

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NA CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA SATURADA DE PLANOSSOLOS DA UNIDADE DE
MAPEAMENTO VACACAÍ

Luiz Alberto Pinto Gondim^{1/}

Dissertação apresentada como um dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Hidrologia Aplicada, área de concentração Irrigação e Drenagem, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre

Julho, 1980

^{1/} Engenheiro Agrônomo

À meus pais

À minha tia, Josely

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. John C. Taylor e ao Engº Agrônomo Lawson F. de Souza Beltrame pela orientação recebida.

Ao Prof. Mário S.V. Cabeda pelas sugestões recebidas.

Ao corpo docente e funcional do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

À FAPERGS e ao FINEP, pelo auxílio financeiro recebido.

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NA CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA SATURADA DE PLANOSSOLOS DA UNIDADE DE
MAPEAMENTO VACACAÍ ^{1/}

Autor: Luiz Alberto Pinto Gondim
Orientador: Prof. John C. Taylor
Co-Orientador: Eng^o Agrônomo Lawson F.S. Beltrame

SINOPSE

Este estudo objetiva avaliar a influência da compactação e desestruturação do solo no movimento e retenção da água no solo.

Foi determinada a condutividade hidráulica saturada para uma ampla faixa de valores de densidade do solo em amostras de estrutura inalterada e amostras compactadas artificialmente em laboratório. Ficou evidenciado que a condutividade hidráulica saturada decresce com o aumento da densidade do solo, sendo a função potencial a que melhor descreve esta relação em ambos os casos.

Valores de condutividade hidráulica saturada obtidos com amostras de solo com estrutura natural quando comparados com os obtidos com amostras de solo fragmentado e recompactado, permitiram verificar que a desestruturação reduz consideravelmente a condutividade hidráulica.

A determinação de curvas características da água no solo para diferentes profundidades do perfil permitiu observar que a compactação diminui a capacidade de retenção de água no solo.

Medidas de penetração permitiram verificar que a resistência mecânica à penetração está relacionada linearmente à umidade e densidade do solo.

^{1/} Dissertação de Mestrado em Hidrologia Aplicada (Irrigação e Drenagem) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (47 p.) - Julho, 1980.

INFLUENCE OF COMPACTION ON THE SATURATED HYDRAULIC
CONDUCTIVITY IN PLANOSOLS OF THE MAPPING UNIT

VACACAI 1/

Author: Luiz Alberto Pinto Gondim
Advisers: Prof. John C. Taylor and
Lawson F.S. Beltrame

SUMMARY

The objective of this work was to determine the influence of compaction and destruction of soil structure on the movement and retention of soil water.

Saturated hydraulic conductivity was determined for a wide range of soil densities for undisturbed samples and samples artificially packed in the laboratory and showed that hydraulic conductivity decreased with increasing values of soil density according to a power curve relationship in each case

The hydraulic conductivities of undisturbed samples were higher than those of the artificially packed samples at the same density for lower soil densities showing the great importance of soil structure whereas at higher densities, the conductivities tended to be more equal.

It was observed from the moisture characteristic curves that compaction reduced the water holding capacity of the soil.

Soil resistance to cone penetration increased linearly with increase in soil density and decrease in soil moisture content.

1/ M.Sc. Thesis in Applied Hydrology (Irrigation and Drainage)
- Instituto de Pesquisas Hidráulica - Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (47 p.) - July, 1980.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Condutividade hidráulica do solo	3
2.1.1. Conceitos e equações básicas	3
2.1.2. Fatores que afetam a condutividade hidráulica	7
2.1.3. Considerações sobre os métodos de de terminação da condutividade hidráulica saturada	8
2.2. A compactação do solo	12
2.2.1. A densidade do solo como índice do grau de compactação	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Localização e características da área experi mental	17
3.1.1. Descrição do solo	17
3.2. Coleta das amostras	21
3.3. Manipulação das amostras no laboratório	23
3.4. Determinação da condutividade hidráulica no laboratório	25
3.5. A compactação artificial no laboratório	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Influência do aumento da densidade do solo na condutividade hidráulica saturada	31
4.1.1. Amostras com estrutura inalterada	31
4.1.2. Amostras com estrutura alterada	34
4.1.3. Relação entre densidade do solo e con dutividade hidráulica saturada	35
4.2. Compactação e umidade do solo	38
4.2.1. Resistência mecânica à penetração	38
4.2.2. Influência da compactação na curva ca racterística de água do solo	40
5. CONCLUSÕES	43
6. BIBLIOGRAFIA CITADA	45

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Granulometria e classificação textural do solo <u>Va</u> <u>cacaí</u>	19
2. Intensidade de excessos hídricos em solos da <u>Uni</u> <u>dade Vacacaí</u> (BELTRAME et alii, 1979)	20
3. Valores de densidade do solo (g/cm^3) e condutivi dade hidráulica saturada (mm/dia); estimativa do valor médio (\bar{X}) e desvio padrão (s%) obtidos com amostras de estrutura inalterada	31
4. Classificação da condutividade hidráulica das <u>pro</u> <u>fundidades</u> estudadas	33
5. Valores de condutividade hidráulica saturada em função da densidade do solo obtidos com amostras de estrutura alterada	35
6. Valores de densidade do solo (d_s), umidade volumé trica (U_v) e esforço de penetração (E) obtidos <u>pa</u> <u>ra</u> cada amostra	39

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Componentes do amostrador	30
2. Início da operação	30
3. Saturação das amostras no laboratório	30
4. Permeâmetro de carga variável	30
5. Penetrômetro de cone marca SOLOTEST, ref. S-210 ..	30
6. Relação entre densidade do solo e condutividade h_1 dráulica saturada	37
7. Curvas de retenção de umidade para as profundida des estudadas (amostras com estrutura inalterada).	42

1. INTRODUÇÃO

A unidade de mapeamento Vacacaí contribui com aproximadamente 1.600.000 hectares, para os quase 3.000.000 de hectares de várzeas existentes no Estado. É a unidade de mapeamento de maior expressão dentro da chamada "várzea arroeira rio-grandense".

Os solos desta unidade de mapeamento são caracterizados por drenagem insuficiente, bastante influenciados pela presença da água, condicionada pelo relevo. Sua maior utilização vem sendo feita com o cultivo do arroz, onde o intensivo tráfego de máquinas agrícolas em condições elevadas de umidade do solo vem provocando compactação das camadas superficiais do solo.

Para combater as invasoras que comumente ocorrem nas lavouras arroeiras é prática comum a suspensão do plantio por dois ou três anos. Neste período esses solos são geralmente subutilizados, apresentando índices de produtividade bastante inferiores aos desejáveis.

Desde que convenientemente trabalhados esses solos poderão ser explorados com maior rentabilidade, recebendo outras culturas de interesse econômico em rotação com o arroz. Entretanto, a implantação dessas culturas requer diferentes práticas de manejo do solo, sendo as mais importantes a drenagem

para eliminar os excessos hídricos em períodos de maior pre
citação e a subsolagem, para eliminar as camadas compacta
das, permitindo às novas culturas um bom desenvolvimento do
sistema radicular e facilitando o movimento da água ao longo
do perfil.

Para o êxito dessas práticas é necessário o conhecimento
de algumas propriedades físicas dos solos, bem como o da
influência que têm essas propriedades nos processos de retenção
e movimento da água no solo.

Utilizando informações obtidas no campo e em laboratório
elaborou-se este estudo, que tem como principais objetivos:

- 1 - determinar a influência do aumento da densidade e
desestruturação do solo na condutividade hidráulica
saturada;
- 2 - estudar a influência da umidade e densidade do solo
na resistência mecânica à penetração;
- 3 - estudar a influência das camadas mais compactas na
curva característica da água do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Condutividade hidráulica do solo

2.1.1. Conceitos e equações básicas

O termo condutividade hidráulica é o fator de proporcionalidade "K" da equação de Darcy, que trata do fluxo viscoso de água em solo saturado (KESSLER & OOSTERBAAN, 1974).

FORCHHEIMER (1914) apresentou a equação de Darcy em forma generalizada para fluxo tridimensional (REEVE, 1967):

$$v = - ki \tag{1}$$

onde,

v = velocidade efetiva do fluxo (LT^{-1})

K = condutividade hidráulica saturada (LT^{-1})

i = dH/dl = gradiente hidráulico (adimensional)

HAGEN (1839) e POISEUILLE (1846) mostraram que, para fluxo laminar, a quantidade de um determinado líquido que escoar e passa através de um tubo pequeno em um tempo dado é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e à quarta potência do diâmetro do tubo (REEVE, 1967).

