesão entre as partículas do solo, que é maior no solo seco e decresce à medida que a quantidade de água aumenta, provocando a se-

paração das partículas. Esses autores verificaram, porém, que o aumento na resistência à penetração com o aumento da densidade foi mais significativo que sua diminuição com o aumento do grau de umidade.

A densidade do solo na qual a penetração de raízes não se faz, não é necessariamente a mesma para todos os solos e nem para todas as plantas. VEIHMEYER e HENDRICKSON (1948) estudando a penetração de raízes de girassol em solos, observaram que nenhuma raiz foi encontrada em densidade superior a $1,9 \text{ g/cm}^3$. Em diversos casos, quando a densidade foi $1,7$ ou $1,8 \text{ g/cm}^3$, do mesmo modo não houve penetração de raízes. Não houve penetração de raízes em solos de classe textural argila quando a densidade atingiu valores até $1,6$ ou $1,7 \text{ g/cm}^3$. Os autores afirmavam que a não penetração de raízes se deve ao pequeno diâmetro dos poros do solo e não a falta de arejamento das camadas. Entretanto, a oxigenação foi considerada limitante por DAY e HOLGREN (1952), enquanto que Lutz (1952), citado por ROSENBERG (1964) mostra os efeitos do impedimento mecânico na penetração das raízes.

NOGUEIRA e MANFREDIM (1981), embora tenham adotado um método de compactação distinto do que foi utilizado neste trabalho, mostram que a densidade de $1,75 \text{ g/cm}^3$ impediu totalmente a penetração de raízes, e que o aumento da densidade do solo induziu a um maior desenvolvimento de raízes na camada superior. Na parte aérea verificaram que apenas

o diâmetro do caule variou com a densidade, não ocorrendo nenhuma diferença significativa no peso seco de folhas e vagens e na altura das plantas.

Conforme mencionado acima, plantas diferentes têm reações distintas. GROHMANN e QUEIROZ NETO (1966) observaram que não houve desenvolvimento radicular do arroz quando a densidade do solo era de $1,42 \text{ g/cm}^3$ (LR) e $1,38 \text{ g/cm}^3$ (PVA), as sinalando a rigidez dos poros como fator responsável. TAYLOR e GARDNER (1963) consideraram que, para penetrar a massa de solo, as raízes devem exercer uma pressão de crescimento superior à resistência que o solo oferece, e que as variáveis que atuam na penetração das raízes, são a pressão de crescimento da raiz, o meio ambiente na zona radicular (relação ar - água, temperatura) e a resistência do solo.

A variação na densidade do solo ocorre frequentemente devido a uma combinação de manejo e causas naturais associadas à variação genética do perfil em profundidade. Dados a esse respeito foram apresentados por MACHADO e BRUM (1978) ao estudarem a variação da densidade do solo a diferentes profundidades, em solos submetidos a diferentes tipos de manejo. Verificaram que há um aumento na densidade do solo na camada situada de 15 a 30 cm de profundidade, principalmente em solos submetidos ao manejo convencional, ocorrendo uma diminuição na porosidade total, uma grande diminuição na macroporosidade e um aumento na microporosidade. Verificaram também que a variação nos valores da densidade do solo, em sua maior parte, é de

vida às diferenças no volume total dos poros.

O comportamento das raízes em relação aos poros é motivo de opiniões diversas. AUBERTIN e KARDOS (1965) verificaram que as raízes geralmente não crescem através dos poros existentes, mas fazem seu próprio caminho, deslocando as partículas sólidas do solo; WIERSUM (1957) verificou a habilidade das raízes em penetrar poros de vários diâmetros, sempre maiores que o diâmetro das raízes mais finas, ocorrendo diferenças entre as espécies na habilidade em penetrar poros pequenos. PEARSON (1966) verificou que a resistência real, exercida pelo solo à penetração radicular, é, em geral, menor que a resistência medida pelo penetrômetro, já que as raízes procuram os espaços de maior fraqueza durante o seu crescimento.

Quanto ao tamanho dos poros (calibre), há evidências de que seu efeito se relaciona com a rigidez do poro. TAYLOR (1974) verificou crescimento igual das raízes em poros de 46 a 278 micrômetros em sistema não rígido, enquanto que, em sistema rígido, o crescimento radicular foi afetado em qualquer diâmetro de poros menores de 412 micrômetros. TAYLOR e GARDNER (1963) verificaram que a penetração radicular está mais relacionada com a resistência do solo do que com a densidade do solo e o grau de umidade: 70% das raízes penetraram o solo com resistência de $10,1 \text{ kgf/cm}^2$, mas somente 30% quando a resistência era de $20,2 \text{ kgf/cm}^2$. Verificaram, também, uma ausência de crescimento radicular com um teor de água correspondente a 1/3 de bar e $29,6 \text{ kgf/cm}^2$ de resistência. Para a cana-de-

-açúcar YANG (1970) encontrou, tanto para solos arenosos como para solos argilosos, uma resistência crítica de 20 a 25 kgf/cm².

DAY e HOLGREN (1952) citam que devido a modificações na estrutura do solo, ocorrem influências na difusão de oxigênio afetando o desenvolvimento radicular. Essas considerações foram confirmadas por TAYLOR *et alii* (1967) ao observarem que a raiz em fase de crescimento necessita de um fornecimento constante de oxigênio; seu crescimento depende da quantidade de O₂ disponível que, por sua vez, depende da taxa de difusão de oxigênio no solo. Segundo esses autores a concentração de ar no solo tem como limite crítico 10 a 15%.

A difusão do oxigênio através da solução do solo é cerca de 10.000 vezes menor do que através do próprio ar. Assim sendo, quando o solo estiver na capacidade de campo a difusão de O₂ dependerá do espaço poroso livre de água. Esta conclusão é também apresentada por CAMARGO (1983). BERTRAND e KOHNKE (1957) verificaram que a difusão de O₂ foi menor em solos mais densos, sendo que, à umidade mais elevada, intensificavam-se os efeitos restritivos, tanto sobre a difusão quanto sobre o crescimento radicular.

Quanto a alguma proporção quantitativa entre porosidade de aeração e porosidade para água, ou mesmo valores para porosidade de aeração, diversos padrões têm sido propostos. BAVER *et alii* (1972) citam que quando os poros de arejamento estão abaixo de 10% são insuficientes à expansão radicular e HENIN *et alii* (1972) apresentam valores de macroporos entre 6 a 20%

como necessários para assegurar um crescimento normal para algumas culturas. KIEHL (1979) afirma que o equilíbrio ideal entre poros é de 1/3 para macroporos e 2/3 para microporos, com uma porosidade total do solo em torno de 50%.

CARVALHO (1976) afirma que o efeito isolado dos fatores considerados limitantes no crescimento das plantas (impedimento físico ao crescimento das raízes, baixa taxa de difusão de oxigênio, alterações no fluxo de água com modificações no teor de água disponível e na disponibilidade de nutrientes) é de difícil avaliação devido à interação existente entre eles.

Entretanto, do que foi exposto, pode-se deduzir que há um consenso geral sobre a participação da água na modificação da estrutura, sobre a conseqüente alteração na porosidade, resultando daí novos pontos de contato entre as partículas o que poderá conduzir a uma maior rigidez de poros e, conseqüentemente, a uma maior resistência à penetração das raízes das plantas. Além disso, aceita-se que as modificações na estrutura, indicadas pela variação na densidade do solo podem resultar em porosidade livre de água inadequada para a aeração do solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Devido a ser este um trabalho sobre a influência das relações entre densidade e umidade sobre alguns atributos do solo, utilizou-se como critério na escolha do horizonte a ser amostrado, um que apresentasse alta porcentagem de argila, condição, segundo a literatura, para maior influência da umidade na variação da densidade.

3.1. Solo

Foram coletadas amostras de terra do horizonte B₂ de um Podzólico Vermelho Amarelo (PVA), de ocorrência no município de Piracicaba, classificado por RANZANI *et alii* (1960) como série Quebra-Dente.

Essas amostras foram coletadas no bairro Pom-

pêia, em Piracicaba, em terreno pertencente à Olaria Furlan, localizada aproximadamente a 3 km do cemitério municipal, na direção sudoeste.

Foram coletados cerca de 180 kg de terra que, após secagem à sombra, em bandejas de alumínio, foram destorroados e passados por uma peneira de 2 mm de malha.

