DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO ATRAVÉS DO FATIAMENTO DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

SOLANGE DIAS DE MEDEIROS
Engenheira Civil

Orientador: Prof. Dr. RUBENS SCARDUA

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Abril - 1987

Aos meus pais: JOSÉ DIAS e MARIA EVANI
(in memoriam) e
aos meus irmãos,

DEDICO.

Ao meu esposo ALDO
e ao meu filho MARCEL,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e perseverança concedida em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. RUBENS SCARDUA pela segura orientação, dedicação e colaboração oferecidas na execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. VALDEMAR ANTÔNIO DEMÉTRIO pela sugestão do Tema e incentivo nos dois primeiros anos do curso.

Ao Prof. Dr. DÉCIO BARBIN pelas sugestões na elaboração das análises estatísticas.

Ao Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL pelas sugestões e incentivo.

Ao Dr. ELIAS DE FREITAS JÚNIOR pelo incentivo e sugestões na elaboração deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural pela ajuda e amizade, especialmente HÉLIO TOLEDO GOMES pela colaboração nas análises de laboratório.

A Secretaria da Agricultura - RN e a Companhia Integrada de Desenvolvimento Agropecuário - RN, pela oportunidade concedida à participação do curso.

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" pelos ensinamentos ministrados.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa, pela bolsa concedida.

Aos colegas do curso pelo convívio amigo.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a e laboração deste trabalho.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMO.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. Local.....	11
3.2. Solo.....	11
3.3. Preparação das amostras do solo.....	12
3.4. Curvas características de água no solo.....	13
3.4.1. Determinação da curva de retenção, conforme metodologia estabelecida por Richards (1943).....	13
3.4.2. Determinação da curva de retenção usando o fatiamento de amostras centrifugadas.....	14
3.5. Modelo matemático.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. Densidade global (DG).....	26
4.2. Curvas de estabilização de umidade do solo.....	26

Página

4.3. Curvas de retenção da água no solo.....	34
4.3.1. Curvas de retenção da água no solo determinadas nas câmaras de pressão de Richards....	34
4.3.2. Curva de retenção da água no solo determinada na centrífuga.....	37
4.3.3. Relações entre as curvas de retenção da água no solo obtidas pelos métodos estudados.....	43
4.4. Correlação entre os métodos estudados para ambos os solos.....	46
4.4.1. Solo Sertãozinho.....	46
4.4.2. Solo, Luiz de Queiroz.....	50
5. CONCLUSÕES.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
7. APÊNDICE.....	59

LISTA DE TABELAS

TABELA		Página
1	Granulometria e classe textural....	12
2	Densidade global dos solos estudados.....	27
9	Valores médios do teor de água do solo em função do tempo e da velocidade angular de cntrifugação. Solo Luiz de Queiroz.....	58
10	Valores médios do teor de água do solo em função do tempo e da velocidade angular de centrifugação. Solo Sertãozinho.....	59
3	Valores médios do teor de água do solo em função da tensão determinada na câmara de pressão. Solo Luiz de Queiroz, 20-40 cm.....	32

TABELA

Página

4	Valores médios do teor de água do solo em função da tensão determinada na câmara de pressão. Solo Sertãozinho - 20-40 cm.....	33
5	Valores médios do teor de água do solo em função do potencial médio calculados por camada, para diferentes valores de velocidade angular em uma centrífuga com $r_0 = 5,3$ cm. Para o solo Luiz de Queiroz.....	36
6	Valores médios do teor de água do solo em função do potencial matricial médio calculados por camada, para diferentes valores de velocidade angular em uma centrífuga com $r_0 = 5,3$ cm. Para o solo Sertãozinho.....	37
7	Análise da variância para os métodos estudados. Para o solo Sertãozinho...	45

TABELA

Página

9	Análise da variância para os métodos estudados. Para o solo Luiz de Queiroz.....	45
11	Valores da tensão da água do solo, umidades % em peso e % em volume, determinada na câmara de pressão. Solo Luiz de Queiroz, 20-40 cm.....	60
12	Valores da tensão da água do solo, umidades % em peso e % em volume, determinada na câmara de pressão. Solo Sertãozinho, 20-40 cm.....	61
13	Valores da tensão da água do solo, umidades % em peso e % em volume, determinada na centrífuga. Solo Luiz de Queiroz, 20-40 cm.....	62
14	Valores da tensão da água do solo, umidades % em peso e % em volume, determinada na centrífuga. Solo Sertãozinho, 20-40 cm.....	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Centrífuga (Model M.E.).....	15
2	Esquema de distribuição das amostras no tambor da centrífuga e as respec- tivas peças de madeira.....	16
3	Extrator hidráulico, utilizado no fa- tiamento das amostras.....	19
4	Representação esquemática de uma a- mostra na centrífuga.....	22
5	Curvas de estabilização de umidade em amostras do LVM submetidas à cen- trifugação.....	28
6	Curvas de estabilização de umidade em amostras do TRE submetidas à cen- trifugação.....	29
7	Curva de retenção de água no Solo. Solo Sertãozinho (20-40cm)	34

FIGURA

Página

8	Curva de retenção da água no solo. Solo Luiz de Queiroz (20-40 cm)	35
9	Curva de retenção da água no solo determinada na centrífuga. Solo Luiz de Queiroz	39
10	Curva de retenção da água no solo determinada na centrífuga. Solo Sertãozinho	40
11	Curvas de retenção da água no solo pelos métodos da centrífuga e das câmaras de pressão - Solo Luiz de Queiroz (20-40cm)	42
12	Curvas de retenção da água no solo, pelos métodos da centrífuga e das câmaras de pressão - Solo Sertãozinho (20-40 cm)	43
13	Relação das umidades entre os métodos estudados para o solo Sertãozinho (LVm)	46

FIGURA

Página

14	Intervalo de confiança para a regressão linear. Solo Sertãozinho.....	47
15	Relação das unidades entre os métodos estudados para o solo Luiz de Queiroz TRE.....	49
16	Intervalo de confiança para a regressão linear. Solo Luiz de Queiroz.....	50

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE AMOSTRAS SUBMETIDAS A CENTRIFUGAÇÃO DO FATIAMENTO

Autor: SOLANGE DIAS DE MEDEIROS

Orientador: Prof. Dr. RUBENS SCARDUA

RESUMO

No presente trabalho procurou-se avaliar a funcionalidade do método de fatiamento para a determinação da curva característica da água do solo, tendo como comparação o método tradicional pelo uso de placas em câmaras de pressão de RICHARDS. Foram usados dois solos do Município de Piracicaba, Terra Roxa estruturada (TRE) e Latossolo Vermelho Amarelo (LVm) com características físicas e morfológicas contrastantes, com amostras à profundidade de 40cm.

Amostras dos solos foram submetidas a centrifugação para determinar a umidade em função do tempo e verificar o tempo de estabilização de umidade para ambos os solos em cinco velocidades angulares e seis intervalos de tempo. Foi verificado que no solo Sertãozinho (LVm) o tempo de equilíbrio ocorreu aos 180 minutos e no solo Luiz de Queiroz aos 240 minutos. Após o equilíbrio, amostras de 6cm de espessura foram fatiadas a cada 2cm de espessura. Foi determinado o teor de água de cada fatia e correlacionada com o potencial correspondente

para estabelecer a curva de retenção da água no solo. As curvas da água no solo determinadas em cada método, foram analisadas pelo estudo de regressão simples e feitas as comparações pela análise de correlação. Os resultados mostraram uma boa correlação significativa entre os métodos para ambos os solos, o que vem demonstrar a validade do fatiamento.

DETERMINACION OF THE SOIL MOISTURE RETENTION CURVE
THROUGH THE USE OF A SLICING METHOD APPLIED
TO CENTIFUGED SOIL CORES

AUTHOR: Solange Dias de Medeiros

ADVISER: Prof. Dr. Rubens Scardua

SUMMARY

This presente work was designed to asses the slicing method for determination of the soil moisture retention curve, as compared to the traditional method using the Richards' pressure plate apparatus.