A equação destes pesquisadores, derivável com o auxílio da hidrodinâmica clássica, tem muita analogia com a de Darcy

e se expressa como segue:

$$Q = \frac{\pi d^4 (p_1 - p_2)}{128 \eta \ell} \quad (2)$$

onde,

d = diâmetro do tubo (L)

Q = volume do líquido por unidade de tempo ($L^3 T^{-1}$)

p_1 e p_2 = pressão nos pontos 1 e 2 do tubo ($ML^{-1} T^{-2}$)

η = viscosidade dinâmica do líquido ($ML^{-1} T^{-1}$)

ℓ = comprimento do tubo entre os pontos 1 e 2 (L)

As pressões p_1 e p_2 podem através da equação da energia ser expressas em termos da perda de carga hidráulica, assu mindo a equação (2) a seguinte forma:

$$Q = \frac{\pi d^4 \rho g}{128 \eta} \frac{H_1 - H_2}{\ell} \quad (3)$$

onde,

ρ = massa específica do líquido (ML^{-3})

g = aceleração local da gravidade (LT^{-2})

H_1 e H_2 = cargas hidráulicas nos pontos 1 e 2 (L)

Esta última equação expressa em termos de velocidade mé dia, com auxílio da equação da continuidade, transforma-se em:

$$v = \frac{d^2 \rho g}{32 \eta} i \quad (4)$$

A equação (4) será idêntica à equação de Darcy se $K = -d^2 \rho g / 32 \eta$. Disso resulta, aparentemente, que existe certa analogia entre o fluxo laminar em tubos e o fluxo em meios porosos.

Esta analogia é explicada por REEVE (1967). Segundo este autor, com o auxílio da análise dimensional pode-se determinar a forma de relação entre os parâmetros K , ρ , g , η e d . A substituição destas relações na equação de Darcy indica:

$$v = -Ki = -\frac{c d^2 \rho g}{\eta} i = -K' \frac{\rho g}{\eta} i \quad (5)$$

onde o parâmetro \underline{d} pode-se considerar como característico do poro médio e do tamanho médio das partículas do meio. O fator \underline{c} depende da porosidade do meio, da variação e distribuição das partículas e de sua orientação e disposição, todas caracterizadas por grandezas adimensionais ou relações angulares. Sendo o parâmetro \underline{d} constante para um mesmo meio poroso, o produto $\underline{c} \underline{d}^2$ foi representado pelo símbolo \underline{K}' , que depende exclusivamente deste meio e se chama então permeabilidade intrínseca (RICHARDS, 1952). O coeficiente K , constante de proporcionalidade da equação de Darcy, que é exatamente análoga às equações de fluxo elétrico e de transferência de calor em condutores contínuos, se chama condutividade hidráulica saturada, similarmente a condutividade elétrica e

térmica nas equações correspondentes de fluxo elétrico e calórico.

Observa-se na equação (5) que a condutividade hidráulica está diretamente relacionada com o fator c, que conforme descrição anterior depende da porosidade e distribuição e orientação das partículas no meio. Como a porosidade total e densidade do solo estão relacionadas pela expressão:

$$P = \left(1 - \frac{d_s}{d_p}\right) 100 \quad (6)$$

onde, P = porosidade total (%)

d_s = densidade do solo (ML^{-3})

d_p = densidade de partículas (ML^{-3})

e como a estrutura do solo é determinada pela forma, tamanho e disposição de partículas primárias e de agregados, pode-se afirmar que a condutividade hidráulica é função da densidade e da estrutura do solo.

$$K = f(\text{densidade do solo; estrutura do solo})$$

Verificou-se que a equação de Darcy aplica-se a solos saturados e não-saturados. No estado de não-saturação o gradiente de pressão torna-se gradiente de sucção, passando a condutividade hidráulica a ser não mais constante, porém variável em função do teor de umidade do solo (HILLEL, 1971).

2.1.2. Fatores que afetam a condutividade hidráulica

Segundo CHILDS (1969) a condutividade hidráulica é estimulada por uma grande porosidade, por uma textura grossa e aberta, e por uma estrutura do solo bem definida.

Quando a condutividade hidráulica depende principalmente da estrutura do solo, a estabilidade de tal estrutura é de essencial importância. A qualidade da água que percola pode ter um efeito marcante, pois tanto a concentração eletrolítica como a composição da água podem alterar essa estabilidade.

O efeito de diversos cátions intercambiáveis na estabilidade estrutural do solo foi estudado por REEVE et alii (1954) e BROOKS et alii (1956). Estes pesquisadores mostraram que o sódio intercambiável é particularmente efetivo para causar dispersão, dilatação e degradação estrutural dos solos.

QUIRK & SCHOFIELD (1955) estudaram o decréscimo da condutividade hidráulica como função da concentração electrolítica da água em solos com diversos níveis de sódio intercambiável e propuseram, para manter a condutividade hidráulica estável, a adição de sais de cálcio na água para substituir o sódio intercambiável e assim melhorar as condições estruturais do solo.

As investigações sobre a influência dos macro e microorganismos na condutividade hidráulica, pela ação na estrutura

so solo, indicam a importância de também considerá-los.

ALLISON (1947), utilizando amostras de solo esterilizadas e não esterilizadas, mostrou de forma concludente que em condições de imersão prolongada a obstrução dos poros do solo com células microbianas e seus produtos sintetizados, dejetos ou polissacarídeos reduzem de forma acentuada a condutividade hidráulica.

As aberturas no solo provocadas por minhocas e raízes vegetais aumentam a condutividade hidráulica.

Outra consequência complementar da estrutura do solo é citada em CHILDS (1969). Segundo este autor, podem desenvolver-se fissuras estruturais mais facilmente em algumas direções que em outras e dá como exemplo as estruturas prismáticas colunares pela maior abundância de fissuras verticais que horizontais. O contrário sucede nas estruturas em placas laminares. Isso ocasiona variação da condutividade hidráulica em diferentes condições, dizendo-se que os solos exibem anisotropia ou que são anisotrópicos.

2.1.3. Considerações sobre os métodos de determinação da condutividade hidráulica saturada.

As determinações de condutividade hidráulica são geralmente realizadas com amostras de solo no laboratório ou com medidas diretas no campo. Métodos estimativos, correlacionando

do a condutividade hidráulica com propriedades físicas do solo, são às vezes empregados quando outras técnicas tornam-se impraticáveis ou como critério de avaliação nos projetos de drenagem.

No propósito deste trabalho, tornou-se necessário e conveniente uma revisão de métodos de laboratório, tendo em vista a importância de utilizar amostras com diferentes estado de estruturação e densidade do solo. BOUWER & JACKSON (1974) apresentam uma revisão detalhada dos métodos de determinação diretos no campo.

No laboratório, dois são os tipos de aparelhos frequentemente usados: o permeâmetro de carga constante e o de carga variável, ambos baseados na aplicação direta da lei de Darcy, determinando numericamente o coeficiente de condutividade hidráulica K .

O permeâmetro de carga variável usa-se correntemente para solos muito pouco permeáveis, nos quais a condução da água é muito lenta.

Aparelhos mais sofisticados são às vezes usados. LAMBE (1951), citado em KLUTE (1965), descreve variações entre aparelhos que utilizam carga constante e variável, cujas modificações diminuem os erros causados por evaporação nas determinações com amostras relativamente impermeáveis.

No permeâmetro de carga constante aplica-se uma diferença constante de nível de água na amostra de solo previamente

saturada, determinando o volume de água que no tempo t atravessa a amostra:

$$K = \frac{V \cdot \ell}{A \cdot \Delta H \cdot t} \quad (7)$$

onde K = condutividade hidráulica saturada (LT^{-1})

ℓ = altura da amostra (L)

A = seção da amostra (L^2)

ΔH = carga hidráulica aplicada (L)

$V/t = Q$ = volume de água que no tempo t atravessa a amostra ($L^3 T^{-1}$)

No permeâmetro de carga variável mede-se num tubo manométrico graduado o decréscimo do nível da água aplicado na amostra de solo saturada.

$$K = \frac{dV}{dt} \frac{\ell}{A \cdot H} = - \frac{a \cdot dH}{dt} \frac{\ell}{A \cdot H} \quad (8)$$

sendo a a seção do tubo manométrico (L^2).