Os dados referentes à composição granulométrica e química desse material são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da caracterização granulométrica e química da terra utilizada no estudo (horizonte B₂ de um PVA) (média de três repetições).

a.m.g.	a.g.	a.m.	Granulometria(% TFSE)			silte	argila
			a.f.	a.m.f.	areia		
0,14	1,98	4,37	9,48	4,64	23,78	24,66	51,56

pH	C%	CTC(pH 7)	Atributos químicos					
			emg/100 ml TFSA					
			PO ₄	K	Ca	Mg	Al	H
4,70	0,37	16,45	0,01	0,21	1,89	2,80	7,95	11,85

3.2. Métodos

A fim de facilitar a compreensão, este item do trabalho foi dividido em dois aspectos metodológicos perten-
centes à pesquisa científica.

O primeiro trata da investigação do fenômeno e o segundo diz respeito ao aspecto operacional, relatando, des-
critivamente, as sequências de operações realizadas para o le-
vantamento de dados.

3.2.1. Método experimental

Neste trabalho utilizou-se o método empírico da experimentação. Com base em observações anteriores, registra-
das na literatura, foram aplicados teores crescentes de água
em amostras de terra do horizonte B_2 de um PVA, a fim de veri-
ficar seus efeitos sobre a densidade e outros atributos do so-
lo.

Esses efeitos foram medidos e avaliados segundo
modelos estatísticos. Para a interpretação dos resultados obti-
dos, utilizou-se de comparações de dados entre os diversos tra-
tamentos.

3.2.2. Método operacional

O trabalho constou de duas partes. A primeira constou basicamente da caracterização das relações entre densidade e teor de água da amostra e resistência ao cisalhamento. Foram feitos três testes a saber: densidade em função do grau de umidade pelo teste de Proctor, densidade em função da umidade pelo teste de Kiehl e resistência ao cisalhamento pelo teste de compressão simples.

Os dados obtidos dessa caracterização preliminar foram utilizados para o preparo dos tratamentos aplicados ao solo na segunda parte do trabalho, que constou de um experimento a fim de verificar os efeitos da densidade do solo no desenvolvimento do sistema radicular e parte aérea do feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) e deste sobre alguns atributos do solo relacionados à sua densidade (porosidade total, porosidade livre de água e poros bloqueados).

3.2.2.1. Teste de Proctor

A primeira etapa para a realização deste trabalho foi determinar, em laboratório, a curva de densidade em relação à umidade para a terra em estudo (ver item 3.1.), seguindo o método proposto por Proctor (1933).

Para tanto utilizou-se de três quilos de terra,

que, após ter sido seca ao ar e destorroada foi passada por uma peneira de 2 mm de malha, sendo a amostra umedecida com acréscimos percentuais de água de dois pontos cada sobre a umidade inicial. Para cada acréscimo foi feita a compactação descrita a seguir.

A compactação foi realizada utilizando-se do cilindro de Proctor (Fig. 1), compactando cada uma de cinco camadas iguais de terra, superpostas, com vinte e cinco golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da terra. Após a compactação foi retirado o excesso de terra com uma espátula até nivelar a parte superior do cilindro. O conjunto foi pesado a seguir.

O material foi depois removido do cilindro utilizando-se um macaco hidráulico. Retirou-se uma amostra a fim de se determinar sua umidade por gravimetria, de acordo com o método ASTM-D2216.

Conhecido o volume do cilindro e o peso da amostra corrigida em sua umidade, determinou-se a densidade. Para cada grau de umidade foram feitas três repetições e para cada uma das sucessivas compactações passou-se novamente a terra pela peneira de 2 mm de malha.

A fim de se manter os acréscimos de umidade, as amostras foram cobertas por um pano umedecido e recobertas por um lençol plástico.

Com os dados obtidos, foram determinadas as curvas de densidade em relação à umidade.

1. Cilindro de Proctor de dimensões:
 - . diâmetro interno.... 10,16 cm
 - . altura..... 12,34 cm
 - . volume..... 1.000 cm³

2. Base de engate do cilindro.

3. Colar suplementar com altura de 5,0 cm.

4. Parafusos de fixação do cilindro à base.

5. Soquete de Proctor, com as seguintes características:

- . peso..... 2,5 kg
- . diâmetro di 5,0 cm
- . o comprimento L do soquete depende do material de que é feito.

6. Guia do soquete:

- . o comprimento L da guia deve ser:

$$h = (30 + L) \text{ cm}$$

Figura 1 - Corte esquemático de um cilindro e soquete de Proctor.

(Fonte: Apontamentos de aula da disciplina "Mecânica de Solos").

3.2.2.2. Teste de Kiehl

Este teste, que é basicamente um método de agregação, foi realizado, também, em laboratório, com a finalidade de determinar a curva de densidade em relação à umidade. Seguiu-se o método proposto por KIEHL (1963), com algumas modificações, utilizando-se da mesma terra (ver item 3.1.). O teste constou do seguinte:

Tomou-se aproximadamente dois quilos de terra que, após ter sido seca ao ar e destorroada, passou em peneiras de 8, 4 e 2 mm de malha. A terra que passou pela peneira de 2 mm de malha foi colocada na betoneira (Fig. 2).

A quantidade de terra foi suficiente para que não transbordasse do tambor, ficando o aparelho com uma pequena inclinação (8 a 10° em relação ao plano horizontal) para que a terra ficasse levemente acumulada no fundo do tambor, evitando perdas.

Determinou-se a umidade inicial da terra colocada no tambor e acrescentou-se 1% de água, fazendo-o girar com uma rotação de 10 voltas por minuto, por um tempo de 3 minutos. A seguir removeu-se a terra do tambor, tamizando-a em uma peneira de 4 mm de diâmetro, sendo esse material colocado em um recipiente de 1 litro de capacidade, procurando-se enchê-lo sempre até a uma mesma altura e mantendo-o imóvel, a fim de não alterar a estrutura.

Figura 2 - Betoneira de agregação e seus complementos.
(Fonte: "Manual de Edafologia", E.J. Kiehl, publicado pela Editora Agronômica Ceres).

A seguir pesou-se o recipiente cheio com terra, após ter passado uma régua sobre a boca do mesmo, sempre no mesmo sentido, a fim de nivelar os bordos. Descontou-se a tara do recipiente e determinou-se a densidade da amostra de terra. Retirou-se 10 g de terra e determinou-se a umidade por gravimetria, utilizando-se do mesmo método do item 3.2.2.1. A terra foi devolvida para a betoneira e repetiram-se as operações após ter pulverizado quantidade de água correspondente a mais 1% de peso de terra.

Verificou-se que com os acréscimos subsequentes de água, o peso da amostra de 1 litro de terra foi diminuindo devido à agregação, até atingir a um mínimo, que se observou

quando duas pesagens consecutivas se repetiram ou houve um pequeno acréscimo na seguinte. Foram feitas três repetições.

Com os dados obtidos, determinou-se a curva de densidade em relação à umidade.

3.2.2.3. Teste de compressão simples

O presente teste teve por finalidade determinar em laboratório a resistência ao cisalhamento do solo compactado pelo método de Proctor, a quatro graus de umidade, escolhidos pela análise das curvas de compactação (teste de Proctor) e de agregação (teste de Kiehl).

Esses quatro pontos escolhidos, 16%, 19%, 20% e 26% de umidade, são representativos das variações média, máxima e mínima da densidade em relação à umidade na compactação e agregação. A determinação da resistência ao cisalhamento foi feita pelo teste de compressão simples que é descrito a seguir:

Inicialmente o solo foi compactado pelo teste de Proctor (item 3.2.2.1.) para os quatro graus de umidade citados acima e, em seguida, foi moldado um corpo de prova de aproximadamente 9 cm de altura e 4,5 cm de diâmetro em um talhador. Da terra restante da moldagem, foi determinada a umidade, utilizando-se do mesmo método do item 3.2.2.1. Em seguida o corpo de prova foi pesado e levado para a prensa, colo

cando-se uma folha de papel de filtro no topo e na base do cilindro, posicionando-o na vertical e no centro do prato de apoio.

A seguir, após o ajuste das escalas dos extensômetros que medem as deformações da mola e do prato, foi iniciado o ensaio, determinando-se a subida do prato a uma velocidade constante. Com intervalos de 0,25 mm do extensômetro do prato, tomaram-se leituras de ambos os extensômetros, no início a cada 0,25 mm, porém, quando a curva tensão - deformação fez um patamar, tomaram-se as leituras a cada 0,5 mm e finalmente a cada 1,2 mm.

