EFEITO DA UMIDADE, INCLINAÇÃO DO DISCO E VELOCIDADE DE ARAÇÃO SOBRE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UM LATOSSOLO ROXO.

ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA
Engenheiro Agrônomo — «Magister Scientiae»

Orientador; Prof. Dr. RUBENS SCARDUA

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura «Luiz de Queiroz», da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Doutor em Agronomia. Área
de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro de 1980

A memória de minha mãe,
ao meu pai,
com gratidão e amor.

A minha esposa Maria Alice,
pela convivência, carinho e amor.

Aos meus três queridos filhos:
Rogério, Simone e Denise,
três razões da minha vida.

Dedico este trabalho

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. RUBENS SCARDUA, orientador, e ao Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE, pelas sugestões.

Ao Prof. Dr. WESLEY JORGE FREIRE, pela colaboração, dedicação e paciência, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Profs. Drs. GERTRUDES CELENE ROCHA PIEDADE, CE ZAR PIEDADE JR., SÉRGIO HUGO BENEZ, SHEILA ZAMBELLO DE PINHO e MARIA ALICE DE LOURDES BUENO SOUSA, pela colaboração, apoio e incentivo.

Aos funcionários MARIA DE LOURDES CONTE, ENEISA DALANEZI, JEANNETTE GARCIA HONÓRIO PIRES, MAURY TORRES DA SILVA, VICENTE JOSÉ DE VASCONCELOS, FRANCISCO MARTINS FILHO, ELZA BOTTINI CARNIETTO, BENEDITO TAVARES SOBRINHO, JOSÉ CARLOS MARTINS e SUELI BURIN, pelos auxílios prestados.

A Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP "Campus" de Botucatu, que possibilitou a realização do Curso de Pós-Graduação.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Í N D I C E

	página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
3.1. Materiais.....	9
3.1.1. Solo	9
3.1.2. Trator.....	11
3.1.3. Arado.....	11
3.1.4. Medidor de peso específico aparente.....	12
3.1.5. Penetrômetro de anel.....	12
3.1.6. Penetrômetro de bolso	12
3.1.7. Outros equipamentos e materiais.....	13
3.2. Métodos.....	13
3.2.1. Delineamento experimental.....	13
3.2.2. Ensaio preliminares e definitivos.....	14
3.2.3. Umidade do solo	14
3.2.4. Peso específico aparente seco.....	15

3.2.5. Peso específico dos sólidos.....	15
3.2.6. Peso específico natural.....	16
3.2.7. Índice de vazios e porosidade.....	16
3.2.8. Grau de saturação.....	16
3.2.9. Resistência do solo a penetração.....	17
3.2.10. Resistência a compressão simples não confinada.....	17
3.2.11. Compactação do solo.....	17
3.2.12. Peneiramento a seco.....	18
3.2.13. Análise granulométrica.....	19
3.2.14. Limites de consistência.....	19
3.2.15. Análise estatística.....	21
4. RESULTADOS.....	22
5. DISCUSSÃO.....	31
6. CONCLUSÕES.....	42
7. LITERATURA CITADA.....	44
APÊNDICE.....	48

LISTA DE QUADROS

Página

QUADRO 1 - Características e propriedades físicas do solo de classe textural argila arenosa à profundidade de 0-20 cm.....	10
QUADRO 2 - Valores dos dados de peso específico aparente seco (γ_o), em g/cm^3 , determinados pelo método do torrão impermeabilizado, na camada superficial de 2 cm de soleira do sulco central da aração.....	23
QUADRO 3 - Valores do peso específico natural (γ) e do peso específico aparente seco (γ_o) do solo, em g/cm^3 , calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter".....	24
QUADRO 4 - Valores do índice de vazios (e) e da porosidade (n) no solo, calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter".....	25
QUADRO 5 - Valores do grau de saturação (S) do solo, em %, calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter",.....	26
QUADRO 6 - Valores da resistência à penetração (ou capacidade de suporte), em kg/cm^2 , determinados pelo penetrômetro de anel	27

QUADRO 7 - Valores da resistência do solo à <u>com</u> pressão simples não confinada, em kg/cm^2 , determinados pelo penetrôme- tro de bolso.....	28
QUADRO 8 - Valores de porcentagem acumulada de agregados do solo, em peneira nº 60 (0,25 mm), obtidos através do penei- ramento a seco.....	29
QUADRO 9 - Valores do módulo de finura dos agre- gados do solo, obtidos através de pe- neiramento a seco.....	30
QUADRO 10 - Valores de F e CV obtidos pelas aná- lises da variância dos dados referen- tes ao peso específico aparente seco do solo (γ_o), obtidos pelo método do torrão impermeabilizado F.....	32
QUADRO 11 -Valores de F e CV obtidos pelas aná- lises da variância dos dados referen- tes ao peso específico natural do so- lo (γ), e dos dados de peso específi- co aparente seco (γ_o) calculado.....	33
QUADRO 12 - Valores de F e CV obtidos pelas aná- lises da variância dos dados referen- tes ao índice de vazios (e) e porosi- dade do solo (n).....	34

QUADRO 13 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao grau de saturação do solo (S).....	35
QUADRO 14 - Valores das médias obtidas para a testemunha ($\bar{x}_1$) e das médias dos tratamentos ($\bar{x}_2$), e valores do teste t obtidos pela comparação de ($\bar{x}_1$) e ($\bar{x}_2$) para os diversos parâmetros estudados.....	36
QUADRO 15 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao penetrômetro de anel.....	38
QUADRO 16 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao penetrômetro de bolso.....	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Curva de distribuição granulométrica do solo de classe textural argila arenosa.....	20
--	----

EFEITO DA UMIDADE, INCLINAÇÃO DO DISCO E VELOCIDADE DE ARAÇÃO
SOBRE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UM LATOSSOLO ROXO.

ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA

Prof. Dr. *Rubens Scardua*
- Orientador -

R E S U M O

No presente trabalho foi estudado o efeito da umidade, da inclinação do disco e da velocidade de aração sobre algumas características físicas de um Latossolo Roxo. O experimento constou de 8 tratamentos mais a testemunha, tendo observado um delineamento experimental em fatorial. Foi utilizado um arado de discos, com 2 regulagens do ângulo vertical (15° e 22°), a 2 velocidades de operação (2,73 km/h e 6,64 km/h). Os ensaios foram desenvolvidos em 2 diferentes teores de umidade (29,20% e 27,20). Foram estudados os seguintes parâmetros: peso específico aparente seco, peso específico natural, índice de vazios, porosidade, grau de saturação, resistência do solo a penetração, resistência a compressão simples não confinada e estabilidade dos agregados. A análise estatística e a discussão dos dados obtidos permitiram constatar a ocorrência de diferenças significativas entre os mesmos.

EFFECT OF SOIL MOISTURE, DISK TILT AND PLOWING SPEED ON
SOME PHYSICAL CHARACTERISTICS OF A LATOSSOLO ROXO SOIL.

ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA

Prof. Dr. Rubens Scardua
- Adviser -

SUMMARY

The purpose of the present research was to study the effect of soil moisture, disk tilt and plowing speed on some physical characteristics of a Latossolo Roxo soil.

The experiment consisted of eight treatments plus the check and was set out on a randomized block design. A disk plow was utilized with two vertical angles (15° and 22°) and at two forward speed (2,73 km/h and 6,64 km/h). Two soil moisture content were used (29,20 and 27,20%).

The following soil parameters were studied: bulk density soil unity weight, void ratio, porosity, saturation degree, soil strength to penetration, soil strength to unconfined uniaxial compression and aggregate stability.

Results showed significant differences among tre
tments.

1. INTRODUÇÃO

O solo representa uma grande parte do ambiente físico sob o qual se desenvolve uma cultura, sendo o responsável pela fixação e condições adequadas de suprimento de água e nutrientes às plantas.

As operações de preparo periódico do solo constituem uma das etapas da produção agrícola, sendo todavia o principal agente indutor de alterações nas características físicas do solo. Essas operações objetivam proporcionar condições necessárias e favoráveis para a instalação e desenvolvimento das culturas.