Integrando-se a equação (8) entre o momento inicial $t = 0$, no qual $H = H_0$, e o tempo $t = t$, para o que $H = H$, tem-se:

$$K = - \frac{a \ell}{A t} \ln \frac{H}{H_0} \quad (9)$$

Descrição detalhada desse procedimento encontra-se em KLUTE (1965).

As amostras de solo utilizadas nas determinações de laboratório podem ser de estrutura alterada ou inalterada. Se gundo REEVE (1967), o tamanho, forma ou natureza do núcleo a mostrador não necessita de maiores especificações. O impor tante é que a amostra seja representativa do solo como este se apresenta no campo.

Amostras de estrutura inalterada de solos arenosos sol tos são difíceis de obter; entretanto, com uma areia limpa, sem argila e com grãos de tamanho e forma uniformes pode-se restaurar a estrutura da amostra no laboratório, com pouco risco de haver modificado sua condutividade hidráulica. O im portante é ter cuidado para que a amostra tenha a mesma poro sidade que tinha quando em estado natural. Se o solo apre senta variação apreciável de tamanho ou forma das partículas, é muito pouco provável que o arranjo natural das partículas possa reproduzir-se no laboratório. Devido a isto, a altera ção da estrutura natural de ditos materiais pode acarretar erro considerável nas determinações, embora a porosidade se ja a mesma nos estados naturais e nos restaurados.

Como os métodos que utilizam permeâmetro determinam a condutividade hidráulica de amostras de solo saturado, a sa turação deve ser de importância considerável. Quando as amos tras não se encontram totalmente saturadas, o ar pode bloquear

a passagem da água nos poros, provocando alteração nas determinações.

2.2. A compactação do solo

Segundo BAVER et alii (1973), a compactação é o aumento na densidade do solo como resultado de cargas ou pressões aplicadas. A maior compactação de uma camada é decorrente da maior concentração de matéria sólida por unidade de volume, resultando numa diminuição da porosidade.

Na agricultura, a compactação do solo influi de modo prejudicial para a produtividade das culturas. Reduz a infiltração da água no solo, de modo que o escoamento superficial aumenta, provocando maior erosão e impedindo uma recarga adequada de água subterrânea. Diminui o espaço de aeração do solo, de modo que as atividades mecânicas das raízes são prejudicadas, explorando menor volume de solo, etc. Todos esses efeitos podem reduzir a qualidade e quantidade dos vegetais cultivados no solo para a produção de alimentos e fibras.

Relações diretas de causa e efeito parecem existir entre o uso de máquinas e a compactação do solo, entre compactação e o desenvolvimento das raízes e entre o desenvolvimento das raízes e a produção das culturas. Estas relações são qualitativas e quantitativas e a intuição levou os pesquisadores a tentar correlacionar diretamente o uso de máquinas com a

produtividade das culturas.

NELSON et alii (1975) estudaram o efeito do tráfego de trator na produtividade da soja [*Glycine max.* (L.) Merr.], em experimento conduzido por três anos consecutivos (1970 a 1972) em solo arenoso do Tuskegee Institute. Cinco combinações de tráfego, compreendendo zero, quatro e oito passagens do trator foram repetidas três vezes. Resistência à penetração, índices de umidade do solo a diferentes profundidades, desenvolvimento do sistema radicular e produtividade de soja foram determinados durante cada estação de crescimento. Os tratamentos que determinavam quatro e oito passagens do trator causaram considerável compactação do solo, parecendo afetar seu conteúdo de umidade e a baixa produtividade nestas parcelas. As plantas das parcelas de controle utilizaram mais água do solo. Isto foi evidenciado pelo maior desenvolvimento e extensão do sistema radicular e maior produção destas parcelas.

Segundo SOANE et alii (1977), a compactação do solo tem causado grandes problemas quando se trata de cultivos como tubérculos ou outras raízes. Influi no crescimento uniforme das raízes, prejudicando seu valor quando da comercialização do produto.

Vários autores têm estudado o efeito da compactação como impedimento mecânico às raízes. TAYLOR & BURNETT (1964) asseguram que a resistência à penetração determina o grau de crescimento radicular. As observações no campo e laboratório

têm demonstrado que a compactação do solo restringe o crescimento das raízes e, portanto, a produtividade das culturas.

GROHMANN & QUEIROZ NETTO (1966), verificando o efeito da compactação do solo sobre a penetração de raízes de arroz, compactaram em laboratório amostras do horizonte A de um latossolo roxo, limo argiloso de baixa densidade natural e de um podzólico vermelho-amarelo orto, limo argiloso, de densidade natural bem mais elevada. Constataram que a partir de valores de densidade do solo de 1.42 g/cm^3 para o latossolo e de 1.38 g/cm^3 para o podzólico não houve bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas do arroz.

VEIHMEYER & HENDRICKSON (1948), trabalhando com o girasol, encontraram que nenhuma raiz penetrou nenhum solo com densidade de 1.9 g/cm^3 ou maior. Em alguns solos arenosos os valores limitantes foram $1.7 - 1.8 \text{ g/cm}^3$, porém em argilas foram $1.6 - 1.7 \text{ g/cm}^3$.

WIERSUM (1957) estudando a resistência mecânica em solos arenosos mostrou que as raízes jovens não penetravam nos poros de diâmetro inferior ao de suas coifas. Assim, segundo este autor, para um diâmetro de 0.2 mm os grãos de areia devem ter ao menos 0.8 mm de diâmetro. Observou que quando os poros estão dotados de uma certa elasticidade a raiz poderá exercer esforços laterais tentando sua penetração.

2.2.1. A densidade do solo como índice do grau de compactação

Densidade do solo (massa de solo seco por unidade de volume) é uma relação que leva em conta o volume total do solo.

De modo diferente ao da densidade de partículas, que diz respeito apenas às partículas do solo, a densidade do solo é determinada tanto pela quantidade dos espaços porosos como pelos sólidos do solo. Assim, solos soltos e porosos terão massas reduzidas por unidade de volume e os mais compactos terão valores elevados. FORSYTHE (1975) e BELTRAME & TAYLOR (1980) ressaltaram o uso desta relação para estimar o grau de compactação do solo.

A densidade para a qual um dado solo pode ser compactado varia com a força de compactação e com o conteúdo de água do solo. Se um desses fatores permanece constante, a máxima densidade varia com o outro fator. Com a força de compactação permanecendo constante, a densidade aumenta progressivamente ao aumentar o conteúdo de água, até chegar a um máximo, logo diminuindo com adições posteriores de água. Este máximo chama-se conteúdo de água ótimo para a compactação (BAVER et alii, 1973).

TSCHEBOTARIOFF (1967) explica a diminuição da densidade do solo além do conteúdo de água ótimo para a compactação: com pouca umidade, os solos coerentes formam torrões que não

se rompem facilmente e que dificultam a compactação. Aplicando-se água, facilita-se a rotura dos torrões, de modo que com o mesmo esforço obtem-se uma densidade maior. Quando a quantidade de água aplicada é suficiente para preencher os espaços vazios do solo, depois de haver revestido as partículas, teoricamente se alcança o conteúdo ótimo. Toda a água aplicada em seguida servirá unicamente para separar as partículas entre si e reduzirá a densidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e características da área experimental

O local escolhido para a coleta das amostras de solo foi um campo piloto de drenagem, operado pelo Setor de Irrigação e Drenagem do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, localizado em área da Estação Experimental do Instituto Rio-grandense do Arroz (IRGA), no município de Cachoeirinha, RS, cujas coordenadas geográficas são:

latitude: S29°55'

longitude: W50°58'

De acordo com o Sistema Internacional de Köppen, a área de estudo está localizada dentro da classe Cfa, clima temperado úmido, sem estiagem.

3.1.1. Descrição do solo

O solo é um planossolo de textura média, relevo plano a suavemente ondulado, apresentando substrato de sedimentos a luviais recentes, pertencentes à unidade de mapeamento Vaca caí I.

Apresenta como característica geral a presença de lençol

freático elevado, decorrente da má drenagem condicionada ao relevo; como consequência disso, ocorrem fenômenos de redução, com o desenvolvimento de cores cinzentas no perfil e características de gleização.

A vegetação predominante é a de campo, muitas vezes modificada, pois a maioria destes solos são cultivados intensamente com arroz.