As leituras foram feitas até a ocorrência do cisalhamento. Com os dados obtidos foram feitos os cálculos do esforço (kgf) e da deformação (E%) e determinadas as curvas de tensão - deformação para os quatro valores de umidade escolhidos. As determinações foram feitas com três repetições.

3.2.2.4. Experimento com o feijoeiro

(*Vigna unguiculata* (L.) Walp,

cv IPEAN - V - 69)

A segunda etapa do presente trabalho, foi a análise do comportamento do sistema radicular do feijoeiro e a produção de massa verde a diferentes níveis de densidade do mesmo solo em estudo a 16%, 19%, 20% e 26% de umidade, que corres

pondem às densidades obtidas no tratamento compactação, de 1,76 g/cm³; 1,83 g/cm³; 1,84 g/cm³ e 1,59 g/cm³ para a condição não adubada e 1,77 g/cm³; 1,81 g/cm³; 1,77 g/cm³ e 1,62 g/cm³ para a condição adubada e as densidades obtidas no tratamento agregação, de 0,77 g/cm³; 0,72 g/cm³; 0,70 g/cm³ e 0,61 g/cm³ para a condição não adubada e 0,77 g/cm³; 0,68 g/cm³; 0,65 g/cm³ e 0,61 g/cm³ para a condição adubada. O estudo foi conduzido em vasos, em casa-de-vegetação e em condições adubada e não adubada.

3.2.2.4.1. Montagem do experimento

Os recipientes utilizados como vasos foram cilindros de papelão, com base de latão, usados na comercialização de óleos lubrificantes, com 14 cm de altura e 9,8 cm de diâmetro, apresentando 1 litro de volume. O preparo desses recipientes foi feito cortando uma das bases, eliminando o óleo residual e passando duas demãos de Neutrol em todo o seu interior. Com a finalidade de se determinar a máxima capacidade de retenção de água, foram feitos 5 furos no fundo do vaso, os quais foram vedados com parafina, a fim de se permitir posteriormente a drenagem dos vasos. Anotaram-se as taras dos vasos. O preparo da terra com as amostras compactadas com os graus de umidade previamente escolhidos, 16%, 19%, 20% e 26% (ver item 3.2.2.4.) foi feito pelo teste de Proctor (ver item 3.2.2.1.) com seis repetições para cada grau de umidade relacionados acima. Anotaram-se as densidades das terras nos vasos, as quais, estão citadas acima e relacionadas na Tabela 3. As amostras compactadas

foram moldadas com aproximadamente 9,7 cm de diâmetro e 11 cm de altura e colocadas nos vasos. Foram determinadas a umidade, o volume e o peso de todas as amostras.

O preparo da terra das amostras agregadas, com os mesmos graus de umidade (ver item 3.2.2.4.) foi feito pelo teste de Kiehl (ver item 3.2.2.2.), também com seis repetições para cada grau de umidade, anotando-se as densidades (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Valores das densidades do solo (g/cm^3) a diferentes graus de umidade nos subtratamentos compactação e agregação nas condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Tratamento	Grau de umidade (%)			
	16	19	20	26
<u>Condição não adubada</u>				
Compactação	1,76	1,83	1,84	1,59
Agregação	0,77	0,72	0,70	0,61
<u>Condição adubada</u>				
Compactação	1,77	1,81	1,77	1,62
Agregação	0,77	0,68	0,65	0,61

A terra agregada foi adicionada ao vaso até uma altura de 11 cm, procurando-se colocá-la sempre da mesma altura, mantendo o vaso imóvel. Foi determinado o peso, a umidade e o volume de todas as amostras.

A seguir todos os tratamentos, compactados e agregados, foram saturados e, através da abertura dos furos do fundo dos vasos, deixou-se drenar o excesso de água, anotando-se, posteriormente, o peso e o volume dos vasos. Determinou-se desse modo a variação de volume, decorrente da acomodação da terra provocada pela ação da água, o máximo de retenção de água e as novas densidades.

A fim de se dar condições para a germinação e desenvolvimento da espécie a se instalar, foram acrescentados 3 cm de TFSA da mesma terra em cada vaso. A capacidade de retenção de água foi determinada pelo método que simula a capacidade de campo, segundo MARCOS (1981, não publicado) citado e explicado por DA COSTA (1983) e denominado TSFM (Torrão Separado pela Frente de Molhamento).

Através do máximo de retenção de água determinado nos vasos, calculou-se a quantidade de água em peso a ser utilizada na irrigação diária dos tratamentos. Do total das seis repetições das amostras compactadas e agregadas para cada grau de umidade, três foram desenvolvidas em condição adubada e três em condições não adubada.

Para analisar o comportamento do sistema radicular e parte aérea aos diferentes níveis de densidades, foi escolhida como planta indicadora o feijoeiro (item 3.3.2.) por a-

presentar sistema radicular e desenvolvimento vegetativo vigorosos.

3.2.2.4.2. Adubação do experimento

Com base nos dados químicos (ver tabela 1) da análise das amostras de terra (ver item 3.1.), a recomendação da adubação foi a seguinte:

a) Calagem

De acordo com a literatura que recomenda atingir 80% de saturação em cálcio, faltou para este solo 8,10 emg/100 ml de TFSA, sendo portanto a recomendação para a calagem: 2,0 g/litro de TFSA de Ca(OH)_2 , que corresponde aproximadamente a 2,0 g/kg de terra, que foram adicionados e incorporados à terra antes do umedecimento para o preparo dos vasos.

b) Adubação

De acordo com os mesmos dados químicos e com a literatura, para atingir os níveis normais de disponibilidade de nutrientes, recomenda-se acrescentar 89 ppm de óxido de potássio, 100 ppm de fósforo e 200 ppm de nitrogênio por 100 ml de terra.

Os adubos utilizados foram o cloreto de potás -

sio, a uréia e o superfosfato simples que, após calculadas as quantidades necessárias em relação ao peso de terra dos vasos, foram dissolvidas em um volume de água necessário para que ocorresse a solubilização e lentamente adicionados aos vasos.

3.2.2.4.3. Condução do experimento e coleta de dados

Foram semeadas cinco sementes nos 3 cm de TFSA adicionados em cada vaso, tanto para os tratamentos adubados, como para os não adubados, obtendo-se 100% de germinação. O desbaste foi feito quando as plântulas apresentaram 2 pares de folhas definitivas, deixando 3 plântulas equidistantes em cada vaso.

Fizeram-se leituras da altura das plantas aos 20 e 40 dias após a semeadura. Aos 45 dias de desenvolvimento vegetativo fez-se o corte da parte aérea a nível do colo da planta, a fim de se determinar o peso da matéria seca em estufa, à temperatura de 60°C por 24 horas.

Em seguida, após pesarem-se os vasos, removeram-se os fundos de cada um. Os vasos, foram novamente pesados e cobriram-se os seus fundos com um tecido preso no lugar por um elástico. Foram pesados novamente e colocados para saturar com água a terra contida no seu interior. Após determinarem-se o peso e o volume dos vasos, foram estes colocados sobre a mesa de tensão, na qual

foram submetidos a uma tensão de 50 cm de coluna de água. Depois de permanecerem por 24 horas na mesa de tensão, os vasos foram novamente pesados, desmontados e cortados ao meio verticalmente, anotando-se os pesos do tecido mais elástico e das faces de papelão. Procurou-se, após o corte, verificar visualmente a distribuição do sistema radicular. Em seguida, sob um jato fraco de água, foram separadas as raízes e secadas em estufa à temperatura de 60°C por 24 horas.

Com base nos dados obtidos após cultivo foram calculados: porosidade total, macroporosidade, poros bloqueados, porosidade livre de água, densidade e porosidade total calculada.

Convém lembrar que este procedimento foi seguido individualmente para cada um dos vasos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão preliminarmente apresentados os resultados e a discussão dos testes feitos para a caracterização do comportamento da terra diante da aplicação de uma energia de competição.

A interpretação dos resultados dos três testes será utilizada como subsídio para a compreensão dos efeitos dos tratamentos a que foi submetido o feijoeiro.

4.1. Teste de Proctor

4.1.1. Resultados

Os dados obtidos relativos à variação da densidade em relação à umidade foram submetidos a análise de regressão, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise de variância da regressão de densidade em relação aos níveis de umidade de amostras do horizonte B₂ de um PVA.