Two types of soils from Piracicaba county were used. A Latossolo Vermelho-Amarelo and a Terra Roxa Estruturada with contrasting physical and morphological characteristics, sampled to 40cm depth.

Soil samples were submitted to centrifugation in order to determine moisture as a function of time to asses the moisture stabilization for both soils, at five angular velocities and six time intervals. It was determined that in the sandy-loam soil, the equilibrium time occured at 180 minutes and in the clay-loam soil at 240 minutes.

After equilibration, the 6 cm long cores were split into three slices 2 cm long. The water content of each slice was determined and correlated to the corresponding

potencial to stablsh the soil moisture retention curve.

The soil moisture retention curves determined for this method and by the pressure plate were analysed by the single regression method and compared by correlation analysis. The results showed good correlation between the methods for both soils, which indicates the validity of the slicing method.

1. INTRODUÇÃO

O homem tem procurado constantemente aumentar a produção de alimentos por meio da incorporação de novas áreas ao sistema de produção ou aumentar a produtividade das áreas já incorporadas. A última alternativa, que depende do desenvolvimento de novas técnicas e aperfeiçoamento das existentes, tem recebido mais atenção atualmente. Das técnicas já em uso, a irrigação é uma que vem sendo pesquisada, frequentemente, visando encontrar maneiras mais adequadas de utilização da água, que ao atingir a superfície do solo, se infiltra e se redistribui no perfil do solo, proporcionando a umidade necessária ao desenvolvimento das culturas.

Considerável atenção tem sido dada ao fator água no estudo do sistema solo-água-planta, pois a umidade do solo é um dos fatores que mais contribuem para a produtividade das culturas. A caracterização da água no solo pode ser feita com o estado de energia com que é retida pelo solo. Este estado energético, que caracteriza água no solo, é constituído por diferentes formas e quantidades de energia. A física reconhece duas formas principais de energia: a cinética e a potencial, contudo em termos da dinâmica da água no solo, a primeira forma de energia é des

prezível uma vez que a velocidade d'água no solo é muito pequena na maioria dos casos. A energia potencial que é dada em função da posição e/ou condição interna d'água no ponto considerado, é de grande importância na caracterização do seu estado energético.

A fim de se dar suporte técnico aos projetos de irrigação é necessário que se conheça adequadamente as características físicas do solo que influem no manejo da irrigação. Dentre estas características, aquelas que determinam a curva de retenção da água no solo, possuem uma importância primordial por servirem de base para o cálculo da quantidade de água a ser aplicada, bem como o intervalo entre irrigações. A curva de retenção tem grande significação prática, mostra a relação retenção-energia, de fundamental importância nos estudos de movimento da água nos solos e sua absorção pelos vegetais.

Tradicionalmente a determinação da curva característica de umidade do solo é feita com câmaras de pressão de Richards.

Recentemente FREITAS JR. e SILVA (1984), estudaram o fatiamento de amostras centrifugadas, para determinação da curva de retenção da água no solo. Este método do ponto de vista prático, permite trabalhar com equipamentos simples e com alta produtividade.

Em face dos aspectos discutidos o presente trabalho tem por objetivo avaliar a funcionalidade do fatiamento de amostras centrifugadas, para determinação da curva de retenção da água no solo, comparando-o com o método tradicional das câmaras de pressão de Richards.

2. REVISAO DE LITERATURA

A água no solo encontra-se num determinado estado de energia, definido pelo que chamamos potencial total de água no solo, que é a somatória de diversos componentes conhecidos como gravitacional, osmótico, de pressão e matricial. Em condições isotérmicas e solo não saturado, os potenciais de gravidade e matricial são os mais importantes. O potencial gravitacional é conseqüência da posição de um ponto em relação a um plano de referência, e o matricial é o resultado de forças capilares e de adsorção que surgem em razão da interação entre a água e a matriz do solo (REICHARDT, 1975).

SCARDUA (1984), diz que o potencial gravitacional assume maior importância quando o solo está próximo a saturação, porém, a baixos teores de água os potenciais osmótico e matricial são efetivamente de maior interesse.

O potencial matricial de uma amostra pode ser determinado experimentalmente através da câmara de pressão de Richards e funil de placa porosa (LIBARDI, 1984). O potencial osmótico é determinado pela equação de Van't Holf no entanto REICHARDT (1978) o considera desprezível para solos não salinos.

Os pesquisadores que se dedicam ao estudo ligados aos aspectos da retenção de água no solo, tentam estabelecer relações entre a água retida no solo a um dado potencial e os fatores da mineralogia das partículas, como tamanho e natureza bem como o teor de matéria orgânica. GROHMAN & MEDINA (1962) afirmam que a quantidade de água retida pelo solo é dependente do teor e natureza da fração argila e da porcentagem de matéria orgânica. Segundo SCARDUA (1972), a água retida a sucções relativamente baixas entre 0 a 1 bar, depende primeiramente do efeito da capilaridade e da distribuição do tamanho do poro e, sendo afetado pela estrutura do solo. Em tensões mais elevadas, a retenção de água é devida a adsorção sendo influenciada mais pela textura e superfície específica do material do solo do que pela estrutura.

Reconhece-se dois pontos clássicos de umidade do solo: capacidade de campo e ponto de murchamento permanente que são de alta importância na prática de irrigação. A capacidade de campo corresponde à umidade atingida, sob condições de campo, por solos permeáveis, de textura e estrutura uniforme, inicialmente saturados, após sua drenagem livre ter ocorrido. COLMAN (1947), relatou que a utilidade da capacidade de campo como uma característica do solo aliada à dificuldade de sua determinação direta, proporciona uma relação que pode ser facilmente determinada em laboratório. Segundo Colman, um pequeno bloco de solo inicialmente saturado, drenado em uma placa porosa à tensão de $1/3$

de atmosfera, a umidade resultante pode ser relacionada empiricamente com a capacidade de campo de alguns solos determinada sob condições naturais, e sugere que este procedimento pode ser um meio rápido de determinar indiretamente a capacidade de campo.

O ponto de murchamento permanente refere-se à umidade, no qual o solo não pode suprir as plantas de água em quantidades suficiente para manter a sua turgescência, e ela entra em murcha permanente, este ponto é classicamente considerado como a unidade dos solos correspondentes à tensão de 15 atm (RICHARDS & WEAVER, 1943). Segundo VEIHMAYER & HENDRICKSON (1949) a água compreendida entre estes dois limites, capacidade de campo e ponto de murchamento permanente, é definida como água disponível e nele as atividades biológicas da planta não seriam afetadas.

Embora COLMAN (1947), JAMISON & KROTH (1958) tenham verificado que a tensão de 0,33 atm passa ser usada para indicar indiretamente o valor da capacidade de campo, outros pesquisadores têm usado tensões diferentes com resultados satisfatórios. Assim SALTER & HAWORTH (1961) usaram 0,05 atm, e MACLEAN & YAGER (1972) os valores de 0,05 e 0,1 atm como valores mais adequados. Sabe-se no entanto que a quantidade de água que permanece no solo é uma função do tamanho e do volume dos poros e portanto varia de acordo com a natureza do solo. Esta função é usualmente medida experimentalmente e é representada pela curva característica de água no solo (WINTER, 1976).

Assim, solos com diferentes aspectos de tamanho e natureza das partículas tem curvas características diferentes.

A primeira tentativa utilizando a centrifuga em estudos de umidade do solo ocorreu com a introdução do conceito de umidade equivalente. BRIGGS & MCLANE (1907), afirmaram que uma base satisfatória para se comparar a capacidade de retenção dos solos, poderia ser estabelecida pela quantidade de água que diferentes solos são capazes de reter quando esse solo está submetido a uma força constante, suficientemente em magnitude para remover a água retida nos espaços capilares maiores. Esses autores definem a umidade equivalente como a porcentagem de água retida por um solo, quando a umidade é reduzida por meio de uma força centrífuga constante, até que ele entre num estado de equilíbrio capilar com a força aplicada.