A descrição do perfil deste solo (BRASIL, 1973) é dada a seguir:

- A₁₁ 0 - 30 cm; bruno-escuro (10 YR 3/3, úmido); franco arenoso; poroso, friável, ligeiramente plástico e pegajoso; de transição clara e raízes abundantes.
- A₁₂ 30 - 45 cm; bruno-amarelo-escuro (10 YR 4/4 úmido); franco arenoso; poroso; friável; não plástico e não pegajoso; transição clara, plana; raízes abundantes.
- A₂₁ 45 - 60 cm; bruno (10 YR 5/3, úmido); mosqueado pequeno distinto e bastante; bruno forte (7,5 YR 5/8, úmido); franco-arenoso; poroso; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara, plana; raízes comuns.
- A₂₂ 60 - 70 cm; cinzento-claro (10 YR 2/2, úmido); mosqueado pequeno distinto e bastante; franco arenoso sem estrutura; poroso com alguns poros grandes; solto, não plástico; transição abrupta e plana; poucas raízes.
- B_{2g} 70 - 120 cm; cinzento (10 YR 5/1, úmido), devido aos "co

tings"; bruno amarelado (10 YR 5/4, úmido amassado), mosqueado grande abundante e proeminente vermelho (10 YR 4/8, úmido), bruno a amarelado claro (10 YR 6/4, úmido) franco argiloso; pouco poroso, e extremamente duro, muito firme, plástico e pegajosos; transição gradual e plana; poucas raízes.

G 120 - 200 cm; cinza oliváceo claro (5 YR 6/2, úmido), mosqueado preto (N1/, úmido); franco argiloso, pouco poroso; firme; sem raízes.

A Tabela 1 apresenta a classificação textural do solo de acordo com o USDA (1962). A análise de distribuição do tamanho de partículas foi obtida no laboratório pelo método do hidrômetro (FORSYTHE, 1975).

Tabela 1. Granulometria e classificação textural do solo Vaca caí.

PROFUNDIDADE (mm)	GRANULOMETRIA (%)			CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL *
	ARGILA	SILTE	AREIA	
0 - 100	10,8	36,5	52,7	FRANCO ARENOSO
100 - 200	13,7	41,7	44,6	FRANCO
200 - 300	14,8	40,3	44,9	FRANCO
300 - 400	12,4	41,6	46,0	FRANCO
400 - 500	10,6	44,0	45,4	FRANCO
500 - 600	9,2	42,0	48,8	FRANCO

* USDA (1962)

Segundo BELTRAME et alii (1979), os excessos hídricos, aliados à localização, baixa condutividade hidráulica e à existência de uma camada pouco permeável, indicam a necessidade de drenagem nos solos desta unidade.

Na Tabela 2 são mostrados os valores máximos dos excessos prováveis de ocorrer em diferentes períodos de retorno.

Tabela 2. Intensidade de excessos hídricos em solos da Unidade de Vacacaí. (BELTRAME et alii, 1979).

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	INTENSIDADE DOS EXCESSOS (mm)					
	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
2	111	79	81	89	52	*
5	157	151	149	153	106	22
10	211	221	246	200	206	63
20	269	259	253	288	242	113

* não ocorrem excessos hídricos.

Apesar de num período do ano sofrerem encharcamento, as probabilidades de ocorrência de déficits hídricos em solos da Unidade Vacacaí alcançam valores de até 47% e 39% no mês de janeiro, para capacidades de armazenamento de 75 e 115 mm respectivamente.

3.2. Coleta das amostras

As amostras foram coletadas no local anteriormente descrito, nas profundidades de 0-100mm, 200 - 300 mm e 500 - 600 mm de um solo sujeito ao regime de trabalho característico das várzeas arroeiras.

Na seleção das profundidades levou-se em consideração o trabalho de MONDADORI & TAYLOR (1980), que obtiveram resultados de densidade do solo nas profundidades de 150, 250, 450 e 600 mm, constatando a existência de uma camada compactada aos 250 mm de profundidade.

Dispondo-se de uma área bastante uniforme, foram coletadas seis amostras de $1.674.155 \text{ mm}^3$ em cada profundidade, procurando-se coletá-las de modo que a estrutura natural permaneça inalterada.

Para sacar as amostras, foram utilizados cilindros de PVC rígido de 100 mm de altura e 146 mm de diâmetro.

Dois anéis de aço com mesmo diâmetro dos cilindros e 50 mm de altura eram acoplados nas extremidades dos cilindros, sendo o que acoplava na extremidade inferior era em forma de bisel para facilitar a penetração e garantir substancialmente o estado natural da estrutura do solo.

Devido ao grande volume coletado pelo cilindro e pela necessidade de manter as amostras de solo com sua estrutura inalterada, foi desenvolvida uma técnica e construído um amo

trador com as seguintes características (Figuras 1 e 2):

- uma haste metálica de 1500 mm de comprimento e seção transversal tipo U de dimensões 3" x 1 1/4" x 1/8";
- duas barras metálicas de diâmetro 5/8", com 800 mm de comprimento, ponteaçada numa extremidade, possuindo uma base helicoidal para fixação no solo e melhor penetração neste;
- um macaco hidráulico com capacidade de 3 tf;
- uma cruzeta de haste metálica.

Escolhido o local de coleta, introduziam-se as barras metálicas no solo, espaçadas de aproximadamente 1500 mm. A base com formato helicoidal permitia melhor penetração e garantia a fixação no solo. A haste metálica era atada nas extremidades das barras e sob a haste era centrado o cilindro coletor. O macaco hidráulico era colocado entre o cilindro e a haste e quando acionado fazia com que o cilindro penetrasse suavemente no solo.

Uma cruzeta metálica entre o macaco e o cilindro coletor distribuía os esforços desenvolvidos pelo macaco hidráulico, uniformizando a penetração.

Nas coletas mais profundas era necessário escavar o solo, abrindo-se trincheiras para facilitar a operação. Um martelo edafológico era utilizado para retirar o cilindro do solo; após retirada a amostra era modelada com espátulas, protegida com telas de arame e tábuas de madeira e transportada

ao laboratório em embalagens de plástico, seladas herméticamente para evitar perdas de umidade.

Ao redor de cada local de amostragem, seis medidas de penetração eram efetuadas, usando-se um penetrômetro de cone marca SOLOTEST (ref. S-210), com seção de base igual a 28,30 mm (Fig. 5).

A curva de calibração para transformação das medidas de campo foi obtida no laboratório. A equação representativa dessa curva foi:

$$y = 0,0213 + 6,3535 x \quad (10)$$

onde: x = leitura do penetrômetro no campo (média aritmética de seis leituras);

y = resistência do solo (Kgf).

3.3. Manipulação das amostras no laboratório

Na chegada ao laboratório, as amostras eram pesadas para obter-se o teor de umidade de campo. Após esta operação, eram saturadas por capilaridade e novamente pesadas, obtendo-se a umidade correspondente ao estado de saturação de cada amostra. Eram transportadas ao permeâmetro de carga variável, obtendo-se um valor médio de condutividade hidráulica saturada para cada profundidade em estudo.

Após o teste com o permeâmetro as amostras eram deses

trituradas e conduzidas para a estufa, a 110°C por 24 horas. Depois de pesadas à temperatura ambiente, determinava-se a massa de solo seco correspondente a cada amostra.

Duas amostras de cada profundidade receberam tratamento diferente das demais. Antes de ir para a estufa, foram levadas para a panela de pressão, onde, conforme método descrito por FORSYTHE (1975), determinaram curvas de retenção de umidade do solo para as três profundidades consideradas utilizando-se sucções de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,7, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0 e 5,0 atm. Devido à altura das amostras, não foi possível verificar seus comportamentos quando submetidas à sucção de 15 atm. As panelas de pressão para 15 atm não tinham espaço interno suficiente para receber as amostras.

Toda a massa de solo coletada, depois de seca, foi passada em peneiras de 2 mm de abertura de malha e, fazendo-se variar a intensidade de compactação, obteve-se uma escala crescente de densidade do solo.

As amostras compactadas a diversos valores de densidade do solo eram saturadas por capilaridade e transportadas ao permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica.

Com essa mesma massa de solo seca e peneirada foi realizada uma análise de distribuição do tamanho das partículas pelo método do hidrômetro (FORSYTHE, 1975) para cada profundidade.