Causa da Variação	Análise de Variância				
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	R
Tratamento	17	1.036,30	60,96**	7,56	100,00
Componente 1º Grau	1	722,72	722,72**	89,62	69,74
Componente 2º Grau	1	197,75	197,75**	24,52	19,08
Componente 3º Grau	1	2,99	2,99	0,37	0,29
Desvio	14	112,89	8,06	1,00	10,89
Resíduo	14	-	8,06	-	-

Através da análise de regressão dos dados da variação de densidade em relação à umidade, verificou-se que a curva teve um comportamento linear de 69,74% e um comportamento quadrático de 19,08% (Tabela 3 e Fig. 3).

Figura 3 - Relações entre densidade e umidade nos testes de compactação (Proctor) e agregação (Kiehl). (BALLSTICHO 1984)

A equação representativa do comportamento linear é: $\hat{y} = 107,06x - 166,3$ e a do quadrático é $\hat{y}: -1.431,29x^2 + 4.951,67x - 4.260,37$, sendo que $\hat{y}$ representa os valores de umidade e x os valores de densidade.

4.1.2. Discussão

Na compactação, a força aplicada conduz a uma aproximação das partículas, diminuindo os espaços entre elas, sendo que a água atua como lubrificante, facilitando essa aproximação até um limite crítico a partir do qual o efeito é invertido, pois a água ocupando o lugar dos poros, impede a aproximação das partículas, devido ao fato de que a água não é compressível. Desse modo se explica o fato da densidade do solo aumentar com os acréscimos de umidade até um valor máximo para em seguida decrescer.

Nota-se pela figura 3 que o final do ramo ascendente da curva é semelhante ao começo do ramo descendente, indicando que o efeito lubrificante da água é semelhante ao efeito mecânico em termos da variação de volume que provoca. Portanto é provável que a forma da curva sofra modificações com a energia aplicada para compactar e/ou com a quantidade de calor livre presente na água, donde se conclui que o ramo ascendente é mais importante porque é o que indica uma densidade mais estável após a desidratação.

4.2. Teste de Kiehl

4.2.1. Resultados

Os dados obtidos pelo presente teste relacionando a variação da densidade com a umidade também foram submetidos à análise de regressão, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de variância da regressão de densidade em relação aos níveis de umidade de amostras do horizonte B₂ de um PVA.

Causa da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	R
Tratamento	22	954,11	43,36**	20,69	100,00
Componente 1º grau	1	870,62	870,62**	415,30	91,25
Componente 2º grau	1	22,69	22,69**	10,83	2,38
Componente 3º grau	1	20,96	20,96**	9,99	2,20
Desvio	19	39,83	2,10	1,00	4,17
Resíduo	19	-	2,10	-	-

Pela análise de regressão dos dados da variação de densidade em relação à umidade, verificou-se que a curva teve um comportamento linear de 91,25% e um comportamento quadrático de 2,38% (Tabela 4 e Figura 3).

A equação representativa do comportamento linear é: $\hat{y} = -32,01x + 45,00$ e a do quadrático é: $\hat{y} = 45,24x^2 - 118,85x + 84,88$, sendo que $\hat{y}$ representa os valores de umidade e x os valores de densidade.

4.2.2. Discussão

A tendência linear é explicável porque o método de Kiehl não possibilita determinações acima do ponto correspondente à densidade mínima. A partir desse teor de água, a terra tem a tendência de aderir às paredes da betoneira.

Não há interesse em examinar o ramo ascendente da curva, porque o teste é de agregação, e o ramo ascendente da curva, por indicar diminuição da porosidade total, resulta na movimentação de todas as partículas na direção de um único foco.

O excesso de água promove o deslizamento entre partículas e agregados de maneira semelhante ao que ocorre na compactação.

A agregação de partículas e formação de agregados, em função da variação da umidade no método proposto, re

sulta das forças de coesão e adesão que atuam entre as partículas após sua aproximação promovida pelo impacto entre elas.

A coesão é responsável pela força de união entre partículas e agregados, sendo maior quanto menor for o grau de umidade e maior o agregado.

A interação entre a força de coesão e de impacto, quando o agregado atinge o fundo da betoneira, provoca sua ruptura em agregados menores, sendo essa ruptura mais acentuada quanto maior for o agregado e menor o grau de umidade. Desse modo há uma tendência em formar agregados até um limite máximo de diâmetro para um determinado teor de água.

Neste método, a força aplicada aproxima as partículas, aumentando seus pontos de contato. A água atua como ponte de ligação, dando estabilidade à estrutura formada. Com o aumento da quantidade de água, o número de pontos de contato, que estabiliza a estrutura, diminui. Esses pontos existem até que se forme um filme de água envolvendo as partículas com espessura suficiente para que a água passe a atuar como lubrificante, provocando o deslizamento das partículas e resultando em melhor acomodação e, como consequência, aumento da densidade.

O teste de Kiehl foi originalmente proposto por seu autor como sendo uma maneira para determinar o ponto de friabilidade máxima de um solo. Foi posteriormente utilizado

por MAIA LIMA (1970), ainda com a mesma finalidade. Neste trabalho, em decorrência da análise feita, ainda que superficialmente, conclui-se que não se trata exatamente de um teste de friabilidade, mas sim de um teste de relação densidade-umidade semelhante ao de Proctor.

Assim, propõe-se que seja utilizado como um teste de agregação e portanto um método para determinação da densidade mínima de uma amostra de terra. E, nesse sentido, relaciona-se com a friabilidade, pois é esperado que um mesmo solo seja tanto mais friável quanto maior for o seu estado de agregação. Quanto a isto, há acordo entre os autores.

4.3. Teste de compressão simples

4.3.1. Resultados

Os dados referentes à resistência ao cisalhamento das amostras compactadas nos quatro níveis de umidade em estudo, a saber: 16%, 19%, 20% e 26% podem ser visualizados no gráfico de tensão (kfg/cm^2) em relação à deformação em porcentagem (E%) na Figura 4.

Figura 4 - Relações entre esforço e deformação de amostras de terra do horizonte B₂ de um PVA a diferentes níveis de umidade pelo teste de compressão simples.

4.3.2. Discussão

Da análise dos dados e gráficos, verifica-se que as maiores resistências, em torno de 10 kgf/cm^2 , foram encontradas nas amostras compactadas a 19% e 20% de umidade, que correspondem também às maiores densidades ($1,83 \text{ g/cm}^3$ e $1,84 \text{ g/cm}^3$), sendo que o menor valor, $2,3 \text{ kgf/cm}^2$, foi encontrada a 26% de umidade, que corresponde ao menor valor de densidade ($1,59 \text{ g/cm}^3$). O valor intermediário, $9,5 \text{ kgf/cm}^2$, ficou com 16% de umidade que corresponde à densidade de $1,76 \text{ g/cm}^3$.

A resistência ao cisalhamento aumenta para os níveis de umidade referentes aos valores de densidade máxima ou próximos a ela (19% e 20%), devido ao fato de que o aumento na densidade é apenas a representação do aumento de concentração de massa, do qual resulta um maior número de pontos e/ou superfícies de contato. Em consequência há o aumento da rigidez dos poros acompanhada de um volume poroso menor, com menor número de pontos de fraqueza, sendo a coesão entre as partículas maior.

Para o valor 16% de umidade a ação desses fatores é menor do que para os valores 19% e 20% e para o valor 26% de umidade é mínima, apresentando o menor valor de resistência e de densidade devido, também, ao fato de que a grande quantidade de água dificulta a diminuição do espaço poroso na compactação por ser esta incompressível.

4.4. Estudo do comportamento do feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) cultivado em terras com valores diferentes de densidade do solo, em condições adubada e não adubada

Os aumentos de densidade resultantes da compactação ou diminuições decorrentes da agregação, podem não ser estáveis, dependendo da rigidez dos poros e da magnitude dos esforços que porventura possam ser aplicados à massa de terra.

Um desses tipos de aplicação é o esforço gerado pelas raízes em crescimento. Podem ocorrer modificações nas relações de volume da terra ou alterações no desenvolvimento radicular. Supõe-se que estes efeitos, relativos a ação do sistema radicular, sejam variáveis conforme o regime nutricional das plantas. Essas considerações que serviram de base para este estudo, são confrontadas com os resultados experimentais apresentados a seguir.

4.4.1. Efeito da compactação e agregação na resistência à penetração do sistema radicular do feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN V - 69) em condições adubada e não adubada

Procurou-se, através da análise visual do comportamento do sistema radicular, verificar os efeitos da resis

tência mecânica das amostras de terra à penetração das raízes.