Posteriormente, BRIGGS & MCLANE (1910) padronizaram a definição de umidade equivalente propondo uma quantidade de solo de 1 cm de espessura submetida à força de 1.000 vezes a gravidade durante 40 minutos a uma temperatura de 20°C. A força centrífuga (f) expressa em dinas, agindo sobre um elemento de água (dm), é descrita como:

$$f = 4\pi^2 n^2 r \cdot dm$$

onde: n = número de rotações por segundo;

r = distância do eixo ao meio da amostra (cm);

dm = é a massa de água infinitesimal em gramas.

VEIHMAYER et alii (1924) e THOMAS e HARRIS (1925), no estudo da determinação de umidade equivalente através da centrífuga, questionaram quanto a exatidão do método. Os autores verificaram que amostras mais finas de silte retinham menos água do que as amostras mais grossas do mesmo material. No mesmo estudo foi constatado que o tamanho das amostras tinha influência na porcentagem de água retida e o tempo de centrifugação, para que as amostras atingissem o ponto de equilíbrio, dependia da textura dos solos. Assim é que, as amostras de textura mais fina exigiam mais tempo para estabelecer o equilíbrio.

GARDNER (1937) tentou calibrar a relação do potencial de umidade e o teor de água com papel de filtro úmido. O autor, baseado numa equação que expressa a força centrípeta com o gradiente do potencial de água em equilíbrio na centrífuga, ou seja: $\psi_1 - \psi_2 = \frac{W^2}{2} (r_1^2 - r_2^2)$, determinou uma curva de calibração que foi usada posteriormente para estudar a tensão capilar abrangendo uma ampla faixa de teores de água do solo, equilibrando-se o papel de filtro úmido com uma amostra de solo também úmida.

RUSSEL e RICHARDS (1938), usando um estudo similar ao de Gardner (1937), determinaram as relações de energia da água do solo na centrífuga. O potencial capilar (ψ), foi determinado aplicando a relação mencionada a seguir, isto é, $\frac{\partial \psi}{\partial r} = w^2 r \dots (1)$

onde: r = distância do eixo da centrífuga ao meio da amostra (cm);

w = velocidade angular (rad. seg.⁻¹).

Mantendo a velocidade angular constante, a equação (1) pode ser integrada entre os limites r_1 e r_2 obtendo-se:

$$\psi_1 - \psi_2 = \frac{w^2}{2} (r_1^2 - r_2^2) \dots (2)$$

Se r_1 representa a distância radial à superfície de água livre, r_2 à distância ao solo, então o (ψ_1) ou potencial capilar na distância r_1 do centro de rotação é zero. Na superfície onde a água é liberada o seu potencial é zero. Assim o ψ_2 , o potencial de capilaridade da água no solo torna-se, na equação (2):

$$\psi_2 = \frac{w^2}{2} (r_2^2 - r_1^2)$$

Nesse trabalho, a aplicabilidade da teoria é demonstrada determinando-se curvas de retenção para solos com textura arenosa e argilosa, através de centrífugas com raios diferentes.

Com o advento das câmaras de pressão de RICHARDS e FIREMAN (1943) e suas facilidades, as centrífugas foram relegadas a um segundo plano, provavelmente devido às dificuldades operacionais inerentes ao controle preciso da velocidade angular então existentes.

ALEMI et alii (1976), aproveitando o gradiente de potencial estabelecido na amostra durante a centrifugação, descreveram um método usando amostras de solo centrifugadas, para determinar a condutividade hidráulica não saturada do solo. Em vez de usarem amostras finas, eles usaram amostras de 5cm de extensão e 4,8 cm de diâmetro, coletados diretamente do campo. O potencial matricial e a distribuição de umidade ao longo da amostra após o equilíbrio numa determinada velocidade angular na centrífuga, foram descritas matematicamente.

PANINGBATAN JR. (1980), seguindo a mesma linha de pesquisa de Alemi et alii (1976), utilizou pela primeira vez, o fatiamento de amostras centrifugadas. A curva de retenção da água no solo é obtida a partir da água retida e da distribuição do potencial da água ao longo da amostra. O potencial no ponto médio da amostra ($\bar{h}$) e a umidade ($\bar{\theta}$) em cada operação foram usados para se estabelecer a curva característica. Este procedimento não é teoricamente correto.

FREITAS JR. e SILVA (1984), estudando o fatiamento de amostras centrifugadas comparando com os métodos tradicionais da câmara de pressão e da centrífuga mostraram a viabilidade do método. No trabalho os autores propõem uma metodologia de procedimento de laboratório, para determinação da curva características da água no solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCAL

O experimento foi conduzido no laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba, São Paulo.

3.2. SOLO

O presente trabalho foi realizado em dois solos pertencentes, segundo Ranzani et alii (1966), às unidades taxonômicas Terra Roxa Estruturada Eutrófico textura franco argilosa (TRE) e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico textura franco arenosa (LVM), ou respectivamente Alfisol e Oxisol pela 7ª Aproximação do Soil Survey Staff (1975).

Tabela 1 - Granulometria e classe Textural.

SOLO	Profundidade cm	Areia %	Silte %	Argila %	Classe Textural
TRE	0-35	33,9	27,5	38,4	Franco argiloso
TRE	35-55	27,10	15,7	57,1	Franco argiloso
LVm	0-25	83,0	1,2	15,6	Franco arenoso
LVm	25-75	75,6	7,8	16,5	Franco arenoso

3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO SOLO

As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 40 cm, em cilindros de alumínio de 6 cm de comprimento e 4,8 cm de diâmetro interno.

Os cilindros foram cravados no solo por percussão, em seguida foram levados com os devidos cuidados ao laboratório onde as amostras foram aparadas para as determinações necessárias. As amostras foram protegidas na extremidade inferior com tecido perfex a fim de sustentar o solo, e colocadas dentro de uma bandeja com água para saturação.

3.4. CURVAS DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

Foram determinadas as curvas de retenção pela câmara de pressão de Richards e pela metodologia proposta por Freita Jr. e Silva (1984).

3.4.1. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO, CONFORME METODOLOGIA ESTABELECIDADA POR RICHARDS (1943)

A curva de retenção da água no solo foi obtida por secamento, submetendo as amostras saturadas tensões seguintes.

- . Em funil de placa porosa (0,003 e 0,006 MPa);
- . Em placa de Richards (0,01; 0,03; 0,06; 0,1; 0,3; 0,6 e 1,5 MPa).

Foram utilizadas amostras indeformadas coletadas em anéis de alumínio de 4,8 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura. Estas amostras foram protegidas na parte inferior do anel por tecido perfex preso com elástico de borracha.

As amostras foram saturadas durante 48 horas e submetidas às respectivas tensões, até que a drena-

gem cessasse, o que se deu em aproximadamente 48 horas. Para cada tensão foram feitas três repetições.

Foram determinados os valores de umidade gravimétricas e volumétricas, para cada tensão estudada.

3.4.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO USANDO O FATIAMENTO DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

A centrífuga usada foi a "International Centrifuge" (Model - M.E.) (Figura 1).

Para a realização desse trabalho, foi necessária uma adaptação de quatro peças de madeira de mesmo peso na centrífuga para permitir o balanceamento do tambor e condicionar quatro locais para colocação das amostras, conforme ilustra a Figura 2. Nos locais das amostras foram colocados quatro cilindros de alumínio de 4 cm de comprimento para reduzir o raio de centrifugação das amostras.

Para a realização de cada teste, quatro cilindros com amostras de solo previamente saturadas e pesadas, eram colocadas na centrífuga com as amostras distribuídas de modo a obter um balanceamento equilibrado.

Cada cilindro de amostra ao ser colocado na centrífuga tinha numa das extremidades uma tela filtrante de aço inoxidável acoplada com papel de filtro.

Figura 1 - Centrífuga - (Model. M. E.)