3.4. Determinação da condutividade hidráulica no laboratório

Utilizou-se a técnica do permeâmetro de carga variável para obter-se os valores de condutividade hidráulica. O instrumental utilizado pode ser visto na Figura 4.

A amostra, pré-saturada (Ver Fig. 3), era colocada entre duas placas porosas de um permeâmetro, de modo que a perda de carga produzida pelas placas fosse menor que a provocada pelo material em ensaio.

Um delgado tubo de vidro graduado, com seção transversal circular, era comunicado com a amostra através de uma conexão na placa porosa superior. Nesta mesma placa, um registro controlava a entrada de água na amostra, proveniente de um reservatório mantido a nível constante e instalado num plano mais elevado.

Com o registro aberto, o nível da água no tubo igualava-se rapidamente ao nível da mesma no reservatório. Fechando-se o registro, a carga hidráulica L , medida desde a base da amostra até o nível superior da água no tubo, era aplicada sobre a amostra, relacionando-se o total de água transmitida, medida no tubo graduado, com o tempo de duração do escoamento, medido através de um cronômetro.

Nos momentos de tempo t_0 e t , os níveis observados no tubo graduado são h_0 e h . Utilizando-se a equação abaixo, de

envolvida em CHILDS (1969), foi possível a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica saturada K.

$$\ln (\ell_0/\ell) = (A/a) (K/D) (t - t_0) \quad (11)$$

onde:

ℓ_0 e ℓ = níveis observados no tubo correspondentes aos momentos de tempo t_0 e t (em mm);

A = área da seção transversal da amostra, constante para todas as amostras ($16741,5 \text{ mm}^2$);

a = área da seção transversal do tubo (32 mm^2);

K = coeficiente de condutividade hidráulica saturada (em mm/dia);

D = altura da amostra, constante para todas as amostras (100 mm);

$(t - t_0)$ = espaço de tempo cronometrado, para o qual o nível da água no tubo se desloca de ℓ_0 a ℓ .

Para especificar-se o valor de condutividade hidráulica das amostras com estrutura não-alterada, dezoito determinações foram realizadas para cada uma das seis amostras de cada profundidade estudada.

O intervalo de tempo era cronometrado em função da mudança do menisco do nível da água no tubo graduado, quando aplicadas duas cargas hidráulicas.

$$L_1 = 1130 \text{ mm e } L_2 = 830 \text{ mm}$$

O cronômetro era acionado no nível $l_{o1} = 1130$ mm e para do no nível $l_1 = 930$ mm; novamente acionado em $l_{o2} = 830$ mm e parado em $l_2 = 630$ mm.

Para cada carga hidráulica nove valores de coeficientes de condutividade K eram obtidos, fazendo-se três determinações em cada um dos seguintes espaços de tempo:

- 1º - assim que instalada a amostra no permeâmetro;
- 2º - 1 hora após a realização da primeira;
- 3º - 12 horas após a realização da primeira.

O valor de K para cada amostra era obtido pela média entre as médias dos nove valores obtidos com a aplicação da carga L_1 , e dos nove valores obtidos com a aplicação da carga L_2 .

O valor médio de K , obtido pela média entre os valores das seis amostras de cada profundidade, foi considerado como representativo de cada profundidade.

Nas determinações com amostras de estrutura modificada, efetuadas com a finalidade da obtenção de valores de condutividade para diferentes graus de compactação, as mesmas cargas L_1 e L_2 foram aplicadas, fazendo-se apenas três determinações para cada uma das cargas hidráulicas, 1 hora depois de instalada a amostra no permeâmetro. O valor médio do coeficiente K encontrado nessas seis repetições foi considerado como *representativo da amostra.*

presentativo da amostra.

3.5. A compactação artificial no laboratório

Para efetuar a compactação artificial do solo utilizou-se um martelo comum de edafologia, um pistão de madeira e o próprio cilindro coletor das amostras. A operação consistia nas seguintes fases: o cilindro era montado sobre uma base fixa e por meio de um funil, o solo era colocado no cilindro até formar uma camada depositada de aproximadamente 20 mm, tendo-se o cuidado de nivelar a superfície. Colocava-se a base do pistão compactador sobre a superfície do solo no cilindro com cuidado e de modo a mantê-lo em posição vertical. Com o martelo edafológico batia-se sobre o pistão compactador, golpeando tantas vezes quantas necessárias para se obter a compactação desejada da camada de solo.

Os valores crescentes de densidade do solo foram obtidos fazendo-se variar o número de batidas sobre o pistão. A compactação efetuada oscilou entre o simples preenchimento do cilindro com o solo até vinte golpes de martelo por camada de 20 mm depositada.

A massa do solo, depois de compactada, era pesada e como a superfície do cilindro era constante, media-se a sua altura com um paquímetro, para o cálculo do volume. O peso seco dividido pelo volume forneceu o valor exato da densidade

do solo compactado.

O solo compactado, cuja densidade já era conhecida, era umedecido por capilaridade durante certo espaço de tempo, até apresentar características do estado de saturação.* Quando saturado, era levado ao permeômetro de carga variável, onde se determinava a condutividade hidráulica.

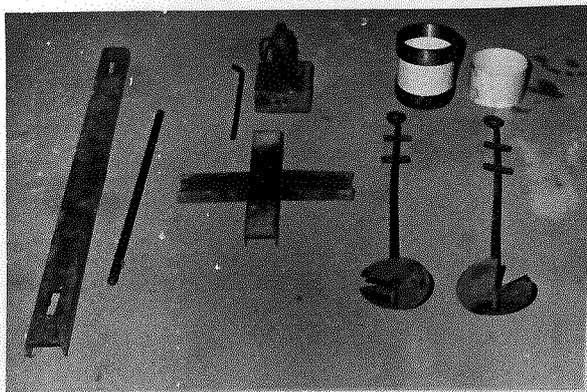


FIG. 1 - Componentes do amostrador

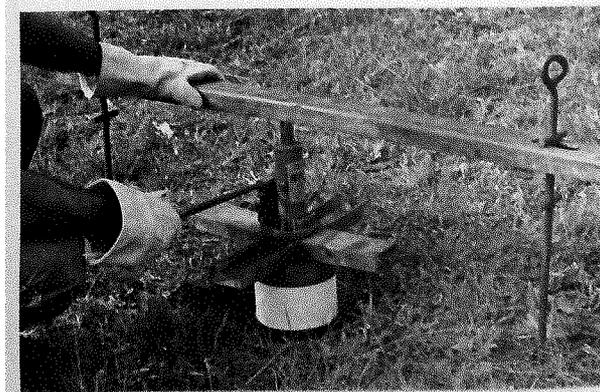


FIG. 2 - Início da operação



FIG. 3 - Saturação das amostras no laboratório

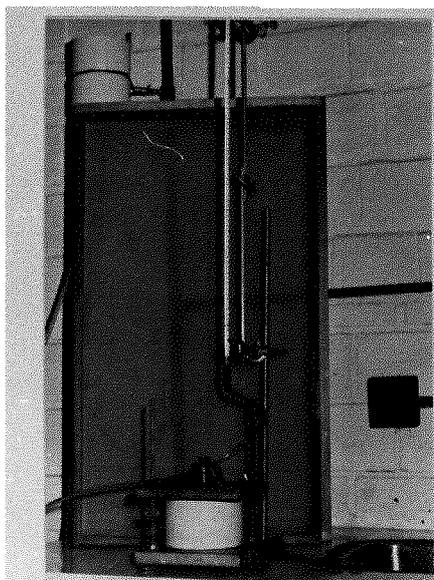


FIG.4 - Permeâmetro de carga variável

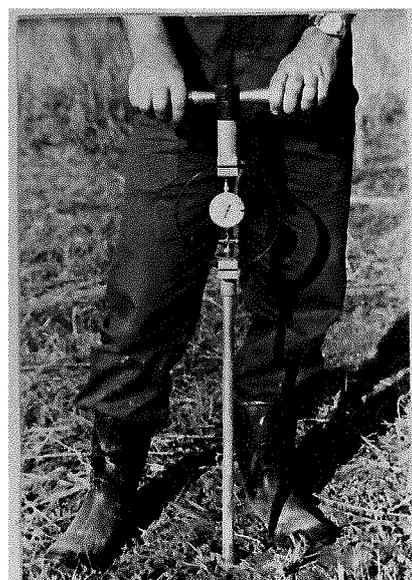


FIG.5 - Penetrômetro de cone marca SLOTEST, Ref.S-210

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Influência do aumento da densidade do solo na condutividade hidráulica saturada

4.1.1. Amostras com estrutura inalterada

Os valores de densidade do solo (d_s) e condutividade hidráulica saturada (K) obtidos com amostras de estrutura inalterada encontram-se na Tabela 3

Tabela 3. Valores de densidade do solo (g/cm^3) e condutividade de hidráulica saturada (mm/dia); estimativa do valor médio (\bar{X}) e desvio padrão (s%) obtidos com amostras de estrutura inalterada.