Em relação ao tratamento compactação dos diferentes níveis de umidade e respectivas densidades, verificou-se que, para os níveis de umidade 19% e 20%, que correspondem às densidades $1,83 \text{ g/cm}^3$ e $1,84 \text{ g/cm}^3$ na condição não adubada e $1,81 \text{ g/cm}^3$ e $1,77 \text{ g/cm}^3$ na condição adubada (ver Tabela 5) e resistência média ao cisalhamento de 10 kgf/cm^2 (ver Figura 4), houve uma maior concentração de raízes na camada superficial, nos lados e no fundo dos vasos, não ocorrendo raízes na camada de terra compactada, como se pode observar na Fig. 5. Para o nível de umidade de 16%, que corresponde à densidade de $1,76 \text{ g/cm}^3$ na condição não adubada e $1,77 \text{ g/cm}^3$ na condição adubada e a resistência ao cisalhamento em torno de $9,5 \text{ kgf/cm}^2$, houve também uma maior concentração de raízes na camada superficial, nos lados e no fundo dos vasos e uma pequena quantidade na camada compactada. Para o nível 26%, que corresponde a densidade de $1,59 \text{ g/cm}^3$ na condição não adubada e $1,62 \text{ g/cm}^3$ na condição adubada e uma resistência ao cisalhamento de $2,0 \text{ kgf/cm}^2$, houve grande concentração de raízes na camada superficial, nos lados e no fundo dos vasos, com uma quantidade maior de raízes na camada compactada.

O comportamento do sistema radicular foi semelhante para a condição adubada e não adubada, ocorrendo somente uma maior produção de raízes na condição adubada.

Como se pode observar, há nítida alteração no comportamento das raízes em função da resistência oferecida pela terra. Como já foi comentado no item 4.3.2. a compactação a níveis de água iguais a 19% e 20% resultam em rigidez de poros que a raiz não consegue vencer. É também notável a influência da baixa porosidade de aeração nesses tratamentos conforme será visto posteriormente.

Um desenho esquemático demonstrativo desse comportamento pode ser visto na Figura 5.

Tratamento agregação
condição adubada

Tratamento agregação
condição não adubada

Tratamento compactação
ao nível de 16% de umidade

Tratamento compactação
ao nível de 19% de umidade

Tratamento compactação
ao nível de 20% de umidade

Tratamento compactação
ao nível de 26% de umidade

C ~ camada de 3cm de TFSA

Figura 5 - Esquema representativo do comportamento do sistema radicular do feijoeiro nos tratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade (para o subtratamento compactação as figuras representam as duas condições de adubação).

4.4.2. Efeito da compactação e agregação na altura das plantas nas condições adubada e não adubada

Os dados referentes às médias das leituras aos 20 e 40 dias da altura das plantas nos subtratamentos compactação e agregação, a diferentes níveis de umidade, e suas respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de duas leituras da altura de plantas nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidades em condição adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado			Não adubado		
	Densidade (g/cm ³)	1ª leit. ----- (cm)	2ª leit. ----- (cm)	Densidade (g/cm ³)	1ª leit. ----- (cm)	2ª leit. ----- (cm)
AGREGAÇÃO						
16	0,77	12,23	21,70	0,77	10,80	13,33
19	0,68	12,90	20,40	0,72	11,40	14,97
20	0,65	12,36	20,33	0,70	11,40	14,50
26	0,61	14,77	20,67	0,61	11,60	15,33
MÉDIA	-	13,07	20,77	-	11,30	14,48
DMS	-	1,19	3,94	-	1,29	2,06
COMPACTAÇÃO						
16	1,77	11,00	16,63	1,76	10,47	12,07
19	1,81	11,23	16,43	1,83	9,69	11,33
20	1,77	10,77	16,50	1,84	9,97	11,53
26	1,62	11,67	17,37	1,59	10,67	12,67
MÉDIA	-	11,17	16,73	-	10,20	11,90
DMS	-	1,19	3,94	-	1,29	2,06

A diferença entre os subtratamentos compactação e agregação foi significativa a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey tanto nas medições efetuadas para as condições adubada como não adubada.

Todavia a diferença ocorrida na 1ª leitura em relação ao nível 26% de umidade para o subtratamento agregação desapareceu com o desenvolvimento das plantas, não se detectando diferenças significativas na 2ª leitura.

Em relação às medições da altura de plantas, verificou-se uma variação significativa a nível de 5% de probabilidade entre os subtratamentos compactação e agregação. O mesmo não ocorreu dentro de cada tratamento tanto nas condições adubada e não adubada.

O crescimento das plantas adubadas foram bem superiores às não adubadas, como pode ser observada na Tabela 5, o que justificou dispensar essa comparação estatística.

Esse comportamento confirma a afirmação de NOGUEIRA e MANFREDIM (1981), os quais não encontraram variação significativa na altura de plantas em relação ao aumento da densidade do solo em experimento conduzido em vasos.

4.4.3. Efeito da compactação e agregação na produção de matéria seca em condições adubada e não adubada

Os dados referentes à produção de matéria seca nos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidades, para as condições adubada e não adubada, estão na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados da produção de matéria seca nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Matéria seca (g)	Densidade (g/cm ³)	Matéria seca (g)
AGREGAÇÃO				
16	0,77	2,57	0,77	0,81
19	0,68	3,02	0,72	1,08
20	0,65	3,34	0,70	1,13
26	0,61	3,71	0,61	1,21
MÉDIA	-	3,16	-	1,06
DMS	-	0,46	-	0,21
COMPACTAÇÃO				
16	1,77	2,30	1,76	0,83
19	1,81	2,10	1,83	0,67
20	1,77	1,96	1,84	0,57
26	1,62	2,77	1,59	0,87
MÉDIA	-	2,28	-	0,73
DMS	-	0,46	-	0,21

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias de produção de matéria seca dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, ocorrendo maior produção para o subtratamento agregação, tanto nas condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias de produção de matéria seca para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, mostrou diferença significativa entre todos os níveis de umidade, observando-se que a produção aumentou para valores decrescentes de densidade, tanto nas condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias de produção de matéria seca para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, mostrou diferença significativa para o nível 26%, o mesmo não ocorrendo para os níveis 16%, 19% e 20%, observando-se, também, que a produção aumentou para valores decrescentes de densidade, tanto nas condições adubada como não adubada.

Na comparação das médias de produção de matéria seca em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, os valores das médias no subtratamento agregação foram superiores ao da compactação, diferindo significativamente nos níveis 19%, 20% e 26%, somente não diferindo no nível 16%. O comportamento

foi semelhante para as condições adubada e não adubada.

Não houve comparação entre as condições adubada e não adubada, uma vez que visualmente se observou um aumento significativo na produção de matéria seca na condição adubada.

Concluindo-se, pode-se afirmar que ocorreu um aumento na produção de matéria seca para os valores decrescentes de densidade do solo e que a adubação também contribuiu para esse aumento. Isso se explica pelo fato de que, diminuindo a densidade, aumenta o volume poroso, facilitando a penetração do sistema radicular que explora um volume maior de terra, facilitando a absorção de nutrientes. Aumenta também a aeração e facilita a condutividade hidráulica.

4.4.4. Efeito da compactação e agregação na produção de raízes em condição adubada e não adubada

Os dados referentes à produção de raízes secas em estufa nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados da produção de raízes secas em estufa nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e suas respectivas densidade em condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Raízes seca (g)	Densidade (g/cm ³)	Raízes seca (g)
AGREGAÇÃO				
16	0,77	1,27	0,77	0,68
19	0,68	1,66	0,72	0,80
20	0,65	1,84	0,70	0,91
26	0,61	3,50	0,61	1,06
MÉDIA	-	2,07	-	0,86
DMS	-	0,82	-	0,16
COMPACTAÇÃO				
16	1,77	1,03	1,76	0,81
19	1,81	0,55	1,83	0,71
20	1,77	0,79	1,84	0,62
26	1,62	1,50	1,59	0,91
MÉDIA	-	0,97	-	0,76
DMS	-	0,82	-	0,16

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias de produção de raízes secas em estufa dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, ocorrendo maior produção para o subtratamento agregação, tanto nas condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias de produção de raízes secas em estufa para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição adubada, mostrou diferença significativa para o nível 26%, o mesmo não ocorrendo para os níveis 16%, 19% e 20%, observando-se que a produção aumentou para valores decrescentes de densidade.

Em condição não adubada, os níveis 20% e 26% não diferiram entre si, mas diferiram dos níveis 16% e 19%, que por sua vez também não diferiram entre si, sendo que as médias de produção foram crescentes para os níveis: 16%, 19%, 20% e 26%.