Entretanto um bom preparo não se constitui apenas com relação a estrutura, inclui também fases da consistência do solo, sabendo-se que o estudo desta operação tem sido olhado do ponto de vista da mecânica do solo, sendo que a resistência do solo às forças aplicadas está na dependência direta do conteúdo de umidade, das características plásticas, da estrutura e do conteúdo de matéria orgânica.

A aração constitui uma das fases do preparo periódico do solo, e o arado de disco no Brasil é o implemento mais usado, em face de apresentar um trabalho satisfatório. Vários estudos têm sido feitos na tentativa de se conseguir dados concretos visando a interação solo-máquina, mas o efeito

do implemento na compactação do solo não tem sido estudado com certa frequência, isto é, pouco ou nada tem sido feito. Daí a razão de se desenvolver um estudo sobre o efeito do implemento nas características do solo e que constitui a fase deste trabalho cujo objetivo é o efeito da umidade do solo, inclinação do disco e velocidade de operação do arado sobre algumas características físicas de um latossolo roxo, sob ação do arado de discos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O efeito de um dado implemento de preparo do solo sobre a sua estrutura depende de uma série de fatores, tais como o teor de umidade do solo, a velocidade do deslocamento do implemento e sua regulagem.

O uso de arado de aiveca no preparo de solos leves para cultivo tem diminuído e praticamente desaparecido em alguns lugares. O arado de aiveca desenvolve um alto grau de afofamento dentro da camada cultivada, embora em solos pesados ou compactados persistam torrões não fraturados. As respostas do solo tanto dentro como abaixo da camada cultivada estarão, todavia, intimamente relacionadas com o tipo de arado e trator usados bem como com a profundidade e velocidade de trabalho adotadas.

NICHOLS e REAVES (1955) entendem que a maior dificuldade em avaliar os efeitos do preparo consiste em se efetuar um levantamento real das condições atuais do solo abaixo da superfície, antes e depois da operação. A modificação da estrutura provocada pelo uso de implemento depende, em grande escala, da consistência do solo verificada naquela ocasião.

Em áreas de agricultura intensiva, devido ao

tráfego contínuo de máquinas pesadas e ao uso de equipamentos de cultivo FLOCKER et alii (1960) constataram uma tendência para a formação de camadas compactadas de baixa permeabilidade.

A avaliação da compactação do solo pelo estudo das modificações observadas nas suas características físicas é considerada possível por VOMOCIL (1957).

Em solos compactados, a camada que limita a penetração de raízes e de água é consequência da aplicação de forças de compactação, tais como aquelas provocadas por implementos agrícolas e pisoteio intensivo de animais, PEARSON et alii (1975).

Segundo ROSEMBERG e WILLITS (1962) e WITTSELL e HOBBS (1965), a compactação do solo pelo uso de equipamentos pesados de cultivo pode contribuir para a redução da produção das culturas.

Desde que as práticas de preparo do solo afetam a porosidade e peso específico aparente é possível que também afetem a morfologia das raízes das plantas, tendo SCHURMAN (1965) demonstrado que isso ocorre em razão inversa, estando ainda esse efeito na dependência do desenvolvimento vegetal e condições ambientais.

MACHADO (1976), comparando solo submetido ao sistema de plantio direto e convencional com solo sob condições de mata virgem e campo natural efetuou estudos para determinar as principais alterações físicas, inerentes à sua conservação e algumas alterações químicas sofridas pelo solo, nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm. Tal estudo permitiu ao autor concluir que os efeitos das alterações físicas do solo submetido ao sistema convencional de cultivo mostraram-se evidentes em relação aos outros tratamentos, principalmente, através da diminuição da capacidade de infiltração, porosidade total, macroporosidade, matéria orgânica, estabilidade dos agregados e agregação, aumentando o peso específico do solo, microporosidade e compactação.

Segundo BUCKMAN e BRADY (1968), o cultivo intenso aumenta o peso específico aparente das camadas superficiais do solo.

BRASIL (1973) afirmou que o valor do peso específico das partículas sofre forte influência da quantidade de matéria orgânica existente no solo, pois esta pesa muito menos do que o volume inicial de sólidos minerais, o que faz com que os solos de superfície possuam, geralmente, valores de peso específico de partículas mais baixos do que os subso-
los.

Dedecek, citado por MACHADO (1976), considerou que o peso específico das partículas constitui um valor que deve ser utilizado quando se fazem comparações entre pesos específicos aparentes de solos diferentes. Tal preocupação se reveste de importância, segundo o autor, principalmente quando o peso específico aparente do solo é tomado como elemento de comparação para índice de compactação dos solos. Solos com maior peso específico de partículas não são necessariamente os mais compactados, pois o peso específico de partículas influi sobre o peso específico aparente do solo.

SHEAR e MOSCHLER (1969) não encontraram diferenças significativas no peso específico aparente para o cultivo convencional e o não cultivo ("zero cultivo"), mostrando assim que este não foi afetado pela compactação durante o tempo de observação.

A variação do peso específico aparente do solo não cultivado, estimada geralmente entre 1,0 a 1,6 g/cm³, tem sido atribuída, em sua maior parte, à variação da porosidade total. Assim, a uma textura mais fina corresponde um maior volume de poros, apresentando os solos argilosos com pesos específicos aparentes entre 1,0 a 1,3 g/cm³ e os solos arenosos de 1,2 a 1,6 g/cm³, THOMPSON (1962).

OMETTO (1957), estudando a influência da umidade do solo no trabalho do arado e no coeficiente de resistência, utilizou dois tipos de solo (argiloso e arenoso), com

dois tipos de arados (discos e aiveca) tracionados por trator e submetidos a cinco teores de umidade diferentes. Concluiu o autor que, no caso do solo argiloso, o comportamento dos dois tipos de arados foi o mesmo em relação a variação de umidade, isto é, não houve interação entre o tipo de arado e o grau de umidade.

ALLMARAS et alii (1969) concluíram que o arranjamento dos agregados influencia a porosidade total e a rugosidade superficial de um solo preparado mecanicamente. Os autores investigaram estes fatores em função do teor de umídade por ocasião do preparo do solo e constataram que a porosidade e rugosidade superficial mínimas ocorreram, em muitos casos, quando o preparo foi feito no teor de umidade correspondente ao limite de plasticidade, embora houvessem exceções.

STAFFORD (1979) estudando o comportamento de um dente rígido em relação às propriedades do solo e velocidade de trabalho verificou que a resistência do solo estava primeiramente relacionada com a umidade e o cisalhamento. O tipo de solo somente influenciava a resistência numa segunda fase, na qual a composição granulométrica afetava a faixa pertinente de umidade. O autor constatou ainda que as forças resistentes do solo aumentavam com a velocidade de operação; a natureza da mudança variava, no entanto, em função do teor de umidade, o que ocorria ao redor do limite de plasticidade do solo.

SOANE e PIDGEON (1975) verificaram que variações nos valores de resistência do solo, entre tratamentos, se mostraram, em alguns casos, independentes em relação as diferenças observadas no peso específico aparente; no entanto a aração invariavelmente resultou em grandes e significantes reduções na resistência do solo.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples não confinada revelaram, segundo VOMOCIL e FLOCKER (1965), uma relevante influência da compactação na

faixa de teor de umidade mais baixa; esta influência desapareceu próximo ao limite de plasticidade.

PANWAR e SIEMENS (1972), estudando a relação entre a resistência ao cisalhamento e energia da ruptura do solo relacionada ao peso específico aparente e umidade, concluíram que a tensão de ruptura nos ensaios de compressão simples não confinada aumentou com o teor de umidade e peso específico aparente. Verificaram ainda que a energia por unidade de volume do solo era tanto maior quanto maior o peso específico aparente. Tanto a coesão do solo como o ângulo do plano de ruptura, nos ensaios em modelo reduzido, estavam estreitamente relacionados com os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento, uma vez que o peso específico aparente do solo está diretamente relacionado com os valores de resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno, e estes, inversamente relacionados com o teor de umidade.

Segundo OJENIYI e DEXTER (1979) há um teor de umidade considerado ótimo no qual o preparo do solo produz o máximo de agregados menores e mínimo de espaços vazios, estando aquele teor ao redor de 0,9 do limite de plasticidade do solo.