Figura 2. Esquema de distribuição das amostras no tambor da centrífuga e as respectivas peças de madeira.

tro para condicionar a drenagem e na extremidade oposta e ra fechada com uma tampa de alumínio, para evitar a ocorrência de evaporação.

As amostras de solo eram então submetidas à centrifugação, a uma velocidade angular desejada de modo a desenvolver os potenciais desejados. O excesso de água era drenado para o exterior da amostra através da tela filtrante existente.

Durante a centrifugação observou-se que a velocidade angular variava um pouco, por isso utilizou-se durante o teste um "Tacômetro" para que houvesse um bom ajuste da velocidade angular.

As amostras saturadas eram submetidas à centrifugação por um intervalo de tempo de 30, 60, 120, 180, 240, 300, 330 minutos às rotações de 720, 1000, 1400, 1800 e 2200 rpm para o solo Terra Roxa Estruturada. Para cada rotação foi levantada uma curva para verificar qual o tempo necessário para que cessasse a drenagem, isto é, quando a energia da água do solo estava em equilíbrio com a energia produzida pela centrifugação. Este controle foi feito pela determinação da umidade do solo em cada tempo. Com este procedimento determinava-se o tempo de centrifugação mínimo.

O mesmo procedimento foi feito para o solo Latossolo Vermelho Amarelo, mas as velocidades angulares neste caso foram 720, 1.400, 1.800 e 2.300 rpm.

Para cada velocidade angular usada no teste, foram feitas três repetições. Em cada teste eram colocadas 4 amostras e submetidas a centrifugação até que o teor de água do solo atingisse o equilíbrio, isto é, cessasse a drenagem. Atingido o equilíbrio, eram retiradas das amostras da centrífuga e as outras duas amostras permaneciam centrifugando para evitar a redistribuição de água. As amostras retiradas da centrífuga eram imediatamente pesadas, e uma dessas amostras era submetida ao fatiamento, com auxílio de um extrator hidráulico (Figura 3). A espessura, com auxílio de uma espátula. Com este procedimento eram obtidas 3 subamostras que eram pesadas e levadas à estufa à 105°C para secagem.

A outra amostra era pesada e levada à estufa à 105°C para secagem, com o objetivo de determinar a curva de estabilidade, curva esta que indicava a drenagem completa. Terminada esta operação, fazia o mesmo procedimento para as duas amostras que ficavam centrifugando.

De posse dos dados obtidos na estufa, foi determinada a umidade com base na massa do solo seca em estufa de acordo com:

$$U = [(mu - ms)/ms] \times 100$$

onde: U = umidade com base na massa do solo seca (%);

mu = massa úmida (g);

ms = massa seca em estufa a 105°C (g).

Figura 3 - Extrator hidráulico, utilizado no fatiamento das amostras.

A determinação da densidade global, que é essencial para se obter a umidade com base em volume, não foi determinada diretamente com as amostras fatiadas como era desejável, devido às perdas de solo ocorridas no fatiamento, e/ou quando ficavam impregnados na parede do cilindro. Dada essa dificuldade, foram feitas várias determinações da densidade global para cada tipo de solo com amostras submetidas à centrifugação sem serem fatiadas e nas velocidades angulares desejadas, e foram feitas também determinações com amostras indeformadas coletadas diretamente no campo.

A densidade global foi obtida por meio da seguinte equação:

$$dg = ms/Vt$$

onde: dg = densidade global (g/cm^3);

ms = massa seca em estufa a $105^{\circ}C$ (g);

Vt = volume do anel do cilindro (cm^3).

A curva característica de umidade das amostras submetidas a uma determinada velocidade angular era estabelecida conhecendo-se a distribuição do teor de água acima descrito e a distribuição do potencial médio ao longo da amostra. O potencial médio correspondente a cada teor de água de cada fatia de amostra de solo, era calculada pela equação (12) descrita no modelo matemático desenvolvido por Freitas Jr. e Silva (1984).

3.5. MODELO MATEMÁTICO

O valor para o cálculo do potencial médio em qualquer camada de uma amostra de solo submetida à centrifugação, foi obtido por FREITAS JR. e SILVA (1984). Estes pesquisadores definiram que a centrifugação de uma amostra de solo, previamente saturada (Figura 4), gera um potencial matricial crescente ao longo do seu comprimento (de r_o a r_n). A relação entre este potencial, com a velocidade angular estabelecida e o raio da centrífuga são definidos por:

$$d\psi_r = w^2 \cdot g^{-1} \cdot r \cdot dr \quad (3)$$

onde: ψ_r = potencial matricial da amostra na superfície em

r (cm de H_2O)

w = velocidade angular ($rad \cdot s^{-1}$)

g = aceleração da gravidade ($cm \cdot s^{-2}$)

r = distância do eixo da centrífuga à superfície em r (cm).

Integrando-se a eq. 3 no intervalo (r, r_i)

obté-m-se que:

$$\psi_r = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r^2 - r_i^2) + \psi_{ri} \quad (4)$$

onde: ψ_{ri} = potencial matricial da amostra na superfície em r_i (cm de H_2O)

r_i = distância do eixo da centrífuga à superfície em r_i (cm).

Figura 4. Representação esquemática de uma amostra na centrífuga.

A equação 4 é a função que descreve a distribuição do potencial ao longo de r , até r_i .

O potencial matricial médio no intervalo $[r_{i-1}, r_i]$ da função ψ_r é definido por:

$$\bar{\psi}(r_{i-1}, r_i) = \frac{\int_{r_{i-1}}^{r_i} \psi_r dr}{\int_{r_{i-1}}^{r_i} dr} \quad (5)$$

Aplicando a equação 4 na equação 5, integrando e substituindo $(r_i - r_{i-1})$ por L , obtém-se:

$$\bar{\psi}(r_{i-1}, r_i) = \frac{1}{6} w^2 g^{-1} L (L - 3r_i) + \psi_{r_i} \quad (6)$$

Reescrevendo-se a equação 4 para $r = r_{i-1}$ tem-se o potencial $(\psi_{r_{i-1}})$ na superfície $i - 1$:

$$\psi_{r_{i-1}} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{i-1}^2 - r_i^2) + \psi_{r_i} \quad (7)$$

Aplicando-se a equação 7 para a superfície em $i = n$ e considerando-se o potencial matricial na superfície em r_n , por onde a água é liberada durante a centrifugação, igual a zero, obtém-se:

$$\psi_{r_{n-1}} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{n-1}^2 - r_n^2) \quad (8)$$

Para $i=n-1$, a equação 7 fica:

$$\psi_{r_{n-2}} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{n-2}^2 - r_{n-1}^2) + \psi_{r_{n-1}} \quad (9)$$

Aplicando-se a equação 8 na equação 9, chega-se a:

$$\psi_{r_{n-2}} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{n-2}^2 - r_{n-1}^2) + \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{n-1}^2 - r_n^2)$$

Simplificando-se, tem-se que:

$$\psi_{r_{n-2}} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_{n-2}^2 - r_n^2) \quad (10)$$

Por indução, a partir da equação 8 e equação 10, o potencial matricial na superfície genérica r_i fica definido pela seguinte equação:

$$\psi_{r_i} = \frac{1}{2} w^2 g^{-1} (r_i^2 - r_n^2) \quad (11)$$

Aplicando-se a equação 11 na equação 6, o potencial médio na camada delimitada por $[r_{i-1}, r_i]$ fica assim definido:

$$\psi_{(r_{i-1} - r_i)} = \frac{1}{6} w^2 g^{-1} [L(L - 3r_i) + 3(r_i^2 - r_n^2)] \quad (12)$$

A equação (12) pode ser considerada a equação genérica para o cálculo do potencial médio (cm de H_2O) em qualquer segmento de uma amostra centrifugada numa dada velocidade angular (rad. s^{-1}).