A comparação entre as médias de produção de raízes secas em estufa para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação na condição adubada, mostrou que o nível 26% diferiu significativamente do nível 19%, não diferindo dos demais, sendo que as médias de produção foram crescentes para os níveis 20%, 19%, 16% e 26%, observando-se também que a produção aumentou para valores decrescentes de densidade.

Em condição não adubada, os níveis 26% e 16% não diferiram entre si, mas diferiram dos níveis 19% e 20%, que

por sua vez também não diferiram entre si, sendo que as médias de produção foram crescentes para os níveis: 19%, 20%, 16% e 26%.

Na comparação das médias de produção de raízes secas em estufa em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, na condição adubada, os valores das médias no subtratamento agregação foram superiores ao da compactação, diferindo significativamente nos níveis 19%, 20% e 26%, somente não diferindo no nível 16%.

Em condição não adubada, os valores das médias de produção de raízes secas em estufa, também foram maiores no subtratamento agregação, diferindo significativamente nos níveis 16%, 20% e 26%, somente não diferindo no nível 19%.

Neste estudo também se verificou a tendência crescente de produção de raízes para valores decrescentes de densidade.

Não foi feita análise comparativa entre as condições adubada e não adubada, uma vez que também se verificou visualmente um aumento significativo na produção de raízes na condição adubada.

Este comportamento é devido ao fato de que o desenvolvimento das raízes está relacionado com o aumento do volume poroso do solo, que favorece a aeração, absorção de nutrientes, a penetração e respiração das raízes e a disponibilidade de água, ao mesmo tempo que contribui no aumento do volume de terra explorado pelo sistema radicular.

4.5. Efeito do crescimento do sistema radicular do feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L.) Walp, cv IPEAN - V - 69) sobre os parâmetros de porosidade dos subtratamentos compactação e agregação preparados a diferentes níveis de densidade em condições adubada e não adubada

4.5.1. Efeito na variação da porosidade total calculada

Os dados da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, dos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados da porosidade total calculada após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)
AGREGAÇÃO				
16	1,13	58,07	1,06	60,74
19	1,10	59,14	1,12	58,27
20	1,09	59,75	1,07	60,37
26	1,07	60,25	1,09	59,75
MÉDIA	-	59,30	-	59,78
DMS	-	1,25	-	2,25
COMPACTAÇÃO				
16	1,37	49,14	1,32	51,11
19	1,46	47,28	1,42	47,53
20	1,46	46,04	1,39	48,52
26	1,34	50,49	1,31	51,48
MÉDIA	-	48,24	-	49,66
DMS	-	1,25	-	2,25

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, sendo maior para o subtratamento agregação tanto em condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 16%, 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 19% e os níveis 19%, 20% e 26% também não diferiram entre si, diferindo do nível 16%.

Para a condição adubada, os níveis 16%, 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 19%.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 16 e 26% não diferiram entre si, o mesmo ocorrendo entre os níveis 19% e 20%, porém, os níveis 16% e 26% diferiram entre si.

Em condição adubada, os níveis 26% e 16% diferiram entre si e dos demais. Os níveis 19% e 20% não diferiram entre si, porém diferiram dos demais.

Na comparação das médias da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamen-

tos compactação e agregação, houve uma diferença significativa para todos os níveis de umidade e respectivas densidades, tanto na condição adubada como não adubada, sendo que os valores da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, no subtratamento agregação foram superiores aos da compactação.

Observou-se na análise dos dados da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, um sensível aumento nos valores do subtratamento compactação em relação à condição anterior ao cultivo, devido aos efeitos provocados pelo crescimento das raízes da planta teste.

A importância desse estudo é indicada pela possibilidade de recomposição de solo compactado pelas raízes das plantas (CARVALHO, 1976).

4.5.2. Efeito na variação da porcentagem de porosidade total determinada

Os dados da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, dos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 9.

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, dos subtratamentos

Tabela 9 - Dados da porosidade total determinada após cultivo nos subtratos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades em condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)
AGREGAÇÃO				
16	1,13	50,25	1,06	53,94
19	1,10	52,06	1,12	54,42
20	1,09	52,81	1,07	58,41
26	1,07	53,15	1,09	58,41
MÉDIA	-	52,07	-	56,45
DMS	-	1,36	-	3,10
COMPACTAÇÃO				
16	1,37	44,75	1,32	48,07
19	1,46	44,22	1,42	45,89
20	1,46	42,66	1,39	46,23
26	1,34	46,09	1,31	50,31
MÉDIA	-	44,43	-	47,62
DMS	-	1,36	-	3,10

agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, sendo maior para o subtratamento agregação, tanto em condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 16% e 19%, que também não diferiram entre si.

Para a condição adubada, os níveis 19%, 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo porém do nível 16%.

A comparação entre as médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 16% e 26% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 19% e 20%. Os níveis 16%, 19% e 20% não diferiram entre si, diferindo do nível 26%.

Em condição adubada, os níveis 26% e 16% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 19% e 20%. Os níveis 16% e 19% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 20% e 26%. O nível 20% diferiu de todos os níveis.

Na comparação das médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, houve uma diferença significativa

para todos os níveis de umidade e respectivas densidades, tanto na condição adubada como não adubada, sendo que os valores das médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, no subtratamento agregação foram superiores aos da compactação.

Na análise comparativa das médias da porcentagem de porosidade total determinada, após cultivo, entre os subtratamentos compactação e agregação com suas respectivas densidades, observou-se um comportamento semelhante ao da porcentagem de porosidade total calculada, após cultivo, apresentando no entanto, em geral, valores menores para todos os níveis de densidade nos dois subtratamentos, como também uma maior variação entre esses níveis, que se explica pela presença de poros bloqueados, discutido no item 4.5.5.

4.5.3. Efeito na variação da macroporosidade

Os dados da porcentagem de macroporos, após cultivo, dos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 10.

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 10 - Dados da porcentagem de macroporos após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Macroporos (%)	Densidade (g/cm ³)	Macroporos (%)
AGREGAÇÃO				
16	1,13	14,32	1,06	17,83
19	1,10	16,91	1,12	18,65
20	1,09	16,78	1,07	23,04
26	1,07	17,11	1,09	21,01
MÉDIA	-	16,28	-	20,13
DMS	-	0,65	-	3,10
COMPACTAÇÃO				
16	1,37	7,70	1,32	7,51
19	1,46	7,14	1,42	6,93
20	1,46	7,01	1,39	8,46
26	1,34	9,99	1,31	10,11
MÉDIA	-	7,96	-	8,25
DMS	-	0,65	-	3,10

A comparação entre as médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, sendo maior para o subtratamento agregação, tanto nas condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição

não adubada, mostrou que os níveis 19% e 26% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 20% e 16%, que também não diferiram entre si. As médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, foram crescentes para as densidades: 1,06 g/cm³; 1,12 g/cm³; 1,09 g/cm³ e 1,07 g/cm³.

Em condição adubada, os níveis 19%, 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 16%. Os valores das médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, foram crescentes para as densidades: 1,13 g/cm³; 1,09 g/cm³; 1,10 g/cm³ e 1,07 g/cm³, observando-se também uma menor variação nas médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, entre as densidades na condição adubada.

A comparação entre as médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 20% e 16% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 19% e 26%, que também não diferiram entre si. As médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: 1,42 g/cm³; 1,32 g/cm³; 1,39 g/cm³ e 1,31 g/cm³.

Em condição adubada, os níveis 26% e 20% diferiram entre si e dos demais níveis. Os níveis 16% e 19% não diferiram entre si, diferindo dos níveis 26% e 20%. Os valores das médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: 1,46 g/cm³; 1,46 g/cm³; 1,37 g/cm³ e 1,34 g/cm³.

Na comparação das médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, houve uma diferença significativa para todos os níveis de umidade e respectivas densidades, tanto na condição adubada como não adubada, sendo que os valores das médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, do subtratamento agregação foram superiores ao da compactação em todos os níveis de umidade e respectivas densidades.

Observou-se que o valor das médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, aumentou com o decréscimo da densidade e, em geral, foi maior nos dois subtratamentos e suas respectivas densidades para a condição não adubada.

Na condição adubada, verificou-se uma sensível diminuição nas médias da porcentagem de macroporos, após cultivo, em todos os níveis de densidade no subtratamento agregação em relação à condição não adubada, que pode ser explicado pela ação física do sistema radicular no seu crescimento, destruindo e obstruindo os macroporos, uma vez que nessa condição houve uma maior produção de raízes. No subtratamento compactação essa diminuição não é significativa.