ROBINSON e PAGE (1951) comentaram que o arranjo das partículas dentro do agregado não parece ter um efeito significativo sobre a estabilidade dos mesmos. Em vista disso, os autores concluíram que a compactação em si não exerce nenhum efeito sobre a estabilidade dos agregados.

CHANG e WARKENTIN (1968), estudando a variação de volume de agregados de um solo argiloso compactado, observaram que a compactação entre agregados pode ser diferenciada da compactação intra-agregados; a contração total e o inchamento dos solos foram mais pronunciados para as amostras preparadas com agregados de menor tamanho ($<0,25$ mm), devido ao maior rearranjo dos agregados. A mudança volumétrica aumentou com o acréscimo na compactação para os agregados maiores, mas decresceu para os menores, isto dependendo do tama-

nho dos poros na amostra.

O tamanho dos agregados é um fator importante ao estudo das forças atuantes no solo, por ocasião do seu preparo. Trabalhando com agregados secos de um solo argiloso, NICHOLS e REAVES (1955) verificaram que quanto maior era o tamanho dos agregados maior era a resistência ao cisalhamento; neste caso particular, o valor da resistência ao cisalhamento de agregados de 2 a 3 mm de diâmetro era mais do que o dobro da resistência dos agregados de 0,25 mm. Os autores constataram ainda que o peso específico aumentou com o decréscimo do tamanho dos agregados.

ROGOWSKI e KIRKHAM (1962) estudando a estabilidade de agregados em água formados a partir de um material desagregado constataram que a aplicação de pressão aumentou a estabilidade mas não ao nível original encontrado para os agregados naturais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Solo

Os ensaios foram executados em um solo, cujas características e propriedades físicas são apresentadas no QUADRO 1. A área dos ensaios está localizada na Estação Experimental "Presidente Médici", da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" "Campus" de Botucatu, Estado de São Paulo. Encontra-se no topo de uma elevação, com uma declividade de 5%, de forma convexa. Por ocasião dos ensaios não havia nenhuma cobertura vegetal na superfície do solo, face a uma recente queimada.

De acordo com CARVALHO et alii (1979) este solo foi classificado como Latossolo Roxo, de classe textural argila arenosa. A descrição morfológica do perfil, nos horizontes superficiais é a seguinte:

Ap 0-10 cm; vermelho (2,5 YR 4/6) seco, vermelho escuro (2,5 YR 3/4) úmido; barro argila arenoso; granular; prismática, moderado; macio, friável, plástico, pegajoso ; raízes finas, abundantes; limite suave gradual.

QUADRO 1 - Características e propriedades físicas do solo de classe textural argila arenosa à profundidade de 0-20 cm.

Frações constituintes (*)	%
Areia muito grossa (2 - 1 mm)	2,00
Areia grossa (1 - 0,5 mm)	5,50
Areia média (0,5 - 0,25 mm)	13,00
Areia fina (0,25 - 0,10 mm)	26,50
Areia muito fina (0,10 - 0,05 mm)	4,50
Areia total	51,50
Silte (0,05 - 0,002 mm)	9,50
Argila (<0,002 mm)	39,00
Peso específico dos sólidos (γ_s)	2,98 g/cm ³
Peso específico aparente seco (γ_o)	1,22 g/cm ³
Limites de consistência	%
Limite de liquidez (LL)	41,23
Limite de plasticidade (LP)	30,94
Índice de plasticidade (IP)	10,29
Ensaio de Proctor	
Umidade ótima (h_{ot})	28,10 %
Peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{o_{m\acute{a}x}}$)	1,52 g/cm ³
Índice de vazios (e)	0,97
Grau de saturação (S)	86,65 %

(*) Classificação de acordo com o sistema do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

A₃/B₁ 10-30 cm; vermelho (2,5 YR 4/6) seco, vermelho escuro (2,5 YR 3/4) úmido; argila; blocos sub-angulares, média, moderado; ligeiramente duro, friável, muito plástico, muito pegajoso; raízes finas, abundantes; limite suave gradual.

Tal solo, apresentando um Índice de Plasticidade de maior que 7 e menor do que 15, é classificado como sendo medianamente plástico, segundo PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - (1962). Trata-se, ainda, de uma argila de consistência dura e atividade normal pois seus índices de consistência e de atividade são, respectivamente maior do que 1,0 e menor do que 0,7, VARGAS (1977).

3.1.2. Trator

Para tracionar o arado foi utilizado um trator de rodas pneumáticas, marca Massey-Ferguson, modelo MF-178, - com uma potência máxima de 72,5 HP a 2.000 rpm no motor Diesel Perkins A-4248, de quatro cilindros, possuindo seis velocidades para a frente e duas a ré, com um peso total de 2.964 quilos.

3.1.3. Arado

Foi empregado um arado de discos, da marca Massey-Ferguson, modelo MF 64, de levantamento hidráulico, equipado com 3 discos de 66 cm de diâmetro, pesando 345 quilos. A disposição dos discos observava uma distância de 50 cm entre si sendo que a posição de regulação para o ângulo horizontal foi de 50° e, para o ângulo vertical 15° e 22° para as inclinações mínima e máxima respectivamente A₂ e A₁.

3.1.4. Medidor de peso específico aparente

Os valores de peso específico aparente foram obtidos diretamente no campo com o auxílio do aparelho "Eley Volumeter", da Soiltest, que permite leituras precisas em solos indeformados.

Constituído de um cilindro de aço inoxidável, com 2,8 cm de diâmetro, de volume conhecido, em seu interior, um pistão preso a uma haste provida de rosca e graduada, que permite a indicação de volumes de 0 a 30 cm³.

3.1.5. Penetrômetro de anel

O penetrômetro de anel, modelo CN-970, da Soiltest, é um penetrômetro de ponta cônica que é usado para a determinação da resistência à penetração do solo.

O instrumento consiste de uma haste de penetração de 18 polegadas de comprimento, um anel de prova de 250 libras de capacidade com relógio indicador e uma ponta cônica removível. A ponta cônica tem uma área da base igual a 0,983 polegadas quadradas e uma área cônica de 3,826 polegadas quadradas.

A resistência à penetração (capacidade de suporte) é obtida dividindo-se a carga de penetração pela área da base do cone que, a fim de se fazer a correção do atrito cone-solo, deve ser tomada como sendo igual a 1 polegada quadrada. Por isso a carga de penetração lida em libras é numericamente igual à resistência à penetração da capacidade de suporte em libras por polegada quadrada.

3.1.6. Penetrômetro de bolso

Trata-se de um aparelho simples, fabricado pela Soiltest, modelo CL-700, de fácil manejo, extremamente útil

na avaliação da resistência à compressão simples não confinada de solos coesivos, que é obtida, na escala do aparelho, pressionando-se a ponta do penetrômetro no solo até a marca de referência, localizada a 1/4" da extremidade; um anel indicador aponta automaticamente a leitura da máxima carga aplicada ao mesmo, relativa à penetração até a marca de calibração.

Embora não se trate de um instrumento de precisão, as leituras de resistência à compressão simples não confinada, lidas na escala do penetrômetro de bolso diretamente em quilograma por centímetro quadrado ou toneladas por pé quadrado, estão altamente correlacionadas com a consistência dos solos.

3.1.7. Outros equipamentos e materiais

Além dos já citados, outros equipamentos e materiais foram empregados para complementação dos ensaios, e para a caracterização do solo, tais como: Proctor, para ensaios de compactação do solo; aparelho de Casagrande, para determinação do limite de liquidez; peneirador automático e jogos de peneiras, para análise granulométrica e estabilidade mecânica dos agregados do solo; extrator de corpos de prova; densímetros; termômetros, picnômetros; balanças; estufa; bomba de vácuo; cronômetro; aquecedor de banho maria e vidrarias diversas.