O cálculo da velocidade angular em rotações por minuto ($\bar{n}$), para um dado valor do potencial médio ($\bar{\psi}$)

em atmosfera, pode ser obtido mais facilmente, reescrevendo-se a equação 12, da seguinte forma:

$$\Omega = 23.540 \left\{ \bar{H}(r_{i-1}, r_i) / [L(L - 3r_i) + 3(r_i^2 - r_n^2)] \right\}^{1/2}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DENSIDADE GLOBAL (DG)

A Tabela 2 mostra os valores da densidade global para cada solo e as respectivas velocidades de centrifugação. Observa-se que os valores da densidade são, em termos práticos, iguais independente da velocidade de centrifugação. A densidade do solo Sertãozinho é maior que a observada no solo Luiz de Queiroz, isto deve-se a textura arenosa do solo Sertãozinho enquanto o solo Luiz de Queiroz tem uma porcentagem maior em argila. Estes dados estão de acordo com aqueles observados por SCARDUA (1972).

4.2. CURVAS DE ESTABILIZAÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

As figuras 5 e 6 mostram os valores da umidade obtidos na centrifugação das amostras dos solos TRE e LVM às velocidades especificadas. Com estes resultados construíram-se curvas de estabilização de umidade em função do tempo de centrifugação. De acordo com elas observa-se que no solo Sertãozinho a estabilização foi atingida aos 180 minutos de centrifugação para todas as velocidades, ao passo que o solo "Luiz de Queiroz" a estabiliza-

Tabela 2 - Densidade global dos solos estudados

Tipo de solo	Densidade global (g/cm ³)	Amostras centrifugadas em diferentes valores de velocidade angular
Sertãozinho	1,63	Diretamente do campo*
Sertãozinho	1,64	Centrífuga à 720 rpm
Sertãozinho	1,62	Centrífuga à 1.400 rpm
Sertãozinho	1,64	Centrífuga à 1.800 rpm
Sertãozinho	1,65	Centrífuga à 2.300 rpm
Luiz de Queiroz	1,36	Diretamente do campo*
Luiz de queiroz	1,38	Centrífuga à 720 rpm
Luiz de Queiroz	1,37	Centrífuga à 1.000 rpm
Luiz de Queiroz	1,35	Centrífuga à 1.400 rpm
Luiz de Queiroz	1,39	Centrífuga à 1.800 rpm
Luiz de Queiroz	1,37	Centrífuga à 2.300 rpm

* Amostras não submetidas à centrifugação.

Figura 5 - Curvas de estabilização de unidade em amostras do IVm submetidas à centrifugação.

Figura 6 - Curvas de estabilização de unidade em amostras do TRE submetidas à centrifugação.

ção ocorreu aos 240 minutos. Esta diferença de tempo entre os dois solos se deve à textura, pois, o Sertãozinho solo mais arenoso com maior porcentagem de macroporos (SCARDUA 1972), atingiu a estabilização em menor tempo, porquanto os grandes poros são esvaziados mais rapidamente em comparação aos poros menores.

Em ambos os solos estudados e de acordo com as curvas das figuras 5 e 6 pode-se observar que há um paralelismo entre elas, mostrando dessa maneira um comportamento semelhante àqueles obtidos por FREITAS JR. & SILVA (1984) em Latossolo Vermelho Escuro dos cerrados. Com estes resultados estabeleceu-se o tempo mínimo de centrifugação necessário para as determinações de umidade dos solos.

4.3. CURVAS DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

4.3.1. CURVAS DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO DETERMINADAS NAS CÂMARAS DE PRESSÃO DE RICHARDS

A curva de retenção da água no solo depende, além de outros fatores, da textura e estrutura, isto é, do arranjo e das dimensões das partículas e dos poros. Em geral, quanto maior o teor de argila, mai-

or será o teor de água retida sob dada sucção. REICHARDT (1975).

As Tabelas 3 e 4 mostram os valores médios do potencial matricial da água no solo, determinado com auxílio das câmaras de pressão com amostras indeformadas. Com estes dados foram construídas as curvas de retenção da água no solo para os solos Terra Roxa Estruturada e Latossolos Vermelho Amarelo, conforme as Figuras 7 e 8. Observa-se pelas curvas que as variações de umidade a baixas tensões são maiores no solo "Sertãozinho" em virtude deste solo apresentar uma maior macroporosidade em relação ao solo "Luiz de Queiroz", pois é sabido que o incremento de pequenas tensões em solo saturado os macroporos são facilmente esvaziados.

No solo "Luiz de Queiroz" com textura franco argilosa, tem maior porcentagem de partículas de argila, com elevada superfície específica e maior número de microporos, apresenta um decréscimo de umidade mais gradual e contínuo.

4.3.2. CURVA CARACTERÍSTICA DA ÁGUA DO SOLO DETERMINADA NA CENTRÍFUGA

Os resultados do teor de água do solo em função do potencial matricial médio obtido para diferentes valores de velocidade angular da centrífuga se encontram nas Tabelas 5 e 6. Para cada velocidade angular foram

Tabela 3 - Valores médios do teor de água do solo em função da tensão determinada na Câmara de Pressão - Solo Luiz de Queiroz 20-40cm.

Tensão MPa	Umidade	
	% em peso	% em volume
0s	37,22	52,10
0,003	31,23	43,72
0,006	29,91	41,88
0,010	27,87	39,76
0,030	26,53	37,84
0,060	26,23	37,40
0,100	25,86	36,87
0,300	23,86	36,11
0,600	22,63	34,25
1,500	21,50	32,53

Tabela 4 - Valores médios do teor de água do solo em função da tensão determinada na Câmara de Pressão - Solo Sertãozinho 20-40 cm.

Tensão MPa	Umidade	
	% em peso	% em volume
0s	23,25	36,85
0,003	16,85	26,71
0,006	14,76	23,39
0,010	12,96	21,95
0,030	9,92	16,79
0,060	9,25	15,22
0,100	8,84	14,97
0,300	7,83	12,53
0,600	7,27	11,64
1,500	6,78	10,84

Figura 7. Curva de retenção da água no solo. Solo Sertãozinho (20-40cm).

Figura 8. Curva de retenção da água no solo. Solo Luiz de Queiroz (20-40cm).

Tabela 5 - Valores médios do teor de água do solo em função do potencial médio calculados por camada, para diferentes valores de velocidade angular em uma centrífuga. com $r_o = 5,3\text{cm}$. Para o solo "Luiz de Queiroz".

Distância	Tensão	Umidade	
cm	MPa	% em peso	% em volume
V = 720 rpm			
0-2	0,025	28,12	38,52
2-4	0,017	28,67	39,28
4-6	0,006	29,74	40,74
v = 1000 rpm			
0-2	0,048	27,34	37,45
2-4	0,032	27,76	38,03
4-6	0,012	29,65	40,62
v = 1400 rpm			
0-2	0,093	25,82	35,37
2-4	0,062	27,03	37,03
4-6	0,023	28,99	39,72
v = 1800 rpm			
0-1,8	0,152	24,96	34,20
2-4	0,103	26,52	36,33
4-6	0,037	27,75	38,02
v = 2300 rpm			
0-1,7	0,246	24,29	33,28
2-4	0,168	25,21	34,54
4-6	0,061	26,38	36,14

Tabela 6 - Valores médios do teor de água do solo em função do potencial matricial médio calculados por camada, para diferentes valores de velocidade angular em uma centrífuga com $r_0 = 5,3\text{cm}$. Para o solo "Sertãozinho".

Distância cm	Tensão MPa	% em peso	% em volume
v = 720 rpm			
0-2	0,025	10,51	17,24
2-4	0,017	11,38	18,67
4-6	0,006	12,86	21,10
v = 1400 rpm			
0-2	0,093	8,18	13,41
2-4	0,062	9,11	14,94
4-6	0,023	10,33	16,94
v = 1800 rpm			
0-1,8	0,152	7,99	13,11
2-4	0,103	8,77	14,38
4-6	0,037	9,86	16,17
v = 2300 rpm			
0-1,7	0,246	7,96	13,01
2-4	0,168	8,50	13,94
4-6	0,061	9,18	15,06

obtidos três valores de potencial matricial médio e as respectivas unidades.