Uma outra explicação do fato, poderia ser a de que, devido a maior concentração de cátions dispersantes, acrescentados pelo adubo, principalmente potássio, ocorreria um aumento na quantidade de partículas livres, as quais, se deslocando, contribuiriam na obstrução dos macroporos.

4.5.4. Efeito na variação da microporosidade

Os dados da porcentagem de microporos, após cultivo, dos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições a dubada e não adubada estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados da porcentagem de microporos após cultivo nos subtratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Microporos (%)	Densidade (g/cm ³)	Microporos (%)
AGREGAÇÃO				
16	1,13	35,93	1,06	38,52
16	1,10	35,14	1,12	38,37
20	1,09	35,94	1,07	36,26
26	1,07	36,14	1,09	37,41
MÉDIA		36,46	-	37,64
DMS		1,34	-	1,76
COMPACTAÇÃO				
16	1,37	37,05	1,32	40,56
19	1,46	37,08	1,42	38,96
20	1,46	35,65	1,39	37,60
26	1,34	36,11	1,31	40,37
MÉDIA	-	36,46	-	39,37
DMS	-	1,34	-	1,76

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias da porcentagem de microporos, após cultivo, dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, sendo maior para o subtratamento compactação, tanto nas condições adubada como não adubada.

A comparação entre as médias da porcentagem de microporos, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 16%, 19% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 20%. As médias da porcentagem de microporos, após cultivo, foram crescentes para as densidades: $1,07 \text{ g/cm}^3$; $1,09 \text{ g/cm}^3$; $1,12 \text{ g/cm}^3$ e $1,06 \text{ g/cm}^3$.

Em condição adubada, não houve diferença significativa entre os níveis de umidade e respectivas densidades, sendo os valores das médias da porcentagem de microporos, após cultivo, crescentes para os valores de densidade: $1,10 \text{ g/cm}^3$; $1,13 \text{ g/cm}^3$; $1,09 \text{ g/cm}^3$ e $1,07 \text{ g/cm}^3$.

A comparação entre as médias da porcentagem de microporos, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 16%, 19% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 20%. As médias da porcentagem de microporos, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: $1,39 \text{ g/cm}^3$; $1,42 \text{ g/cm}^3$; $1,31 \text{ g/cm}^3$ e $1,32 \text{ g/cm}^3$.

Em condição adubada, os níveis 16%, 19% e 26%

não diferiram entre si, diferindo do nível 20%. As médias da porcentagem de microporos, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: $1,46 \text{ g/cm}^3$; $1,34 \text{ g/cm}^3$; $1,37 \text{ g/cm}^3$ e $1,46 \text{ g/cm}^3$.

Na comparação das médias da porcentagem de microporos, após cultivo, em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, na condição não adubada, somente o nível 19% não diferiu significativamente dos outros, os demais diferiram, sendo que os valores das médias da porcentagem de microporos, após cultivo, no subtratamento compactação foram superiores ao da agregação em todos os níveis de umidade e correspondentes densidades.

Em condição adubada, os níveis 20% e 26% não diferiram tendo os demais níveis diferidos, sendo que os valores das médias da porcentagem de microporos, após cultivo, dos níveis 16% e 19% com suas respectivas densidades foram superiores no subtratamento compactação e as médias dos níveis 20% e 26% foram superiores no subtratamento agregação.

Observou-se em geral que os valores das médias da porcentagem de microporos, após cultivo, foram maiores no subtratamento compactação em relação à agregação, o que pode ser explicado pelo fato de que na compactação ocorreu uma diminuição do espaço poroso, através da aplicação de cargas, com a diminuição da porcentagem de macroporos e consequente aumento da porcentagem de microporos.

Observou-se, também que, os valores das médias

da porcentagem de microporos para a condição adubada, nos dois subtratamentos, foram maiores. A explicação para esse fato é que, o maior desenvolvimento do sistema radicular, provoca, através da ação física das raízes no seu crescimento, uma destruição dos poros maiores, aumentando desse modo a quantidade de poros menores (ver item 4.5.3.).

4.5.5. Efeito na quantidade de poros bloqueados

Os dados da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, dos subtratamentos compactação e agregação em diferentes níveis de umidade e respectivas densidades para as condições adubada e não adubada estão na Tabela 12.

O teste utilizado na comparação das médias foi o de Tukey a 5% de probabilidade.

A comparação entre as médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, dos subtratamentos agregação e compactação, mostrou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, sendo maior para o subtratamento agregação, tanto nas condições adubada como não adubada.

Tabela 12 - Dados da porcentagem de poros bloqueados após cultivo nos sub-tratamentos compactação e agregação a diferentes níveis de umidade e densidades para as condições adubada e não adubada (média de três repetições).

Trat. (U%)	Adubado		Não adubado	
	Densidade (g/cm ³)	Poros bloqueados (U%)	Densidade (g/cm ³)	Poros bloqueados (U%)
AGREGAÇÃO				
16	1,13	7,82	1,06	6,80
19	1,10	7,08	1,12	3,85
20	1,09	6,94	1,07	1,35
26	1,07	7,82	1,09	1,34
MÉDIA	-	7,23	-	3,33
DMS	-	1,34	-	2,96
COMPACTAÇÃO				
16	1,37	4,39	1,32	3,04
19	1,46	2,35	1,42	1,64
20	1,46	3,38	1,39	2,29
26	1,34	4,40	1,31	1,17
MÉDIA	-	3,63	-	2,03
DMS	-	1,34	-	2,96

A comparação entre as médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento agregação, na condição não adubada, mostrou que os níveis 26%, 20% e 19% não diferiram entre si, diferindo do nível 16%. As médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: 1,09 g/cm³; 1,12 g/cm³; 1,07 g/cm³ e 1,06 g/cm³.

Em condição adubada, não houve diferença significativa entre os níveis de umidade e respectivas densidades, sendo os valores das médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, crescentes para os valores de densidade: 1,09 g/cm³; 1,10 g/cm³; 1,07 g/cm³ e 1,13 g/cm³.

A comparação das médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, para os níveis de umidade e suas respectivas densidades, do subtratamento compactação, na condição não adubada, mostrou não existir diferenças significativas entre os níveis de umidade. Os valores das médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: 1,31 g/cm³; 1,42 g/cm³; 1,39 g/cm³ e 1,32 g/cm³.

Em condição adubada, os níveis 26%, 16% e 20% não diferiram entre si, diferindo do nível 19%. As médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram crescentes para os valores de densidade: 1,46 g/cm³; 1,46 g/cm³; 1,37 g/cm³ e 1,34 g/cm³.

Na comparação das médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, em um mesmo nível de umidade e suas correspondentes densidades, entre os subtratamentos compactação e agregação, na condição não adubada, os níveis 19%, 20% e 26% não diferiram entre si, diferindo do nível 16%. As médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram crescentes para os níveis de umidade: 26%; 20%; 19% e 16%.

Em condição adubada, os níveis 16%, 26% e 20% não diferiram entre si, diferindo do nível 19%. As médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram crescentes para os níveis de umidade: 19%; 20%; 26% e 16%. Observa-se que as médias da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, foram menores em valores absolutos, no subtratamento compactação tanto na condição adubada como não adubada, em relação à agregação. Isso ocorreu talvez devido ao fato de que a quantidade de macroporos no subtratamento compactação é bem menor. Entretanto, relativamente, o valor da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, é semelhante nos dois casos, com exceção da condição não adubada em grau de umidade elevada em que a proporção da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, é menor no subtratamento compactação.

Outra observação da análise dos dados é que a média da porcentagem de poros bloqueados, após cultivo, nos subtratamentos compactação e agregação, na condição adubada, foi bem maior que na condição não adubada e também com menores variações entre os valores de densidade ou níveis de umidade, o

que nos leva a concluir que a adubação contribuiu para esse aumento. Pode ser devido ao fato de que nessa condição houve um maior crescimento radicular e a ação física do crescimento das raízes tenha contribuído na obstrução dos macroporos.

Um outra causa pode ter sido o fornecimento de cátions dispersantes, através do adubo, principalmente o potássio, que provocaram um aumento na quantidade de partículas livres. Estas, ao se movimentarem na terra, contribuíram também na obstrução dos macroporos.