3.2. Métodos

3.2.1. Delineamento experimental

Os ensaios foram desenvolvidos num delineamento experimental em fatorial (2^3) com 8 tratamentos mais a testemu-

nha, com 4 repetições. Os tratamentos foram designados por $U_1A_1V_1$; $U_1A_1V_2$; $U_1A_2V_1$; $U_1A_2V_2$; $U_2A_1V_1$; $U_2A_1V_2$; $U_2A_2V_1$ e $U_2A_2V_2$, onde U_1 e U_2 são teores de umidade do solo; A_1 e A_2 , ângulos verticais de regulagem dos discos; V_1 e V_2 , velocidades de deslocamento do arado durante o trabalho de aração. Cada parcela tinha 20 metros de comprimento.

3.2.2. Ensaio preliminares e definitivos

Os ensaios preliminares foram feitos com dois objetivos: primeiro, visando regular o arado para uma profundidade de corte de 20 cm aproximadamente; segundo, selecionar duas velocidades a serem usadas nos ensaios definitivos. Foram marcadas distâncias de 20 metros e, com o trator e arado em operação, cronometrou-se o tempo para se percorrer aquela distância a diferentes posições da alavanca de marcha e rpm do motor.

Na execução dos ensaios as parcelas foram dispostas em nível. Para os ensaios definitivos, de início foram feitos alguns sulcos com o arado para servirem de guia e dar orientação para a execução dos sulcos de tratamentos. Os tempos gastos para percorrer as distâncias em cada parcela foram cronometrados, para aferição das velocidades. As duas velocidades usadas nos ensaios foram: $V_1 = 2,73 \text{ km/h} \pm 0,05$ (C.V. = 1,83%) e $V_2 = 6,64 \text{ km/h} \pm 0,15$ (C.V. = 2,26%).

3.2.3. Umidade do Solo

A determinação da umidade do solo na qual a aração foi feita, consistiu na coleta de uma amostra para cada parcela à profundidade de 0-20 cm, totalizando 16 determinações para cada teor de umidade. Cada coleta era feita no perfil do sulco deixado pelo arado, tentando-se conseguir uma a

3.2.6. Peso específico natural

O peso específico natural (γ) definido como uma relação entre peso e volume de uma amostra de solo foi calculado diretamente a partir dos dados fornecidos pelo aparelho "Eley Volumeter".

3.2.7. Índice de vazios e porosidade

O índice de vazios (e) e a porosidade (n) do solo foram calculados a partir de fórmulas desenvolvidas em mecânica dos solos, e deduzidas de relações entre índices físicos, assim sendo:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} - 1 \qquad n = \frac{e}{1 + e} \quad (\%)$$

3.2.8. Grau de saturação

O grau de saturação do solo foi calculado através da seguinte fórmula desenvolvida na teoria de mecânica dos solos:

$$S = \frac{\gamma_s \cdot u}{e \cdot \gamma_a}$$

onde, u = teor de umidade determinado a partir de amostras fornecidas pelo "Eley Volumeter"

γ_a = peso específico da água, considerado constante e igual a 1 g/cm³.

mostragem representativa de 0-20 cm. O método empregado na determinação do teor de umidade foi o gravimétrico padrão, com secagem em estufa a $105 - 110^{\circ}\text{C}$, até peso constante. A umidade do solo define a relação entre o peso de água e o peso de solo seco.

Por ocasião da realização dos ensaios o solo apresentava as seguintes umidades médias: $U_1 = 29,20\% \pm 2,06$ (C.V. = 7,05%) e $U_2 = 27,20\% \pm 1,91$ (C.V. = 7,02%).

3.2.4. Peso específico aparente seco

O peso específico aparente seco (γ_o), referente aos 2 cm superficiais da soleira central do sulco de aração foi determinado com o auxílio da balança hidrostática utilizando-se, para isso de torrões capeados com parafina.

As determinações do peso específico aparente seco (γ_o), logo abaixo dos 2 cm superficiais já considerados, foram feitas a partir de amostra tomadas com o "Eley Volumeter", de uma camada de 5 cm compreendendo um volume amostrado de 20 cm^3 . Estas amostras foram colocadas em estufa para secagem a $105 - 110^{\circ}\text{C}$, após o que se determinava o peso que, relacionado com o volume já conhecido (20 cm^3), permitia calcular o peso específico aparente seco.

Todas as determinações foram conduzidas com 4 repetições.

3.2.5. Peso específico dos sólidos

O peso específico dos sólidos (γ_s) foi determinado pelo método do picnômetro; conforme descrito por NOGUEIRA (1973), empregando-se o material que passa na peneira nº 10 (2,00 mm). Igualmente foram feitas 4 repetições.

3.2.9. Resistência do solo a penetração

A determinação da resistência do solo à penetração foi feita com o penetrômetro de anel. Na região da soleira central do sulco, com o penetrômetro em posição vertical, aplicava-se uma pressão manual até que todo o cone penetrasse no solo. Em seguida lia-se em seu marcador o valor da carga máxima aplicada, em libras; com a média das leituras e com o auxílio do gráfico de calibração do aparelho, procedia-se à correção dos valores, transformando-os em kg/cm^2 .

3.2.10. Resistência a compressão simples não confinada

Da mesma maneira descrita no ítem anterior, foram feitas leituras com o penetrômetro de bolso na região da soleira central do sulco a fim de determinar o valor da resistência simples não confinada. Foram feitas várias leituras para cada ponto das quais tomou-se a média, expressas diretamente em kg/cm^2 .

3.2.11. Compactação do solo

Para o traçado da curva de compactação do solo empregou-se o ensaio normal de Proctor, padronizado pela ABNT, em seu Método Brasileiro MB-33, determinando-se o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{o \text{ max}}$) e a umidade ótima correspondente (h_{ot}).

3.2.12. Peneiramento a seco

De cada parcela foi coletada uma amostra de aproximadamente 3 quilos, da qual uma determinada porção de solo era passada em peneira nº 4 (4,76 mm). Da amostra peneirada, tomavam-se 200 g para peneiramento a seco, durante 10 minutos em peneirador automático dotado de reostato, a 50 oscilações por minuto, passando através de um jogo de peneiras, dispostas em sentido decrescente da abertura de suas malhas, a saber, peneiras nº 10 (2,00 mm), nº 18 (1,00 mm), nº 35 (0,50mm), nº 60 (0,25 mm), nº 140 (0,105 mm) e nº 270 (0,053 mm). Da fração retida em cada peneira era anotado o peso.

Logo após a primeira peneiração, a amostra era recomposta e novamente submetida ao processo de peneiramento - pela segunda vez, no mesmo esquema da primeira, e também registrado o peso da fração retida em cada peneira. Tendo-se ainda mais uma vez recomposta a amostra, pela terceira vez a operação foi repetida de maneira semelhante às anteriores, para se ter uma idéia da resistência relativa do solo à demolição mecânica.

Simultaneamente e no início da operação, tomavam-se 3 sub-amostras da amostra com fração menor que 4,76 mm, para a determinação da umidade em estufa a 105 - 110°C até peso constante, constituindo esta a umidade na qual o solo foi peneirado.

Com o uso desta técnica de peneiramento a seco foram feitas, simultaneamente, as determinações da distribuição em tamanho e a estabilidade mecânica dos agregados, conforme proposta por CHEPIL (1962).

O peneiramento a seco tem seus resultados expressos em porcentagem, em peso seco, sendo somente a porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60 (0,25 mm) empregada para comparar efeitos dos tratamentos que, segundo Tiulin, citado por BAYER (1966), é a fração responsável pela estabilidade es

trutural do solo.

O módulo de finura dos agregados do solo foi também determinado, a partir dos dados do peneiramento a seco, sendo utilizado para avaliar e comparar o efeito dos tratamentos sobre a agregação. O cálculo do módulo de finura foi feito dividindo-se a somatória das porcentagens acumuladas nas peneiras consideradas por 100.

3.2.13. Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi feita conforme o Método Brasileiro MB-32, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), combinando-se as análises por sedimentação e por peneiramento. Para esta análise foi usado solo passado na peneira nº 10 (fração menor que 2,00 mm), sendo que o diâmetro das partículas no ensaio de sedimentação foi calculado pelo nomograma de Casagrande.

Os resultados da análise granulométrica são expressos através de uma curva de distribuição granulométrica que se acha representada na Figura 1, onde cada ponto representa média de 4 repetições.