Repetições	Profundidade (mm)					
	0 - 100		200 - 300		500 - 600	
	d_s	K	d_s	K	d_s	K
1	1,36	133,11	1,60	19,83	1,49	39,32
2	1,39	76,68	1,61	19,36	1,50	45,39
3	1,42	62,45	1,69	13,14	1,51	30,89
4	1,44	52,13	1,70	12,44	1,52	28,21
5	1,45	53,92	1,71	17,31	1,53	30,48
6	1,46	96,46	1,77	9,29	1,58	24,40
\bar{X}	1,42	79,13	1,68	15,23	1,52	33,12
s %	0,04	31,19	0,06	4,24	0,03	7,76

Observando-se as estimativas dos valores médios de densidade do solo e condutividade hidráulica saturada apresentados na Tabela 3, verifica-se um incremento de densidade do solo na profundidade de 200 - 300 mm. Esse incremento foi evidenciado anteriormente no trabalho de MONDADORI & TAYLOR (1980), que constataram a existência de uma camada de solo compactada na profundidade de 250 mm.

Pela análise de distribuição do tamanho de partículas (Tabela 1), verifica-se que não ocorrem diferenças texturais acentuadas entre as profundidades estudadas. Isto exclui a possibilidade de que o aumento de densidade do solo na profundidade de 200 - 300 mm seja decorrente da translocação de argila de horizontes superiores, pois se esta profundidade fizesse parte de um horizonte de iluviação, segundo WINTERS & SIMONSON (1951), apresentaria estrutura bem desenvolvida e elevado teor de argila em relação à camada superficial.

O decréscimo dos valores de condutividade hidráulica saturada para as profundidades mais densas foi claramente evidenciado, pois a compactação restringe o movimento da água ao longo do perfil.

Apesar da heterogeneidade apresentada na profundidade de 0 - 100 mm, decorrente do contato direto com máquinas e implementos agrícolas, a variação entre os valores fornecidos pelas amostras coletadas nessa profundidade foi relativamente pequena. A variabilidade entre os valores de condutividade

de hidráulica pode ter sua explicação no fato de que nesta profundidade a maior parte do volume dos poros é constituída de poros grandes e, sendo a condutividade hidráulica relacionada à segunda potência do diâmetro do poro (equação 5), uma pequena variação de densidade do solo pode fazer variar profundamente a condutividade hidráulica.

A classificação da condutividade hidráulica para as profundidades estudadas é apresentada na Tabela 4, de acordo com o "U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering", (USDA, 1962)

Tabela 4. Classificação da condutividade hidráulica das profundidades estudadas.

PROFUNDIDADE (mm)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SA TURADA (mm/dia)	CLASSE (K = mm/dia)
0 - 100	79,13	LENTA (31.2 < K < 122.4)
200 - 300	15,23	MUITO LENTA (K < 31.2)
500 - 600	33,12	LENTA (31.2 < K < 122.2)

Nos resultados de condutividade hidráulica da Tabela 3, verificam-se variações. Alguns desvios fora do esperado nos valores de condutividade hidráulica devem ser atribuídos a diferenças no grau de saturação das amostras. Uma saturação completa pode-se conseguir apenas com a evacuação de todo o

ar da amostra, permitindo que a água escoe sem ar entre os espaços vazios. A saturação pode também ter influenciado in diretamente nos resultados, já que não foi controlado o tem po em que as amostras permaneceram saturadas. Em condições de submersão prolongada, as atividades de microorganismos podem causar a redução de forma apreciável da condutividade hidráulica pela obstrução dos poros do solo.

4.1.2. Amostras com estrutura alterada

Com a compactação artificial obtida em laboratório, a densidade do solo variou de $0,92 \text{ g/cm}^3$ a $1,31 \text{ g/cm}^3$; a con dutividade hidráulica saturada de $177,20 \text{ mm/dia}$ a $38,23 \text{ mm/dia}$, resultados estes mostrados na Tabela 5. Observa-se que os valores de condutividade hidráulica diminuem à medida que os valores de densidade do solo aumentam.

Trabalhando-se com solo seco não foi possível obter a mostra de estrutura alterada com valor de densidade do solo superior a $1,31 \text{ g/cm}^3$. Nas amostras com estrutura inaltera da, o menor valor de densidade do solo foi de $1,36 \text{ g/cm}^3$. En tretanto, mesmo com intervalos distintos de densidade do so lo, torna-se evidente que a alteração da estrutura do solo re duz consideravelmente os valores da condutividade hidráulica.

Tabela 5. Valores de condutividade hidráulica saturada em função da densidade do solo obtidos com amostras de estrutura alterada.

DENSIDADE DO SOLO (g/cm ³)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (mm/dia)
0,92	177,20
0,93	148,19
0,97	132,00
0,99	91,24
1,00	84,56
1,05	64,09
1,12	61,71
1,16	76,28
1,20	53,15
1,23	44,62
1,30	39,81
1,31	38,23

Nos ensaios de compactação, é admissível considerar que houve estratificação nas amostras o que pode ter influencia do no movimento vertical da água durante as determinações de condutividade hidráulica.

4.1.3. Relação entre densidade do solo e condutividade hidráulica saturada

Com os resultados das Tabelas 3 e 5 representados graficamente, foi possível definir que a função potencial $y = a \cdot x^{-b}$

é a que melhor descreve a relação entre densidade do solo e condutividade hidráulica saturada, tanto para o estado inalterado como para o alterado de estrutura do solo.

KOOLHAAS (1978), trabalhando com solo mais argiloso, encontrou uma função da mesma natureza para expressar a relação entre essas variáveis.

Através de análise de regressão, determinou-se pelo método dos mínimos quadrados os parâmetros a e b da função acima, obtendo-se as equações $K = 1776,02 d_s^{-9,29}$ com $r^2 = 0,92$ e $K = 103,33 d_s^{-3,79}$ com $r^2 = 0,89$, respectivamente para os valores obtidos com amostras de estrutura inalterada e alterada. Nessas equações, os valores de condutividade hidráulica saturada K são obtidos em mm/dia, em função da densidade do solo em g/cm^3 .

Na Figura 6 são mostradas as curvas representativas das equações acima. Observa-se que essas curvas tendem a se aproximar à medida em que os valores de densidade do solo aumentam. Entretanto, o intervalo de densidades do solo obtido com amostras de estrutura alterada não permite definir o comportamento dessa curva para maiores valores de densidade do solo. Contudo, admite-se que a aproximação relacione-se com a eliminação gradual do espaço poroso estrutural das amostras de estrutura inalterada, à medida que os valores de densidade do solo aumentam.