Em virtude das limitações da centrífuga para estudos desta natureza, não foi possível estabelecer velocidades angulares que permitissem alcançar potenciais matriciais desejáveis, isto é, valores abaixo daqueles constantes das Tabelas 5 e 6, por isto o estudo ficou limitado aos valores obtidos de acordo com as velocidades angulares de 720, 1400, 1800 e 2300 r.p.m. para o solo "Sertãozinho" (LVm) e 720, 10000, 1400, 1800 e 2300 r.p.m. para o solo "Luiz de Queiroz" (TRE). Em vista disto, não foi possível caracterizar a água dos solos pela centrífuga em toda a extensão convencionalmente utilizada, ou seja, até 1,5 MPa de modo que se pudesse estabelecer uma relação completa entre os resultados da centrífuga e das câmaras de pressão. Conforme Figuras 9 e 10.

Ponderando que, o propósito deste trabalho é verificar a precisão da centrífuga na determinação do potencial matricial da água do solo, pode-se admitir que os dados obtidos pela centrífuga são suficientes para confrontá-las com os dados obtidos pelas câmaras de pressão.

Figura 9 - Curva de retenção da água no solo determinada na centrífuga Solo Luiz de Queiroz.

Figura 10 -- Curva de retenção da água no solo determinada na centrífuga. Solo Sertãozinho.

4.3.3. RELAÇÕES ENTRE AS CURVAS CARACTERÍSTICAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS ESTUDADOS.

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 mostram os valores dos potenciais matriciais da água no solo dos dois solos obtidos pelos dois métodos estudados.

As Figuras 11 e 12 mostram as curvas de retenção de cada solo, determinadas pelas câmaras de pressão e pela centrífuga.

No solo Luiz de Queiroz Figura 11 pode-se observar que a partir da tensão de 0,10 MPa a curva obtida pela centrífuga tende a se afastar da curva obtida pelas câmaras de pressão. Este afastamento foi devido a centrifugação, onde as amostras a altas rotações apresentavam ligeira compactação, e conseqüentemente um aumento da são e pela centrífuga.

No Solo Sertãozinho, Figura 12 observa-se que há um pequeno afastamento a baixas tensões ou seja a 0,006 MPa, pode-se atribuir este fato a ocorrência da rápida redistribuição da água ao final da redistribuição da água no final da centrifugação, pois, por se tratar de solo arenoso, com macroporos com alto teor de água, a mesma se redistribui com certa rapidez.

Figura 11 - Curvas de retenção da água no solo pelos métodos da centrífuga e das câmaras de pressão - Solo Luiz de Queiroz.

Figura 12 - Curvas de retenção da água no solo, pelos métodos da centrífuga e das câmaras de pressão - Solo Sertãozinho (20-40cm)

4.4. CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS ESTUDADOS PARA AMBOS OS SOLOS.

4.4.1. SOLO SERTÃOZINHO

Para o estudo de correlação entre os métodos estudados foi feita uma análise de variância para a regressão linear, quadrática e cúbica conforme a Tabela 7. Observa-se que o melhor ajuste como era de se esperar foi a linear, significativo a nível de 1% de probabilidade com índice de correlação de $r = 0,9716$.

Uma alta correlação não significa necessariamente que os dados de umidade em função da tensão são iguais ou estão próximos um do outro, esta análise apenas indica a correlação existente entre os dados confrontados. Para verificar se há coerência entre os resultados a Figura 13 mostra a curva que confronta as umidades determinadas pelos dois métodos e a respectiva equação, $y = -1,3114 + 1,1174x$, onde y é a umidade referente à câmara de pressão e x a umidade correspondente a centrífuga. Cada par de valores de umidade corresponde ao mesmo potencial matricial.

Para verificar a confiabilidade dos dados foi feito um estudo de intervalo de confiança segundo HOFMANN e VIEIRA (1983) para a regressão linear. A Figura 14 mostra um gráfico onde se pode verificar estatística-

TABELA 7 - Análise da variância para os métodos estudados.
Para o solo Sertãozinho.

Causas de variação	GL	QM	F
RL	1	83,7921	168,545**
RQ	1	2,1572	6,898*
RC	1	0,4069	1,352

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 8 - Análise da variância para os métodos estudados.
Para o solo Luiz de Queiroz.

Causa de variação	GL	QM	F
RL	1	25,4246	54,638**
RQ	1	2,5421	8,698*
RC	1	1,6565	9,845**

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Figura 13 - Relação das umidades entre os métodos estudados para o solo Sertãozinho (LVm)

Figura 14 - Intervalo de confiança para a regressão linear.
Solo Sertãozinho.

mente que todos os pontos estão dentro do intervalo de confiança ao nível de 99%.

4.4.2. SOLO LUIZ DE QUEIROZ

Para o solo "Luiz de Queiroz" (TRE) aplicou-se o mesmo procedimento aplicado ao solo "Sertãozinho" (LVM). A Tabela 8 mostra a análise de variância para a regressão linear, quadrática e cúbica. Verifica-se que o melhor ajuste foi o linear, significativa ao nível de 1% de probabilidade com índice de correlação $r = 0,8088$. Esta correlação foi mais baixa que a do solo "Sertãozinho", em virtude do afastamento das curvas da Figura 11, acima de 0,1 MPa, mais acentuado.

A Figura 15 mostra a curva que confronta os valores das umidades determinadas pelos dois métodos e a respectiva equação: $y = 16,1221 + 0,5836x$ onde y é a umidade determinada nas câmaras de pressão e x a umidade correspondente à centrífuga.

A Figura 16 mostra o intervalo de confiança, segundo HOFFMAN & VIEIRA (1983) para regressão linear. Pela Figura 16 pode-se verificar estatisticamente que todos os pontos estão dentro do intervalo de confiança ao nível de 99%.

Figura 15 - Relação das umidades entre os métodos estudados para o solo Luiz de Queiroz -- TRE.

Figura 16 - Intervalo de confiança para a regressão linear.
Solo Luiz de Queiroz.

5. CONCLUSÕES

Nas condições em que foi conduzido este experimento e em face dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

. O método de determinação da curva característica da água no solo pelo fatiamento de amostras centrifugadas, mostra uma correlação significativa com o método das Câmaras de Pressão.

. A determinação da curva característica da água no solo pelo método do fatiamento de amostras centrifugadas mostrou sua viabilidade em testes de rotina, desde que se disponha de equipamentos adequados ao uso do método.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMI, M. H.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Determining the hydraulic conductivity of soil cores by centrifugation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, Wisconsin, 40: 212 - 8, 1976.

BRIGGS, L. J. & MCLANE, J. W. The moisture equivalents of soils. Bureau of Soil. Washington, USDA. Bulletin, 45, 1907.

BRIGGS, L. J. & MCLANE, J. W. Moisture equivalent determinations and their application. *Proc. Am. Soc. Agron.*, Washington, USDA., 2 : 138 - 47, 1910.

COLMAN, E. A. A Laboratory Procedure for Determining the Field Capacity of Soils. *Soil Sci.* New Brunswick, N.J., 63 : 277 - 283, 1947.

FREITAS JR., E. & SILVA, E. M. Uso da Centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 19 (11) : 1423 - 1428, nov. 1984.

GARDNER, R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. Soil Sci., New Brunswick, N. J., 43 : 277 - 283, 1937.

GROHMANN, F. & MEDINA, H. P. Características de Umidade dos Principais Solos do Estado de São Paulo. Bragantia Campinas. 21 (18) : 285 - 295, 1962.

HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. Análise de Regressão: Uma introdução à econometria. 2. ed. São Paulo, Hucitec, 1983. 379 p.

JAMISON, V.C. & KROTH, E.M. Available Moisture Storage Capacity in Relation to Textural Composition and Organic Matter Content of Several Missouri Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Morgantawn, 22: 189-192, 1958.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no Sistema Solo - Planta-Atmosfera. Piracicaba - SP, CENA/USP, 1984. 232 p. (Mi meografado).