3.2.14. Limites de consistência

O limite de liquidez do solo foi determinado utilizando-se o aparelho de Casagrande e conforme o Método Brasileiro MB-30, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O limite de plasticidade foi determinado de acordo com o Método Brasileiro MB-31, também da ABNT. Ambas as determinações dos limites de consistência foram feitas na fração de solo que passou na peneira nº 40 (0,42 mm), com 3 repetições.

FIGURA 1 - Curva de distribuição granulométrica do solo de classe textural argila arenosa.

3.2.15. Análise estatística

Aos dados fornecidos pelo experimento foi aplicada uma análise estatística para avaliar o efeito dos tratamentos. Todavia além da análise paramétrica normal aplicou-se aos dados dos QUADROS 8 e 9 uma análise não paramétrica (teste de Friedman), devido a própria natureza dos valores.

O teste de Friedman foi complementado com o emprego das comparações múltiplas correspondentes para localizar as diferenças significativas ocorridas entre pares de tratamentos. Este teste segundo CAMPOS (1976) pode ser considerado como um teste F, substituto das análises paramétricas de um delineamento em blocos casualizados.

A tabela que dá os níveis mínimos de significância estatística aplicados aos dados referentes a porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60 (0,25 mm) e ao módulo de finura acha-se registrada no Apêndice.

4. RESULTADOS

Os valores do peso específico aparente seco (γ_o) do solo obtidos dos ensaios de campo utilizando-se o método do torrão impermeabilizado, estão apresentados no QUADRO 2, onde cada valor de repetição constitui a média de duas determinações. No QUADRO 3, encontram-se os valores do peso específico natural do solo (γ) e do peso específico aparente seco (γ_o), calculados a partir de amostras coletadas no campo com auxílio do aparelho "Eley Volumeter", sendo as repetições também médias de duas determinações.

No QUADRO 4 encontram-se os valores calculados para o índice de vazios (e) e porosidade total do solo (n).

O grau de saturação do solo (S) tem seus valores apresentados no QUADRO 5.

Os dados obtidos no campo através de medições com o penetômetro de anel encontram-se no QUADRO 6, enquanto que os dados referentes ao penetômetro de bolso estão relatados no QUADRO 7.

Os valores encontrados para a porcentagem de agregados do solo em peneira nº 60 e para o módulo de finura dos agregados estão apresentados no QUADRO 8 e 9, respectivamente.

QUADRO 2 - Valores dos dados de peso específico aparente seco (γ_o), em g/cm³, determinados pelo método do torrão impermeabilizado, na camada superficial de 2 cm da soleira do sulco central de aração.

Tratamentos	REPETIÇÕES			
	1	2	3	4
Testemunha	1,34	1,22	1,28	1,14
U ₁ A ₁ V ₁	1,08	1,33	1,29	1,27
U ₁ A ₁ V ₂	1,15	1,32	1,27	1,25
U ₁ A ₂ V ₁	1,31	1,22	1,25	1,26
U ₁ A ₂ V ₂	1,31	1,18	1,18	1,19
U ₂ A ₁ V ₁	1,06	1,26	1,25	1,25
U ₂ A ₁ V ₂	1,16	1,19	1,22	1,16
U ₂ A ₂ V ₁	1,25	1,26	1,14	1,16
U ₂ A ₂ V ₂	1,30	1,27	1,10	1,11

QUADRO 3 - Valores do peso específico natural (γ) e do peso específico aparente seco (γ_o) do solo, em g/cm³, calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter".

Tratamentos	Peso específico natural (γ)				Peso específico aparente (γ_o)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Testemunha	1,72	1,72	1,77	1,78	1,36	1,34	1,35	1,35
U ₁ A ₁ V ₁	1,61	1,86	1,88	1,87	1,21	1,43	1,44	1,44
U ₁ A ₁ V ₂	1,75	1,87	1,75	1,79	1,35	1,43	1,35	1,40
U ₁ A ₂ V ₁	1,89	1,75	1,91	2,01	1,43	1,38	1,47	1,56
U ₁ A ₂ V ₂	1,75	1,83	1,82	1,88	1,33	1,40	1,42	1,41
U ₂ A ₁ V ₁	1,66	1,89	1,84	1,90	1,28	1,47	1,44	1,48
U ₂ A ₁ V ₂	1,93	1,80	1,78	1,76	1,48	1,39	1,40	1,39
U ₂ A ₂ V ₁	1,74	1,66	1,83	1,84	1,34	1,32	1,40	1,41
U ₂ A ₂ V ₂	1,92	1,77	1,88	1,70	1,48	1,37	1,45	1,34

QUADRO 4 - Valores do índice de vazios (e) e da porosidade (n) no solo, calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter".

Tratamentos	Índices de vazios (e)				Porosidade (n), em %			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Testemunha	1,19	1,22	1,21	1,21	54,36	55,03	54,70	54,70
U ₁ A ₁ V ₁	1,46	1,09	1,07	1,08	59,40	52,01	51,68	51,68
U ₁ A ₁ V ₂	1,22	1,08	1,22	1,44	54,70	52,01	54,70	53,02
U ₁ A ₂ V ₁	1,09	1,19	1,03	0,91	52,01	53,69	50,67	47,65
U ₁ A ₂ V ₂	1,24	1,14	1,11	1,12	55,37	53,02	52,35	52,68
U ₂ A ₁ V ₁	1,33	1,03	1,07	1,03	57,05	50,67	51,68	50,34
U ₂ A ₁ V ₂	1,03	1,17	1,13	1,16	50,34	53,36	53,02	53,36
U ₂ A ₂ V ₁	1,24	1,27	1,13	1,12	55,03	55,70	53,02	52,68
U ₂ A ₂ V ₂	1,02	1,16	1,06	1,23	50,34	54,03	51,34	55,03

QUADRO 5 - Valores do grau de saturação (S) do solo, em %, calculados a partir de amostras coletadas com o aparelho "Eley Volumeter".

Tratamentos	REPETIÇÕES			
	1	2	3	4
Testemunha	67,04	69,39	76,69	78,22
U ₁ A ₁ V ₁	67,40	82,19	85,28	84,61
U ₁ A ₁ V ₂	74,26	84,14	72,94	75,08
U ₁ A ₂ V ₁	87,58	67,98	87,02	94,77
U ₁ A ₂ V ₂	75,82	79,05	77,33	88,28
U ₂ A ₁ V ₁	67,29	82,94	78,51	82,74
U ₂ A ₁ V ₂	89,30	76,49	73,08	70,15
U ₂ A ₂ V ₁	73,04	60,50	79,10	81,68
U ₂ A ₂ V ₂	87,78	77,14	83,22	65,73

QUADRO 6 - Valores da resistência à penetração (ou capacidade de suporte), em kg/cm^2 , determinados pelo penetrômetro de anel.

Tratamentos	REPETIÇÕES			
	1	2	3	4
Testemunha	6,819	7,065	9,491	8,260
$U_1 A_1 V_1$	3,198	5,589	5,308	5,294
$U_1 A_1 V_2$	5,202	6,960	5,273	3,761
$U_1 A_2 V_1$	4,183	6,186	6,362	9,104
$U_1 A_2 V_2$	5,554	6,222	6,222	6,573
$U_2 A_1 V_1$	3,410	8,366	10,756	10,404
$U_2 A_1 V_2$	6,608	9,139	6,819	7,170
$U_2 A_2 V_1$	5,835	6,257	5,905	7,522
$U_2 A_2 V_2$	10,264	7,592	7,170	7,417

QUADRO 7 - Valores da resistência do solo à compressão sim
ples não confinada, em kg/cm^2 , determinados pelo
penetrômetro de bolso.