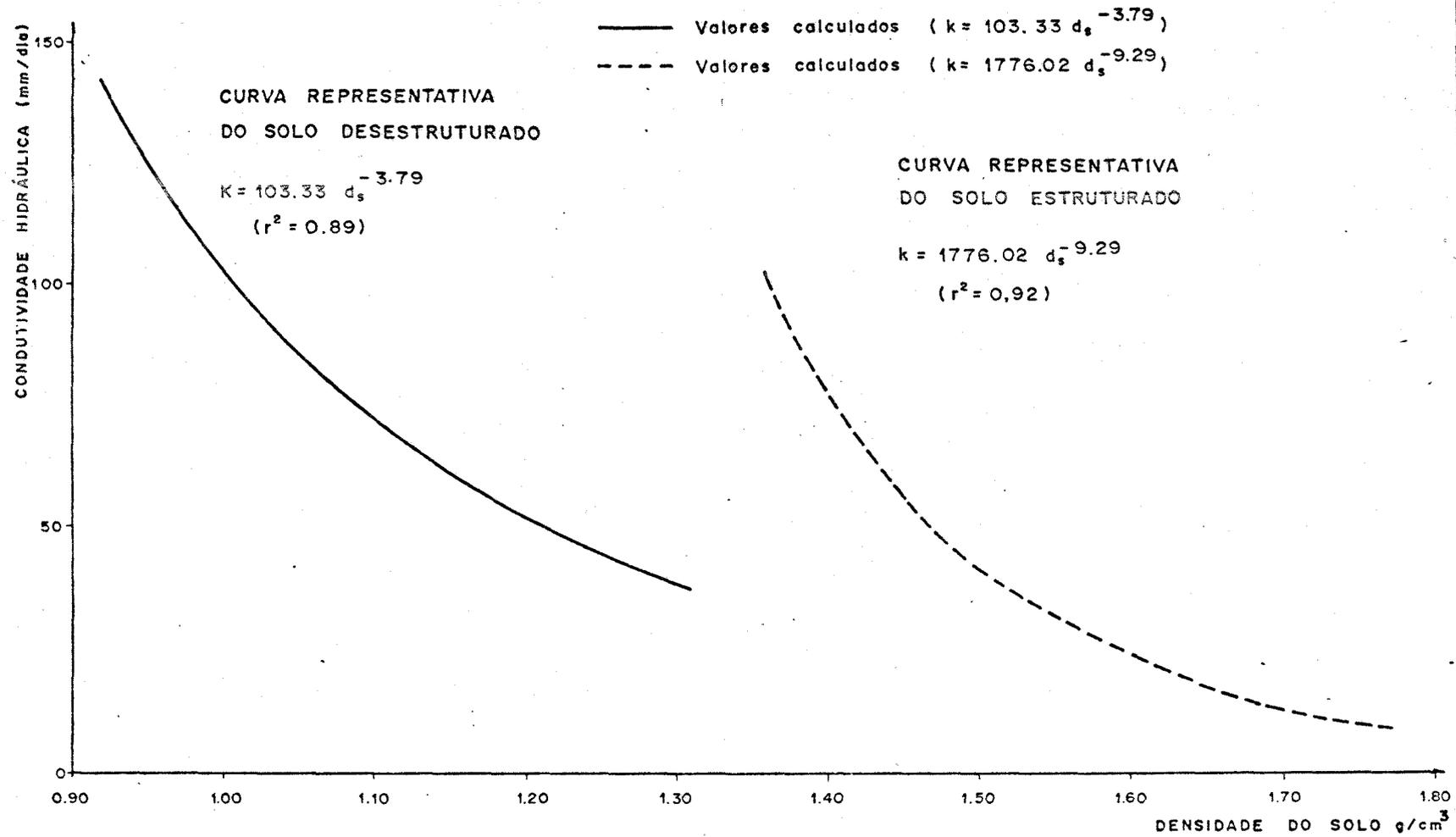


Fig. 6 - Relação entre densidade do solo e condutividade hidráulica saturada.

4.2. Compactação e umidade do solo

4.2.1. Resistência mecânica à penetração

Procurando-se obter uma relação que explicasse a influência do teor de umidade do solo na compactação, medidas de penetração foram efetuadas no campo ao redor da cada amostra de solo coletada. Os resultados obtidos com as leituras do penetrômetro, representados sob a forma de esforço de penetração, são apresentados na Tabela 6, juntamente com os valores de densidade e umidade volumétrica do solo correspondente ao momento de extração de cada amostra.

Para caracterizar por completo a relação entre as três variáveis da Tabela 6, utilizaram os resultados dessa tabela num modelo de regressão linear múltipla, elegendo-se "esforço de penetração" como função da umidade e densidade do solo.

Estimou-se, então:

$$E = 35,91 d_s - 10,96 U_v - 42,25, \text{ com } r^2 = 0,90 \quad (12)$$

onde

E = esforço de penetração, Kgf/cm^2

U_v = umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O/cm}^3$ solo

d_s = densidade do solo, g/cm^3

Tendo em vista o elevado coeficiente de determinação ($r^2 = 0,90$) calculado na análise de regressão, admite-se a função linear como satisfatória para representar a relação en

Tabela 6. Valores de densidade do solo (d_s), umidade volumétrica (U_v) e esforço de penetração (E) obtidos para cada amostra.

d_s (g/cm ³)	U_v (cm ³ H ₂ O/cm ³ solo)	E (Kgf/cm ²)
1,36	0,4464	2,6295
1,39	0,4558	2,3497
1,42	0,4692	2,3910
1,44	0,3917	9,2048
1,45	0,3809	5,3480
1,46	0,2764	4,7995
1,60	0,3294	11,9524
1,61	0,3555	12,1321
1,69	0,3074	15,1644
1,70	0,3213	14,2898
1,71	0,3089	15,3465
1,77	0,3195	19,0277
1,49	0,4217	7,3739
1,50	0,4261	7,9981
1,51	0,4312	6,3422
1,52	0,4418	4,1220
1,53	0,3591	9,0329
1,58	0,3544	11,1219

entre essas variáveis.

Verificando-se os sinais da equação de regressão obtida, observa-se que para uma variação na umidade do solo ocorre uma variação em sentido contrário no esforço de penetração. O teor de umidade modifica a coesão entre as partículas do solo, que é maior no solo seco, decrescendo à medida em que o

teor de água aumenta, provocando separação das partículas. Para uma variação na densidade do solo, ocorre uma variação no mesmo sentido no esforço de penetração. A porosidade influencia na densidade e quanto maior o volume de poros maior a liberdade para as partículas do solo deslocarem-se.

4.2.2. Influência da compactação na curva característica de água do solo

A Figura 7 mostra as curvas características de água no solo, obtidas de amostras com estrutura inalterada, representativas das profundidades em estudo. Observa-se que essas curvas apresentam deslocamento horizontal, indicando diferentes capacidades de retenção de água a uma determinada sucção. As profundidades representativas dos maiores valores de densidade do solo manifestam menor capacidade de retenção.

Essas desigualdades na capacidade de retenção devem ter explicação nas modificações estruturais do solo, provocadas pela compactação, já que o perfil não exhibe diferenças marcantes de textura.

Quanto mais compactado o solo, menor é o volume de espaços livres entre as partículas e menor o volume de poros na massa de solo, provocando redução no teor de água de saturação.

Observa-se que a curva representativa da profundidade de

0 - 100 mm é a que apresenta maior inclinação para baixas sucções (até 1 atm). É nessa profundidade onde grande número de poros deve apresentar tamanho relativamente grande, devido aos valores de densidade do solo encontrados. Assim, quando o solo está próximo da saturação, é fácil remover a água dos poros maiores.

Nas camadas mais compactadas, onde os poros maiores foram comprimidos pelas forças de compactação, observa-se que a redução inicial do conteúdo de água fica diminuída.

Apesar da falta de conhecimento da inclinação dessas curvas para valores maiores de sucção, por motivos explicados no item 3.3., acredita-se que as mesmas possam comportar-se de maneira semelhante sob condições de alta sucção, quando toda a água dos poros maiores for extraída e só os poros menores contenham água.