MACLEAN, A. H. & YAGER, T.V. available water Capacities of Zambian Soils in Relation to Pressure Plate Measurements and Particle Size Analysis. Soil Sci., New Brunswick, N. J., 113 (1) : 23 - 29, 1972.

PANINGBATAN JUNIOR, E. P. Determination of soil moisture characteristic and hidraulic conductivity using a centrifuge. Davis, 1980, 198 p. (P_hD., University of California).

RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. Carta de Solos do Município de Piracicaba. Piracicaba - SP, Centro de Estudos de Solos - ESALQ/USP. 1966, 85 p.

REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema Solo - Planta - Atmosfera. 3. ed. Piracicaba - SP, CENA-USP - CNEN e Fundação Cargill. 1975, 286 p.

REICHARDT, K. A água na Produção Agrícola. São Paulo, McGraw - Hill. 1978, 115 p.

RICHARDS, L. A. & FIREMAN, M. Pressure - Plate Apparatus for Measuring Sorption and transmission by Soils. Soil Sci. New Brunswick, N. J. 56 : 395 - 404, 1943.

RICHARDS, L. A. & WEAVER, L. R. Fifteen -Atmosphere - Percentage as Related to the Permanent wilting Percentage. Soil Sci. New Brunswick, N. J., 56 : 331 - 339, 1943.

RUSSEL, M. B. & RICHARDS, L. A. The determination of soil moisture energy relations by centrifugation. Soil Sci. Am. Proc. Morgantown, west Virginia, 3 : 65 - 9, 1938.

SALTER, P. J. & HAWORTH, F. The Available water Capacity of a Sandy Loam Soil. I. A Critical Comparison of Methods of determining the Moisture Content of Soil at Field Capacity and the Permanent Wilting Point. *J. Soil Sci.* Oxford, Inglaterra, 12 : 326 - 334, 1961.

SCARDUA, R. Porosidade Livre de Água de Dois Solos do Município de Piracicaba - SP. Piracicaba, 1972, 83 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

SCARDUA, R. Irrigação. Piracicaba. Centro Acadêmico "Luiz de Queiroz", 1984, 198 p. (Mimeografado).

Soil Survey Staff. Soil Taxonomy. Agric. Handbook nº 436. USDA-US Government Printing Office, Washington, DC. Agric. Handbook nº 436, 1975.

THOMAS, M. D. & HARRIS, K. The moisture equivalent of soils. *Soil Sci.* New Brunswick, N. J., 26 (6) : 411 - 24, 1925.

VEIHMEYER, F. J. & HENDRICKSON, A. H. Methods of Measuring Field Capacity and Permanent wilting Percentage of Soils. *Soil Sci.*, New Brunswick, N. J., 68 : 75 -94, 1949

VEIHMAYER, F. J.; ISRAESEN, O. W.; CONRAD, L. P. The Moisture equivalent as influenced by the amount of soil used in its determination. Univ. Califórnia, College of Agriculture, Agric. Exp. Station, Berkeley, 1924, Tech. paper, 16.

WINTER, E. J. A Água, o solo e a Planta. trad. K. REICHARDT & P. L. LIBARDI. São Paulo, EPU./EDUSP., 1976, 169 p.

7. APÉNDICE

TABELA 9 - Valores médios do teor de água do solo em função do tempo e da velocidade angular de centrifugação. Solo Luiz de Queiroz.

Tempo (min.)	Umidade		Tempo (min.)	Umidade	
	% em peso	% em volume		% em peso	% em volume
v = 720 rpm			v = 1000 rpm		
30	30,64	41,97	30	30,34	41,57
60	29,97	41,06	60	29,86	40,91
120	29,46	40,36	120	29,31	40,15
180	29,14	39,92	180	28,96	39,67
240	28,96	39,68	240	28,73	39,36
300	28,77	39,41	300	28,55	39,11
330	28,72	39,35	330	28,45	38,98
340	28,69	39,31	340	27,88	38,20
v = 1400 rpm			v = 1800 rpm		
30	30,09	41,22	30	28,97	39,69
60	29,34	40,19	60	28,20	38,63
120	28,60	39,18	120	27,26	37,35
180	28,24	38,69	180	26,91	36,87
240	27,92	38,25	240	26,41	36,18
300	27,69	37,94	300	26,06	35,70
330	27,55	37,74	330	25,85	35,41
340	27,01	37,00	340	25,77	35,30
v = 2.300 rpm					
30	28,82	39,48			
60	28,01	38,37			
120	27,20	37,26			
180	26,75	36,65			
240	26,32	36,06			
300	25,99	35,61			
330	25,77	35,30			
340	25,69	35,20			

TABELA 10- Valores médios do teor de água do solo em função do tempo e da velocidade angular de centrifugação. Solo Ser-tãozinho.

Tempo (min.)	Umidade		Tempo (min.)	Umidade	
	% em peso	% em volume		% em peso	% em volume
v = 720 rpm			v = 1400 rpm		
15	14,64	24,01	15	13,04	21,39
30	14,24	23,35	30	12,18	19,97
60	13,77	22,58	60	11,51	18,87
120	13,18	21,62	120	10,76	17,65
180	12,71	20,84	180	10,46	17,15
240	12,46	20,43	240	10,23	16,77
300	12,35	20,25	300	10,04	16,47
310	12,10	19,84	310	10,00	16,40
v = 1800 rpm			v = 2300 rpm		
15	12,20	20,00	15	11,60	19,02
30	11,65	19,11	30	10,96	17,97
60	11,10	18,20	60	10,38	17,02
120	10,58	17,35	120	9,85	16,15
180	10,22	16,76	180	9,51	15,59
240	9,91	16,25	240	9,19	15,07
300	9,66	15,84	300	8,93	14,65
310	9,46	15,51	310	8,74	14,33

Tabela 11 - Valores médios da tensão da água do solo, unidades % em peso e % em volume, determinada na câmara de pressão. Solo Luiz de Queiroz (20-40 cm).

Tensão (MPa)	Unidade % em peso	γ_g (g/cm ³)	Unidade % em volume	Unidade média % em volume
θ_s	37,46	1,40	52,44	
θ_s	36,98	1,40	51,77	52,10
0,003	31,55	1,40	44,17	
0,003	30,92	1,40	43,28	43,72
0,006	30,10	1,40	42,14	
0,006	29,73	1,40	41,62	41,88
0,01	28,68	1,39	39,86	
0,01	27,60	1,42	39,19	
0,01	27,36	1,47	40,22	39,76
0,03	27,16	1,39	37,75	
0,03	26,33	1,42	37,39	
0,03	26,11	1,47	48,38	37,84
0,06	27,10	1,39	37,67	
0,06	25,87	1,42	36,73	
0,06	25,73	1,47	37,82	37,40
0,10	26,64	1,39	37,03	
0,10	25,58	1,42	36,32	
0,10	25,36	1,47	37,28	36,87
0,30	23,89	1,47	35,11	
0,30	23,89	1,56	37,26	
0,30	23,81	1,51	35,95	36,11
0,60	22,76	1,47	33,46	
0,60	22,59	1,56	35,24	
0,60	22,54	1,51	34,04	34,25
1,50	21,89	1,47	32,18	
1,50	21,23	1,56	33,12	
1,50	21,38	1,51	32,28	32,53

Tabela 12 - Valores médios da tensão da água do solo, unidades % em peso e % em volume, determinada na câmara de pressão. Solo Sertãozinho (20-40 cm).