Trata- mentos	REPETIÇÕES			
	1	2	3	4
Testemunha	2,65	2,62	3,00	2,80
U ₁ A ₁ V ₁	1,33	1,79	2,02	2,35
U ₁ A ₁ V ₂	1,30	1,86	2,40	2,25
U ₁ A ₂ V ₁	1,21	1,61	2,13	2,29
U ₁ A ₂ V ₂	1,65	1,49	1,75	1,70
U ₂ A ₁ V ₁	1,46	2,46	2,43	2,63
U ₂ A ₁ V ₂	1,78	2,24	2,97	2,68
U ₂ A ₂ V ₁	1,81	1,83	1,63	2,10
U ₂ A ₂ V ₂	3,12	2,58	1,78	1,67

QUADRO 8 - Valores de porcentagem acumulada de agregados do solo, em peneira nº 60 (0,25 mm), obtidos através do peneiramento a seco.

Tratamentos		REPETIÇÕES			
		1	2	3	4
Testemunha	A	60,11	59,45	63,16	72,42
	B	62,26	63,10	65,27	73,84
	C	62,68	63,42	65,91	73,95
	$\bar{x}$	61,68	61,99	64,78	73,40
$U_1 A_1 V_1$	A	66,46	79,57	80,22	84,48
	B	66,95	79,36	80,62	84,19
	C	65,74	79,18	79,77	83,89
	$\bar{x}$	66,38	79,37	80,20	84,19
$U_1 A_1 V_2$	A	75,05	69,15	78,23	77,46
	B	73,34	68,62	77,09	76,52
	C	73,80	68,47	76,72	76,49
	$\bar{x}$	74,06	68,75	77,35	76,82
$U_1 A_2 V_1$	A	73,10	67,54	76,59	75,06
	B	72,80	67,87	75,98	74,29
	C	73,79	67,19	75,08	74,51
	$\bar{x}$	73,23	67,53	75,88	74,62
$U_1 A_2 V_2$	A	72,46	62,50	83,50	75,25
	B	72,13	61,50	82,56	75,35
	C	71,66	61,16	82,22	74,05
	$\bar{x}$	72,08	61,72	82,76	74,88
$U_2 A_1 V_1$	A	77,61	76,61	74,68	72,19
	B	76,68	75,96	73,80	71,08
	C	75,78	75,33	71,21	70,55
	$\bar{x}$	76,69	75,97	73,23	71,27
$U_2 A_1 V_2$	A	72,41	76,41	72,02	73,04
	B	71,52	75,62	71,87	73,10
	C	70,99	75,49	71,50	72,88
	$\bar{x}$	71,64	75,84	71,80	73,01
$U_2 A_2 V_1$	A	79,20	70,95	69,13	72,07
	B	77,61	70,95	69,36	71,00
	C	77,08	70,44	69,00	70,60
	$\bar{x}$	77,96	70,78	69,16	71,22
$U_2 A_2 V_2$	A	79,99	75,54	78,24	70,98
	B	78,83	74,42	77,90	70,59
	C	78,37	74,00	77,00	70,71
	$\bar{x}$	79,06	74,65	77,71	70,76

A = primeira peneiração da amostra de solo

B = segunda peneiração da amostra recomposta

C = terceira peneiração da amostra novamente recomposta

$\bar{x}$ = média

QUADRO 9 - Valores do módulo de finura dos agregados do solo, obtidos através de peneiramento a seco.

Tratamentos		REPETIÇÕES			
		1	2	3	4
Testemunha	A	3,07	3,04	3,22	3,64
	B	3,15	3,20	3,30	3,69
	C	3,16	3,21	3,32	3,69
	$\bar{x}$	3,13	3,15	3,28	3,67
$U_1 A_1 V_1$	A	3,28	3,92	4,01	4,21
	B	3,31	3,90	3,96	4,18
	C	3,27	3,88	3,91	4,15
	$\bar{x}$	3,29	3,90	3,96	4,18
$U_1 A_1 V_2$	A	3,63	3,44	3,87	3,78
	B	3,59	3,42	3,82	3,72
	C	3,58	3,40	3,79	3,71
	$\bar{x}$	3,60	3,42	3,83	3,74
$U_1 A_2 V_1$	A	3,57	3,26	3,80	3,64
	B	3,53	3,27	3,76	3,61
	C	3,58	3,26	3,71	3,60
	$\bar{x}$	3,56	3,26	3,76	3,62
$U_1 A_2 V_2$	A	3,60	3,19	4,18	3,68
	B	3,58	3,16	4,14	3,66
	C	3,56	3,14	4,12	3,60
	$\bar{x}$	3,58	3,16	4,15	3,65
$U_2 A_1 V_1$	A	3,75	3,78	3,74	3,58
	B	3,73	3,75	3,69	3,52
	C	3,68	3,72	3,64	3,49
	$\bar{x}$	3,72	3,75	3,69	3,53
$U_2 A_1 V_2$	A	3,60	3,58	3,62	3,63
	B	3,55	3,79	3,61	3,62
	C	3,53	3,70	3,58	3,60
	$\bar{x}$	3,56	3,69	3,60	3,62
$U_2 A_2 V_1$	A	3,70	3,67	3,49	3,59
	B	3,64	3,67	3,50	3,54
	C	3,61	3,64	3,48	3,51
	$\bar{x}$	3,65	3,66	3,49	3,55
$U_2 A_2 V_2$	A	3,99	3,73	3,73	3,49
	B	3,94	3,68	3,71	3,44
	C	3,91	3,66	3,67	3,43
	$\bar{x}$	3,95	3,69	3,70	3,45

A = primeira peneiração da amostra de solo

B = segunda peneiração da amostra recomposta

C = terceira peneiração da amostra novamente recomposta

$\bar{x}$ = média

5. DISCUSSÃO

A análise da variância aplicada aos dados obtidos para o peso específico aparente seco pelo método do torção impermeabilizado, está registrado no QUADRO 10, no qual pode-se constatar que não houve diferença significativa entre os tratamentos. O mesmo ocorreu com relação às análises da variância dos dados referentes ao peso específico natural do solo e ao peso específico aparente seco, calculados a partir dos dados fornecidos pelo aparelho "Eley Volumeter", conforme apresentado no QUADRO 11.

Uma vez que os valores do índice de vazios, porosidade do solo e grau de saturação foram calculados a partir de fórmulas cuja única variável era o peso específico aparente seco, as análises de variância, aplicadas aos parâmetros aqui considerados, igualmente, não mostraram diferenças significativas, como se observa nos QUADROS 12 e 13.

Quando se compararam as médias dos tratamentos com a média da testemunha, pelo teste t, cujos valores estão inseridos no QUADRO 14, foram constatadas diferenças significativas para o peso específico natural, peso específico aparente seco, índice de vazios e porosidade do solo, obtidos a partir de amostras fornecidas pelo aparelho "Eley Volumeter". Isto quer dizer que, isoladamente ou associados entre si, os

QUADRO 10 - Valores de F e CV obtidos pelas análises da va
riância dos dados referentes ao peso específico
aparente seco do solo (γ_o), obtidos pelo método
do torrão impermeabilizado (TI).

Causa da Variação	GL	F
Umidade (U)	1	2,71
Ângulo (A)	1	0,00212
Velocidade (V)	1	0,410
Interação U x A	1	0,0523
Interação U x V	1	0,00836
Interação A x V	1	0,102
Interação U x A x V	1	0,354
Resíduo	24	
Total	31	
C.V.		6,34%

QUADRO 11 - Valores de F e CV obtidos pelas análises da variância dos dados referentes ao peso específico natural do solo (γ), e dos dados de peso específico aparente seco (γ_o) calculado.

Causa da Variação	GL	F	
		γ	γ_o
Umidade (U)	1	0,365	0,00259
Ângulo (A)	1	0,205	0,124
Velocidade (V)	1	0,0913	0,0913
Interação U x A	1	1,65	2,13
Interação U x V	1	0,964	1,23
Interação A x V	1	0,0000	0,0912
Interação U x A x V	1	0,690	1,46
Resíduo	24		
Total	31		
C.V.		5,16%	5,00%

QUADRO 12 - Valores de F e CV obtidos pelas análises da variância dos dados referentes ao índice de vazios (e) e porosidade do solo (n).