Segundo SCARDUA (1972) os poros bloqueados pertencem à classe dos macroporos. Aceitando-se essa afirmação por ser uma suposição razoável, conclui-se que a agregação concorre duplamente para modificar a porosidade do solo, isto é, um aumento de poros atuantes no regime hídrico e de outros que constituem poros que participam provavelmente apenas da aeração.

É possível que a presença de poros bloqueados e sua proporção na porosidade total seja a explicação para a variação na condutividade hidráulica de solos agregados.

5. CONCLUSÕES

A análise e interpretação dos resultados obtidos permitiu tirar-se as seguintes conclusões:

1. O teste de Kiehl representa um complemento ao teste de Proctor na determinação das relações entre densidade e umidade em amostras de terra.
2. O ramo ascendente da curva densidade - umidade do teste de Proctor representa alterações mais estáveis provocadas na densidade do solo do que as indicadas no ramo descendente.
3. As alterações na porosidade total após cultivo resultam da variação da % de macroporos e ocorrem em função da irrigação, da eluviação de colóides e da atividade do sistema radicular. Estas duas últimas favorecidas pela adubação, par-

ticularmente, no caso presente, com o nutriente potássio. No caso de elevada porosidade total, promovida pela agregação, ocorre diminuição da % de macroporos e aumento de poros bloqueados. No caso de menor porosidade, promovida pela compactação, ocorre aumento da % de microporos.

4. A diminuição da % de poros bloqueados com a compactação indica que esses poros pertencem à classe dos macroporos.
5. A agregação concorre duplamente na participação dos macroporos, provocando um aumento de poros atuantes no regime hídrico e outro que constitui poros que participam provavelmente apenas da aeração (poros bloqueados).
6. O sistema radicular do feijoeiro desenvolve-se nas camadas que oferecem menor resistência à penetração, consequentemente o efeito indireto da porosidade sobre a parte aérea do feijoeiro só aparece se for impedido o crescimento do sistema radicular em relação às exigências da planta.

6. LITERATURA CITADA

- ARENA, A.A., 1941. El analisis de los agregados del suelo.
Revista del Centro Estudiantes de Agronomía de Buenos Aires.
Tomo 30:(3): 233-260.
- 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. Madison, 29(2):
290-293.
- BAVER, L.D., 1956. Soil physics. 3.ed., New York, John Wiley
& Sons. 489p.
- BAVER, L.D.; W.H. GARDNER e W.R. GARDNER, 1972. Soil Physics.
4.ed., New York, John Wiley & Sons. 498p.

BECKKER, M.G., 1961. Mechanical properties of soil and problem of compaction. Trans. ASAE, 4(2): 231-238.

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P. e TAYLOR, J.C., 1981. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. R. bras. Ci. Solo, 5: 145-149.

BERTRAND, A.R. e H. KOHNKE, 1957. Subsoil conditions and their effect on oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 21(2): 135-140.

BREWER, R., 1964. Fabric and mineral analysis. Madison. Am. Soc. of Agr. 1965. Part 1, p.374-390.

BRUCE, R.R., 1955. An instrument for the determination of soil compactibility. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 19(3): 253-257.

BULLOCK, P. e C.P. MURPHY, 1976. The microscopic examination of structure of sub-surface horizons of soils. Blackwell Berkshire England. Plant Protections Division, 8: 384-354.

CAMARGO, A.O., 1983. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Fundação Cargill. Campinas (texto mimeografado), 44p.

- CARVALHO, S.R. de, 1976. Influência de dois sistemas de manejo de pastagens na compactação de uma Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, ESALQ/USP, 89. (Dissertação de Mestrado).
- CHILDS, E.C., 1969. Soils water phenomena. 1.ed. New York, John Wiley & Sons, 493p.
- DA COSTA, M.P., 1983. Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo. Piracicaba, ESALQ/USP, 139p. (Dissertação de Mestrado).
- DAY, R.P. e HOLGREN, G.G., 1952. Microscopic changes in soil structure during compression. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16(1): 73-77.
- FRANÇA DA SILVA, I., 1980. Efeitos de sistemas de manejo e tempo de cultivo sobre as propriedades físicas de um latossolo. Porto Alegre, UFRGS, 70p. (Dissertação de Mestrado).
- FORSYTHE, W.M., s.d. Densidad, porosidad, empaquetamiento y estructura del suelo. IICA, Turrialba, 32p. (mimeografado).
- GROHMANN, F. e J.P. QUEIROZ NETO, 1966. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. Bragantia, Campinas, 25(38): 421-432.

- GUMBS, F.A. e B.P. WARKENTIN, 1972. The effect of bulk density and initial water on infiltration in clay soil samples. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 36: 720-724.
- HEMSATH, D.L. e A.P. MAZURAK, 1974. Seedling growth of sorghum in clay mixtures at various compactions and water contents. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 38: 387-390.
- HENIN, S.; R. GRASS e G. MONNIER, 1972. El perfil cultural: estado físico del suelo y sus consecuencias agronomicas. Madrid, Ed. Mundi Prensa. 342p.
- KIEHL, E.J., 1979. Manual de Edafologia. São Paulo, Ed. Agron. Ceres. 263p.
- KOHNKE, H., 1976. No tillage on soil properties under differential crops in western Nigeria. Soil Sci. Soc. Am. Madison, 40: 762-768.
- LIMA, F.A.M., 1970. Consistência do solo: friabilidade em três séries de solos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 77p. (Dissertação de Mestrado).
- MACHADO, J.A. e A.C.R., BRUM, 1978. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo do solo. R. bras. ci. Solo, (2): 81-84.

- MANNERING, J.V.; L.D. MEYER e C.B. JOHNSON, 1966. Infiltration and erosion as affected by minimum tillage for corn (*Zea mays* L.). Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 30: 101-105.
- MARCOS, Z.Z., 1968. Estrutura, agregação e água do solo. Piracicaba, ESALQ/USP, 55p. (Dissertação de Mestrado).
- MARCOS, Z.Z., 1979. Ensaio sobre epistemologia pedológica. Piracicaba, ESALQ/USP, 119p. Fundação Cargill, Campinas, São Paulo. (Tese de Livre Docência).
- MEREDITH, H.L. e W.H. PATRICK Jr., 1961. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. Agron. Jour., 53(1): 163-167.
- MIRREH, H.F. e J.W. KETCHESON, 1972. Influence of soil bulk density and matrix pressure on soil resistance to penetration. Can. J. Soil Sci. Ottawa, 52: 477-483.
- NOQUEIRA, S.S.S. e S. MANFREDIM, 1981. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. XVII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. IAC, Salvador, Bahia.
- PAULETTO, E.A., 1978. Estudo sobre a dispersão de amostra de terra. Piracicaba, ESALQ/USP, 68p. (Dissertação de Mestrado).

PAUL, C.L. e J. DE VRIES, 1979. Effect of soil water status and strength on trafficability. Can. J. Soil Sci. Ottawa, 59: 313-324.

PEARSON, R.W., 1966. Soil environment and root development. In: PIERRE, W.H.; D. KIRKHAM; S. PESEK e R. SHAW, eds. Plant environment and efficient water use. Am. Soc. Agron. Madison, p.95-126.

PRIMAVESI, O.M.A.B., 1983. Nutrição mineral de feijoeiro em dois solos sujeitos a compactação. Piracicaba, ESALQ/USP, 142p. (Dissertação de Mestrado).

PROCTOR, R.R., 1933. Fundamental principles of soil compaction. Eng. New Record. New York, 111(9): 245-248.

RANZANI, G.; O. FREIRE e T. KINJO, 1966. Carta de solos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 85p.

RANZANI, G., 1969. Manual de levantamento de solos. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 167p.

ROSEMBERG, J.N., 1964. Response of plants to the physical effects of soil compaction. In: Ad. Agron., 16: 181-196.

SCARDUA, R., 1972. Porosidade de água de dois solos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 83p. (Dissertação de Mestrado).

TAYLOR, H.M. e H.R. GARDNER, 1963. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Sci. Baltimore, 96(3): 153-156.

TAYLOR, H.M.; G.M. ROBERSON e J.J. PARKER Jr., 1967. Cotton seedling taproot elongation as affected by soil strength changes by slurring and water extraction. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 31(5): 700-704.

TAYLOR, H.M., 1974. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E.W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, Univ. Press of Virginia, p.271-291.

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.

VEIHMEYER, J.J. e A.H. HENDRICKSON, 1948. Soil density and root penetration. Soil Sci., 65(6): 487-493.

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

YANG, C.L., 1970. Soil hardness in relation to root growth of sugar cane. Soils Fert. Taiwan. Taipei, 27: 18-29.