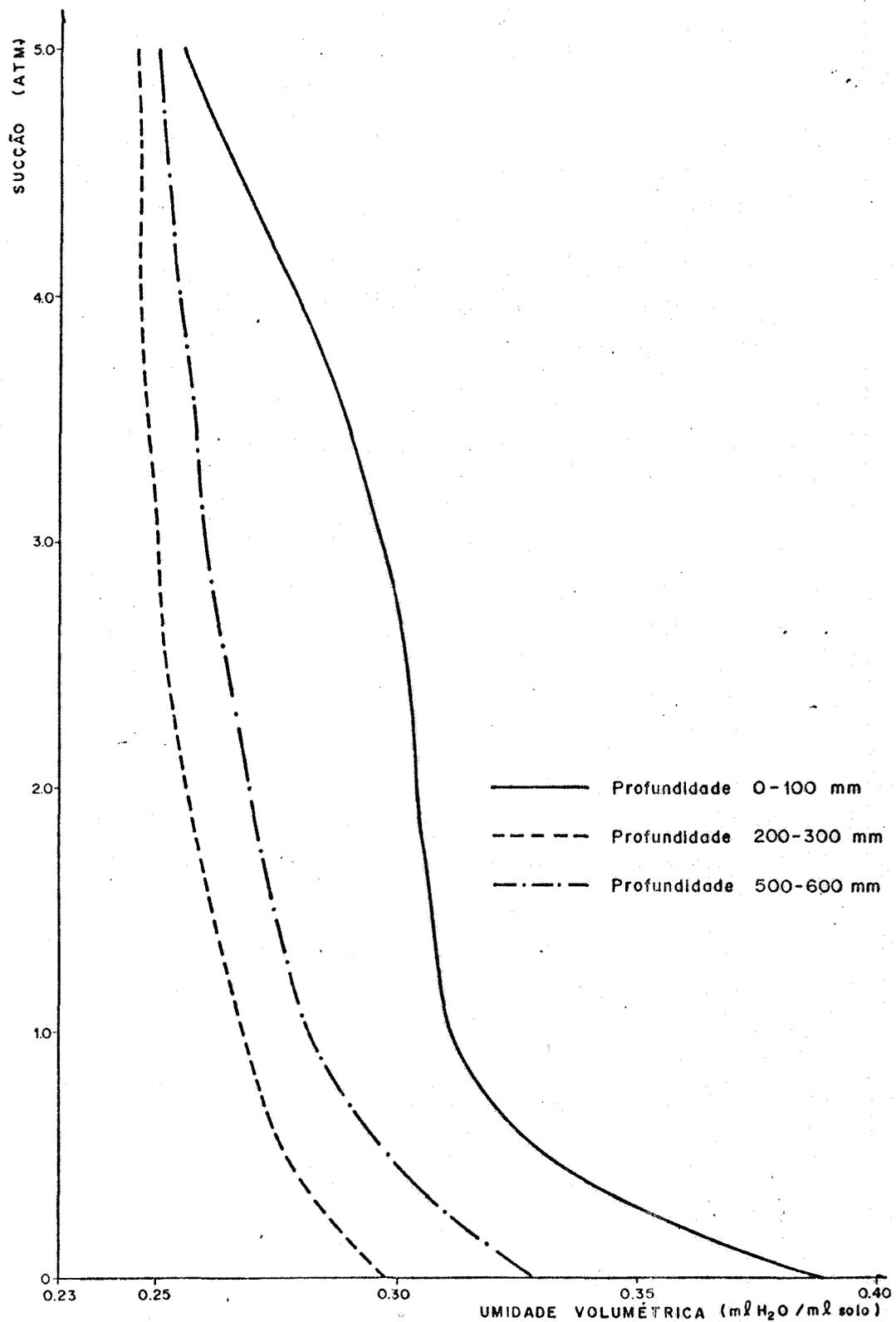


Fig. 7 - Curvas de retenção de umidade para as profundidades estudadas - (Amostras com estrutura inalterada)

5. CONCLUSÕES

Dentro das condições em que foi realizado o presente trabalho e de acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

1) a condutividade hidráulica saturada decresce com o aumento da densidade do solo, sendo a função $K = 1776,02 d_s^{-9,29}$ a que melhor descreve esta relação quando o solo encontra-se naturalmente estruturado e a função $K = 103,33 d_s^{-3,79}$ quando o solo encontra-se desestruturado;

2) a desestruturação do solo reduz consideravelmente a condutividade hidráulica saturada nas profundidades onde o solo apresenta valores menores de densidade do solo;

3) a resistência mecânica à penetração está intimamente relacionada à umidade e densidade do solo, segundo uma relação linear:

$$E = 35,91 d_s - 10,96 U_v - 42,25;$$

4) as profundidades representativas dos maiores valores de densidade do solo manifestam menor capacidade de retenção de água;

5) as determinações de densidade do solo na profundidade de 200 - 300 mm confirmam as observações de MONDADORI & TAYLOR (1980) sobre a existência de uma cama

da compactada a 250 mm de profundidade do solo;

- 6) considerando constante o gradiente hidráulico, a baixa condutividade hidráulica observada na profundidade de 200 - 300 mm reduzirá em aproximadamente 5 vezes o fluxo vertical que atravessa os primeiros 100 mm do solo.

O presente trabalho sugere uma continuação do estudo, aumentando o intervalo de densidade do solo e, principalmente, comparando o comportamento deste solo com outros das demais unidades de mapeamento que constituem a chamada "varzea arrozeira rio-grandense" a fim de verificar a possibilidade de uma generalização.

6. BIBLIOGRAFIA CITADA

- ALLISON, L.E. 1947. Effect of microorganism on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Science*, Baltimore, 63:439-50.
- BAVER, L.D.; GARDNER, Walter H.; GARDNER, Wilford R. 1973. *Física de Suelos*. México, UTEHA. 529p.
- BELTRAME, Lawson F.S. & TAYLOR, John C. 1980. Causas e efeitos da compactação do solo. *Lavoura Arrozeira*, Porto Alegre, 33(318):59-62, jan./fev.
- BELTRAME, Lawson F.S.; TAYLOR, John C.; CAUDURO, Flávio A. 1979. *Probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos em solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 79f.
- BOUWER, Herman & JACKSON, R.S. 1974. Determining soil properties. In: SCHILFGAARDE, J.V., ed. *Drainage of Agricultural Agronomy*. Cap.23, p.611-72.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. 1973. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul*. Recife. 43lp.
- BROOKS, R.H.; BOWER, C.A.; REEVE, R.C. 1956. The effect of various exchangeable cations upon the physical condition of soils. *Proceedings Soil Science Society of America*, Madison, 20:325-7.
- CHILDS, E.C. 1969. *An introduction to the physical basis of soil water phenomena*. New York, John Wiley. 493p.
- FORSYTHE, W. 1975. *Física de Suelos*. San José, IICA. 212p.
- GROHMANN, F. & QUEIROZ NETTO, J.P. 1966. Efeito da compactação de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz. *Bragantia*, Campinas, 25:421-31.
- HILLEL, Daniel. 1971. *Soil and Water*. New York, Academic Press. 288p.

- KESSLER, J. & OOTERBAAN, R.J. 1974. Determining hydraulic conductivity of soils. In: INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND IMPROVEMENT. *Drainage principles and applications*. Wageningen. V.3, Chap.24, p.253-96.
- KLUTE, A. 1965. Laboratory measurement of hidraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy. Pt.1, Chap.13, p.210-21.
- KOOLHAAS, Michel H. s.d. *Influencia de la compactación de un suelo en la conductividad hidráulica medida en el laboratorio; estudio especial*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 16f.
- MONDADORI, Helena & TAYLOR, John C. 1980. Compactação na unidade de solo Vacacaí I. *Lavoura Arrozeira*, Porto Alegre, 33(320):48-55, mar./abr.
- NELSON, W.E.; RAHI, G.S.; REEVES, L.Z. 1975. Yield potential of soybean as related to soil compaction induced by farm traffic. *Agronomy Journal*, Madison, 67:769-72, Nov./Dez.
- QUIRK, J.P. & SCHOFIELD, R.K. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Journal of Soil Science*, London, 6:163-78.
- REEVE, R.C.; LUTHIN, J.N.; DONNAN, W.W. 1967. Métodos para la investigación sobre drenaje. In: LUTHIN, James N. *Drenaje de tierras agrícolas*. México, Limusa Wiley. Cap. 4, p.439-510.
- REEVE, R.C.; BOWER, C.A.; BROOKS, R.H.; GSCHWEND, F.B. 1954. A comparison of the effects of exchangeable sodium and potassium upon the physical condition of soils. *Proceedings Soil Science Society of America*, Madison, 18: 130-2.
- RICHARDS, L.A., Chairman. 1952. Report of the subcommittee on permeability and infiltration, committee on terminology, Soil Science Society of America. *Proceedings Soil Science Society of America*, Madison, 16:85-8.
- SOANE, B.D.; PIDGEON, J.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J. D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. 1977. Compaction under wheels. *Soil and Water*, Stoneleigh, 5(4):2-6.

- TAYLOR, H.M. & BURNETT, A. 1964. Influence of soil strenght on the root growth habits of plants. *Soil Science*, Baltimore, 98:174-80.
- TSCHEBOTARIOFF, Gregory P. 1967. *Mecânica del Suelo*. Ma drid, Aguilar. 642p.
- USDA. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engeneering. 1962. *Soil Survey Manual*. Washington. 503p.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science*, Baltimore, 65:487-93.
- WIERSUM, L.K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores and their penetration by roots. *Plant and Soil*, The Hague, 9:75-85.
- WINTERS, E. & SIMONSON, R.W. 1951. The subsoil. *Advances in Agronomy*, New York, 3:1-19.