Causa da Variação	GL	F	
		e	n
Umidade (U)	1	0,000268	0,000783
Ângulo (A)	1	0,160	0,111
Velocidade (V)	1	0,0207	0,0789
Interação U x A	1	1,67	2,09
Interação U x V	1	0,950	1,19
Interação A x V	1	0,0309	0,0787
Interação U x A x V	1	1,44	1,42
Resíduo	24		
Total	31		
C.V.		9,74%	4,41%

QUADRO 13 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao grau de saturação do solo (S).

Causa de Variação	GL	F
Umidade (U)	1	1,34
Ângulo (A)	1	0,170
Velocidade (V)	1	0,0730
Interação U x A	1	0,866
Interação U x V	1	0,978
Interação A x V	1	0,147
Interação U x A x V	1	0,295
Resíduo	24	
Total	31	
C.V.		10,70%

QUADRO 14 - Valores das médias obtidas para a testemunha ($\bar{x}_1$) e das médias dos tratamentos ($\bar{x}_2$), e valores do teste t obtidos pela comparação de ($\bar{x}_1$) e ($\bar{x}_2$) para os diversos parâmetros estudados.

Parâmetros	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	t
Peso específico aparente seco (γ_o) - TI	1,25	1,22	0,56
Peso específico natural do solo (γ)	1,75	1,82	-2,98*
Peso específico aparente seco (γ_o)	1,35	1,40	-40,63*
Índice de vazios (e)	1,21	1,14	35,72*
Porosidade do solo (n)	54,70	52,93	4,08*
Grau de saturação (S)	72,84	78,51	-1,83

tratamentos não provocaram quaisquer alterações físicas no solo ao qual foram aplicados; porém, a intensidade dos efeitos foi suficiente para diferenciá-los da testemunha, em relação à qual o peso específico natural e peso específico aparente seco do solo aumentou, diminuindo, conseqüentemente, o índice de vazios e porosidade do solo.

O QUADRO 15, que mostra a análise da variância aplicada aos valores de resistência a compressão simples não confinada, permite observar diferença significativa apenas para a umidade, quando considerada isoladamente. O mesmo efeito foi observado para os valores de resistência a penetração, apresentados no QUADRO 16.

Embora, conforme PANWAR e SIEMENS (1972), o peso específico aparente seco do solo esteja diretamente relacionado com os valores de resistência ao cisalhamento, no presente trabalho os resultados concordam com SOANE e PIDGEON (1975) que relataram, em alguns casos, independência entre aqueles fatores. Sendo a umidade do solo o único fator que alcançou significância estatística, os resultados concordam ainda com OMETTO (1957), STAFFORD (1979) e VOMOCIL (1957).

A análise estatística, aplicada aos dados referentes à porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), mostrou que houve diferenças entre peneiramento para todos os tratamentos, com exceção daqueles que apresentavam as combinações $U_1 \times A_1$ e $U_1 \times V_1$, localizando-se as diferenças entre a terceira e primeira peneiração.

O confronto dos nove tratamentos mostrou que, além do tratamento $U_2 A_2 V_2$, apenas aqueles que associavam U_1 a A_1 foram diferentes da testemunha. As comparações múltiplas entre os contrastes "tratamentos x controle" localizaram as diferenças significativas entre a testemunha e os tratamentos que apresentavam as combinações $U_1 \times A_1$, $A_1 \times V_1$ e $A_2 \times V_2$. Quando individualmente comparados com a testemunha, os tratamentos não se mostraram estatisticamente diferentes.

No caso de se compararem os efeitos das peneira-

QUADRO 15 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao penetrômetro de anel.

Causa da Variação	GL	F
Umidade (U)	1	9,67 *
Ângulo (A)	1	0,288
Velocidade (V)	1	0,200
Interação U x A	1	2,32
Interação U x V	1	0,111
Interação A x V	1	0,548
Interação U x A x V	1	1,92
Resíduo	24	
Total	31	
C.V.		25,48%

QUADRO 16 - Valores de F e CV obtidos pela análise da variância dos dados referentes ao penetrômetro de bolso.

Causa da Variação	GL	F
Umidade (U)	1	5,23 *
Ângulo (A)	1	1,86
Velocidade (V)	1	0,656
Interação U x A	1	0,0624
Interação U x V	1	1,12
Interação A x V	1	0,00206
Interação U x A x V	1	0,608
Resíduo	24	
Total	31	
C.V.		23,24 %

ções, isoladamente ou em blocos, a terceira peneiração se
mpre foi estatisticamente diferente da primeira.

Do ponto de vista da estabilidade mecânica dos agregados, os tratamentos que menos prejudicaram o solo foram sempre aqueles que combinavam o efeito do maior teor de umidade (29,20%) com o maior ângulo de inclinação do disco (22°), e maior teor de umidade com a menor velocidade (2,73 km/h); to
dos os demais promoviam uma acentuada perda de resistência dos agregados à demolição mecânica logo na terceira peneiração, quando comparada com a primeira.

Comparados com a testemunha, os tratamentos que associavam maior ângulo de inclinação do disco, com menor velocidade de deslocamento, e maior ângulo de inclinação com maior teor de umidade, resultou em menor estabilidade dos agregados; o mesmo aconteceu para os tratamentos que combinavam menor ângulo (15°) e maior velocidade (6,64 km/h).

As informações relativas à estabilidade estrutu
ral dos agregados foram suplementadas com a determinação do módulo de finura; pela análise estatística não paramétrica, a
plicada ao mesmo, verificou-se a ocorrência de diferenças sig
nificativas entre peneirações para todos os tratamentos, com exceção daqueles que apresentavam a combinação $A_1 \times V_1$, localizando-se as diferenças entre a terceira e primeira peneirações.

O confronto dos oito tratamentos permitiu observar que apenas os tratamentos que associavam U_1 a A_1 foram es
taticamente diferentes da testemunha. As comparações múltiplas entre os contrastes "tratamentos x: controle" localiza
ram as diferenças significativas entre a testemunha e os tratamentos que apresentavam as combinações $U_1 \times A_1$ e $A_1 \times V_1$. Comparados individualmente com a testemunha, os tratamentos não se mostraram estatisticamente diferentes.

Quando as peneirações foram analisadas, em blocos ou individualmente, a terceira peneiração diferiu estatis
ticamente da primeira.

Acusando, praticamente, as mesmas diferenças estatísticas e as mesmas tendências verificadas na porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60, permitiu observar e comparar a formação de agregados maiores quanto maior for o seu valor, se mostrou eficiente em avaliar o efeito dos tratamentos sobre a estabilidade mecânica dos agregados do solo. Comparado com a porcentagem acumulada de agregados em peneira de malha igual a 0,25 mm de diâmetro, pode-se afirmar que o Módulo de Finura é o mais completo índice de estabilidade estrutural do solo pois considera a porcentagem acumulada de agregados em uma série de peneiras e não apenas em uma só.

6. CONCLUSÕES

Ressalvadas as condições do presente trabalho , os resultados obtidos, analisados e interpretados estatisticamente, permitiram que se tirassem as seguintes conclusões:

a - Não houve diferença significativa entre tratamentos quando se considerou o seu efeito sobre o peso específico natural, peso específico aparente seco, índice de vazios, porosidade e grau de saturação do solo.

b - Houve diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos para o peso específico natural, peso específico aparente seco, índice de vazios e porosidade do solo.

c - O efeito significativo dos tratamentos sobre a resistência a compressão simples não confinada e resistência a penetração do solo foi devido unicamente ao efeito da umidade.

d - O efeito combinado do maior teor de umidade com o maior ângulo de inclinação do disco e maior teor de umidade com menor velocidade, condicionaram maior estabilidade dos agregados do solo.

e - A combinação do maior ângulo de inclinação

com menor velocidade de deslocamento e maior ângulo de inclinação com maior teor de umidade, além da associação do menor ângulo com maior velocidade, exerceu efeito negativo sobre a estabilidade dos agregados.

7. LITERATURA CITADA

ALLMARAS, R.R., R.E. BURWELL e R.F. HOLT, 1967. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 31:550-556.

BAVER, L.D., 1966. Soil Physics. 3rd Ed. New York, John Wiley and Sons Inc., 489p.

BRASIL, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisas Pedológicas, 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 431p. (Bol. Técnico 30).

BUCKMAN, H.O. e N.C. BRADY, 1968. Natureza e Propriedades dos Solos. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos. 594p.