Tensão (MPa)	Unidade % em peso	γ_g (g/cm ³)	Unidade % em volume	Unidade média % em volume
θ_s	23,61	1,59	37,54	
θ_s	22,89	1,58	36,17	36,85
0,003	17,23	1,59	27,40	
0,003	16,46	1,58	26,01	26,71
0,006	15,14	1,59	24,07	
0,006	14,38	1,58	22,72	23,39
0,01	13,44	1,68	22,58	
0,01	12,90	1,64	21,16	
0,01	12,55	1,76	22,08	21,95
0,03	10,21	1,68	17,15	
0,03	9,94	1,64	16,30	
0,03	9,62	1,76	16,93	16,79
0,06	9,50	1,68	15,96	
0,06	9,27	1,64	15,20	
0,06	8,99	1,76	15,82	15,66
0,10	9,17	1,68	15,40	
0,10	8,73	1,64	14,32	
0,10	8,63	1,76	15,19	14,97
0,30	7,46	1,60	11,94	
0,30	8,17	1,57	12,83	
0,30	7,87	1,63	12,83	12,53
0,60	6,91	1,60	11,06	
0,60	7,49	1,57	11,76	
0,60	7,42	1,63	12,09	11,64
1,50	6,43	1,60	10,29	
1,50	7,00	1,57	10,99	
1,50	6,90	1,63	11,25	10,84

Tabela 13 - Valores da tensão da água do solo, umidade % em peso e % em volume, determinada em centrífuga. Solo Luiz de Queiroz (20-40 cm).

Tensão (MPa)	Umidade % em peso	γ_g (g/cm ³)	Umidade % em volume	Umidade média % em volume
v = 720 rpm				
0,025	28,10	1,37	38,50	
0,025	27,92	1,37	38,25	
0,025	28,45	1,37	39,98	
0,025	25,57	1,37	37,77	
0,025	28,60	1,37	39,18	38,54
0,017	28,63	1,37	39,22	
0,017	28,29	1,37	38,76	
0,017	28,92	1,37	39,62	
0,017	28,44	1,37	38,96	
0,017	29,05	1,37	39,80	39,27
0,006	29,73	1,37	40,73	
0,006	29,51	1,37	40,43	
0,006	30,24	1,37	41,43	
0,006	29,17	1,37	39,96	
0,006	30,04	1,37	41,15	40,74
v = 1000 rpm				
0,048	27,13	1,37	37,17	
0,048	27,09	1,37	37,11	
0,048	28,05	1,37	38,43	
0,048	27,17	1,37	37,22	
0,048	27,25	1,37	37,33	37,45
0,032	27,75	1,37	38,02	
0,032	27,54	1,37	37,73	
0,032	28,37	1,37	38,87	
0,032	27,62	1,37	37,84	
0,032	27,52	1,37	37,70	38,03

Tabela 13 - cont.

Tensão (MPa)	Unidade % em peso	γ_g (g/cm ³)	Unidade % em volume	Unidade média % em volume
0,012	29,53	1,37	40,46	
0,012	29,64	1,37	40,61	
0,012	29,80	1,37	40,83	
0,012	29,71	1,37	40,70	
0,012	29,57	1,37	40,51	40,62
v = 1400 rpm				
0,093	26,36	1,37	36,11	
0,093	26,19	1,37	35,88	
0,093	25,06	1,37	34,33	
0,093	25,68	1,37	35,18	
0,093	25,83	1,37	35,39	35,38
0,062	27,75	1,37	38,02	
0,062	26,50	1,37	36,31	
0,062	27,33	1,37	37,44	
0,062	26,68	1,37	36,55	
0,062	26,89	1,37	36,84	37,03
0,023	29,19	1,37	39,99	
0,023	28,42	1,37	38,94	
0,023	29,39	1,37	40,26	
0,023	28,70	1,37	39,32	
0,023	29,28	1,37	40,11	39,72
v = 1800 rpm				
0,152	25,07	1,37	34,35	
0,152	25,31	1,37	34,67	
0,152	24,66	1,37	33,78	
0,152	24,96	1,37	34,20	
0,152	24,85	1,37	34,04	34,21
0,103	26,84	1,37	36,77	
0,103	27,19	1,37	37,25	

Tab. 13 - cont.

Tensão (MPa)	Umidade % em peso	γ_g (g/cm ³)	Umidade % em volume	Umidade média % em volume
0,103	26,46	1,37	36,25	
0,103	26,51	1,37	36,32	
0,103	26,06	1,37	35,70	36,46
0,037	27,74	1,37	38,00	
0,037	28,48	1,37	39,02	
0,037	27,92	1,37	38,25	
0,037	27,60	1,37	37,81	
0,037	27,61	1,37	37,83	38,18
v = 2300 rpm				
0,246	24,68	1,37	33,81	
0,246	24,80	1,37	33,98	
0,246	24,26	1,37	33,24	
0,246	24,42	1,37	33,46	
0,246	23,31	1,37	31,93	33,28
0,168	25,06	1,37	34,33	
0,168	25,03	1,37	34,29	
0,168	25,41	1,37	34,81	
0,168	25,69	1,37	35,20	
0,168	24,86	1,37	34,06	34,54
0,061	26,47	1,37	36,26	
0,061	26,46	1,37	36,25	
0,061	26,86	1,37	36,80	
0,061	26,54	1,37	36,36	
0,061	25,57	1,37	35,03	36,14

Tabela 14 - Tabela da tensão da água do solo, unidades % em peso e % em volume, determinada na centrífuga. Solo Sertãozinho (20 - 40 cm).

Tensão MPa	Umidade % em peso	γ_g g/cm ³	Umidade % em volume	Umidade média % em volume
$v = 720 \text{ rpm}$				
0,025	10,45	1,64	17,13	
0,025	10,56	1,64	17,32	
0,025	10,21	1,64	16,74	
0,025	10,25	1,64	16,81	
0,025	11,09	1,64	18,19	17,24
0,017	11,63	1,64	19,08	
0,017	11,26	1,64	18,46	
0,017	10,75	1,64	17,63	
0,017	10,78	1,64	17,68	
0,017	12,51	1,64	20,52	18,67
0,006	13,32	1,64	21,84	
0,006	12,35	1,64	20,25	
0,006	12,11	1,64	19,86	
0,006	11,76	1,64	19,29	
0,006	14,79	1,64	24,26	21,10
$v = 1400 \text{ rpm}$				
0,093	8,48	1,64	13,90	
0,093	8,11	1,64	13,30	
0,093	8,36	1,64	13,71	
0,093	7,68	1,64	12,60	
0,093	8,25	1,64	13,53	13,41
0,062	9,13	1,64	14,97	
0,062	9,17	1,64	15,04	
0,062	9,19	1,64	15,07	
0,062	9,01	1,64	14,78	
0,062	9,03	1,64	14,81	14,93
0,023	10,35	1,64	16,97	
0,023	10,11	1,64	16,58	
0,023	10,51	1,64	17,24	
0,023	10,02	1,64	16,43	
0,023	10,66	1,64	17,49	16,94

Tabela 14 - cont.

Tensão MPa	Umidade % em peso	γ_g g/cm ³	Umidade % em volume	Umidade média % em volume
V = 1800 rpm				
0,152	7,39	1,64	12,12	
0,152	8,08	1,64	13,25	
0,152	7,91	1,64	12,97	
0,152	8,39	1,64	13,76	
0,152	8,20	1,64	13,45	13,11
0,103	8,64	1,64	14,17	
0,103	8,91	1,63	14,61	
0,103	8,66	1,64	14,21	
0,103	9,03	1,64	14,81	
0,103	8,60	1,64	14,11	14,38
0,037	9,69	1,64	15,89	
0,037	10,09	1,64	16,55	
0,037	9,51	1,64	15,60	
0,037	10,03	1,64	16,45	
0,037	9,97	1,64	16,35	16,17
v = 2300 rpm				
0,246	8,46	1,64	13,87	
0,246	8,18	1,64	13,41	
0,246	7,44	1,64	12,21	
0,246	7,92	1,64	12,99	
0,246	7,67	1,64	12,58	13,01
0,168	9,20	1,64	15,09	
0,168	8,59	1,64	14,09	
0,168	8,22	1,64	13,48	
0,168	8,29	1,64	13,59	
0,168	8,20	1,64	13,45	13,94
0,061	9,81	1,64	16,09	
0,061	9,48	1,64	15,54	
0,061	9,07	1,64	14,87	
0,061	8,70	1,64	14,27	
0,061	8,86	1,64	14,53	15,00