CAMPOS, H. , 1976. Estatística experimental não paramétrica 2^a ed. Piracicaba, ESALQ/USP, 332p.

- CARVALHO, W.A.; C.R. ESPÍNDOLA e A.A. PACCOLA, 1979. Solos da Estação Experimental "Presidente Médici" - Fazenda Lajeado - Botucatu. Botucatu, F.C.A. UNESP. 35p.
- CHANG, R.K. e B.P. WARKENTIN, 1968. Volume change of compacted clay soil aggregates. Soil Science, Baltimore, 105:106-111.
- CHEPIL, W.S., 1962. A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 26:4-6.
- FLOCKER, W.J., H. TIMN e J.A. VOMOÇIL, 1960. Effect of soil compaction on tomato and potato yields. Agronomy Journal, Madison, 52:345-348.
- MACHADO, J.A., 1976. Efeito dos sistemas de cultivo reduzido e convencional na alteração de algumas propriedades físicas e químicas do solo. Santa Maria, CCR/UFSM, 129p. (Tese de Livre-Docência).
- NOGUEIRA, J.B., 1973. Mecânica dos Solos: ensaios de laboratório. São Carlos, EESC/USP. 150p.
- NICHOLS, M.L. e C.A. REAVES, 1955. Soil structure and consistency in tillage implement design. Agricultural Engineering, St. Joseph, 36:517-522.
- OJENIYI, S.O. e A.R. DEXTER, 1979. Soil factors affecting - the macro-structures produced by tillage. Transactions of the ASAE, St. Joseph 22:339-343.
- OMETTO, D.A., 1957. Influência da umidade do solo no trabalho do arado e no coeficiente de resistência. Piracicaba, ESALQ/USP, 46p. (Tese de Doutorado).

- PANWAR, J.S. e J.C. SIEMENS, 1972. Shear strength and energy of soil failure related to density and moisture. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15:423-427.
- PEARSON, G.A., G.A. JUNG, R.E. SOWLER e D.M. MITCHELL, 1975. Effects of grazing on infiltration rates in water spray fields. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 39:954-957.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, Illinois, 1962. Soil Primer.52p.
- ROBINSON, D.O. e S.B. PAGE , 1951. Soil aggregate stability. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 15:25-29.
- ROGOWSKI, A.S. e D. KIRKHAM ,1962. Moisture, pressure, and formation of water-stable soil aggregates. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 26:213-216.
- ROSEMBERGS, N.S. e N.A. WILLITS, 1962. Yield and physiological response of barley and beans growth in artificially compacted soils. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 26:(1)78-82.
- SCHURMAN, J.J.,1965. Influence of soil density on root development and growth of oats. Plant and Soil, The Hague, 22:352-374.
- SOANE, B.D. e J.D. PIDGEON, 1975. Tillage requirement in relation to soil physical properties. Soil Science, Baltimore, 111:376-384.
- STAFFORD, J.V., 1979. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. Journal of Agriculture Engineering Research, London, 24:41-56.

- SHEAR, G.M. e W.W. MOSCHLER, 1969. Continuous corn by no-tillage and conventional tillage methods: six-year comparison. Agronomy Journal, Madison, 61:524-526.
- THOMPSON, L.M., 1962. El suelo y su fertilidad. Barcelona, - Editorial Reverté S.A., 409p.
- VARGAS, M., 1977. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Ed. USP e Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 509p.
- VOMOCIL, J.A. 1957. Measurement of soil bulk density and penetrability: a review of methods. Advances in Agronomy, New York, 9:159-175.
- VOMOCIL, J.A. e W.J. FLOCKER, 1965. Degradation of structure of Yolo loam by compaction. Proceedings of the Soil Science Society of America, Detroit, 33:11-12.
- WITTSELL, L.E. e J.A. HOBBS, 1965. Soil compaction effects - on field plant growth. Agronomy Journal, Madison, 57:534-537.

A P Ê N D I C E

A P Ê N D I C E

TABELA 1 - Teste de Friedman; níveis mínimos de significância estatística aplicados aos dados referentes à porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60 (0,25 mm) e ao módulo de finura.

1. Limites da distribuição de χ_r^2 no teste de Friedman

$$P_0 (\chi_r^2 \geq \chi_0^2) = \alpha$$

1.1. para $k = 3$ e $n = 4$

$$\chi_0^2 = 6,50 \dots\dots\dots \alpha = 0,042 \text{ (4,2\%)}$$

$$\chi_0^2 = 8,00 \dots\dots\dots \alpha = 0,005 \text{ (0,5\%)}$$

2. Limites da distribuição de χ^2 para grandes amostras

2.1. para $k - 1 = 8$ Graus de Liberdade ($k = 9$)

$$\chi^2 = 15,51 \dots\dots\dots \alpha = 0,050 \text{ (5\%)}$$

$$\chi^2 = 20,09 \dots\dots\dots \alpha = 0,010 \text{ (1\%)}$$

2.2. para $k - 1 = 2$ Graus de Liberdade ($k = 3$)

$$\chi^2 = 5,99 \dots\dots\dots \alpha = 0,050 \text{ (5\%)}$$

$$\chi^2 = 9,21 \dots\dots\dots \alpha = 0,010 \text{ (1\%)}$$

3. Diferença mínima significativa (Δ_1) para as comparações múltiplas envolvendo todos os pares (i, j) de tratamentos

$$P_0 (|R_i - R_j| \geq \Delta_1) = \alpha$$

3.1. para k = 3 e n = 4

$$\Delta_1 = 7 \dots\dots\dots \alpha = 0,042 \text{ (4,2\%)}$$

$$\Delta_1 = 8 \dots\dots\dots \alpha = 0,005 \text{ (0,5\%)}$$

3.2. para k = 9 e n = 12

$$\Delta_1 = 42 \dots\dots\dots \alpha = 0,046 \text{ (4,6\%)}$$

$$\Delta_1 = 44 \dots\dots\dots \alpha = 0,029 \text{ (2,9\%)}$$

$$\Delta_1 = 48 \dots\dots\dots \alpha = 0,009 \text{ (0,9\%)}$$

3.3. para k = 9 e n = 3

$$\Delta_1 = 20 \dots\dots\dots \alpha = 0,041 \text{ (4,1\%)}$$

$$\Delta_1 = 22 \dots\dots\dots \alpha = 0,005 \text{ (0,5\%)}$$

3.4. para k = 3 e n = 9

$$\Delta_1 = 10 \dots\dots\dots \alpha = 0,048 \text{ (4,8\%)}$$

$$\Delta_1 = 11 \dots\dots\dots \alpha = 0,026 \text{ (2,6\%)}$$

$$\Delta_1 = 12 \dots\dots\dots \alpha = 0,013 \text{ (1,3\%)}$$

4. Valores de q_1 para uso nas comparações bilaterais: "tratamentos x testemunha", caso de grandes amostras

4.1. para $k = 9$ e $n = 12$

$$q_1 = 2,65 \dots\dots\dots \alpha = 0,05 \text{ (5\%)...d.m.s.} = 35,5$$

$$q_1 = 3,19 \dots\dots\dots \alpha = 0,01 \text{ (1\%)...d.m.s.} = 42,8$$

onde d.m.s. = diferença mínima significativa

4.2. para $k = 9$ e $n = 3$

$$q_1 = 2,65 \dots\dots\dots \alpha = 0,05 \text{ (5\%)...d.m.s.} = 17,8$$

$$q_1 = 3,19 \dots\dots\dots \alpha = 0,01 \text{ (1\%)...d.m.s.} = 21,4$$

5. Valores de λ_1 (diferença mínima significativa à taxa α) para as comparações bilaterais: "tratamentos x testemunha"

5.1. para $k = 3$ e $n = 9$

$$\lambda_1 = 10 \dots\dots\dots \alpha = 0,042 \text{ (4,2\%)}$$

$$\lambda_1 = 11 \dots\dots\dots \alpha = 0,021 \text{ (2,1\%)}$$

$$\lambda_1 = 12 \dots\dots\dots \alpha = 0,009 \text{ (0,9\%)}$$