

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTIMATIVA DA POROSIDADE DRENÁVEL POR DIFERENTES  
METODOLOGIAS**

**MARIA ZANE NOGUEIRA FEITOZA**

**RECIFE – PE**  
**MAIO DE 2006**

**MARIA ZANE NOGUEIRA FEITOZA**

**ESTIMATIVA DA POROSIDADE DRENÁVEL POR  
DIFERENTES METODOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da UFRPE como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

**ORIENTADOR:** Prof<sup>o</sup>. José Júlio Vilar Rodrigues

**CO-ORIENTADORES:** Prof<sup>o</sup>. Mário Monteiro Rolim

Prof<sup>o</sup>. Raimundo Nonato Távora Costa

**RECIFE – PE  
MAIO DE 2006.**

Ficha catalográfica  
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

F311e Feitoza, Maria Zane Nogueira  
Estimativa da porosidade drenável por diferentes  
metodologias / Maria Zane Nogueira Feitoza. -- 2006.  
v, 48 f. : il.

Orientador: José Júlio Vilar Rodrigues.  
Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade  
Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia.  
Inclui bibliografia e apêndice.

CDD 631.43

1. Porosidade drenável
2. Metodologia
3. Condutividade hidráulica
4. Macroporosidade
5. Física do solo
- I. Rodrigues, José Júlio Vilar
- II. Título

**ESTIMATIVA DA POROSIDADE DRENÁVEL POR  
DIFERENTES METODOLOGIAS**

**MARIA ZANE NOGUEIRA FEITOZA**

Dissertação defendida e aprovada em 05 de maio de 2006 pela Banca Examinadora

**ORIENTADOR:**

---

Profº. José Júlio Vilar Rodrigues, Ph.D

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Profº. Antonio Celso Dantas Antonino, Ph.D.

---

Profº. Emídio Cantídio de Oliveira Filho, Ph.D.

---

Profº. Marcus Metri Corrêa, Dr.

Aos meus pais Zezinho (“in memória”) e Maria, pela dedicação e exemplo de vida;

Às meus irmãos Zezíria (“in memória”), Zilmar (“in memória”), José, Zeumíria, Zilvam, Zilka, Flávio, Zilton e Reges pela ajuda, paciência, força e amizade que sempre nos uniu;

Ao meu esposo Normando, pelo incentivo, carinho, paciência, compreensão e amor;

Aos meus filhos Cybele e Fabrícus, partes do meu ser;

Aos meus sogros, Pereira e Donana, bons e verdadeiros amigos.

A Bia pelo incentivo e carinho meu muito obrigado.

DEDICO

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela sua infinita bondade e misericórdia;

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, pela parceria institucional e oportunidade de realizar este trabalho;

Ao convênio EAFI/EAFIC/EAFS/UFRPE, que possibilitou a minha admissão no curso de mestrado, nas pessoas do Prof. Dr. Fernando Freire e Prof. Dr. Emídio Cantídio;

À Universidade Federal do Ceará, pela aceitação da realização do experimento em seu campus e indicação de co-orientador;

À Escola Agrotécnica Federal de Iguatu-CE, pela minha liberação;

Ao meu pai (in memória) e minha mãe, em especial, pelos quais tenho o mais absoluto orgulho, admiração e respeito;

Ao Prof. Dr. José Júlio Vilar Rodrigues, pela sua colaboração e empenho na minha orientação;

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora (co-orientador), pelo apoio, colaboração, orientação e amizade demonstrada;

Ao Prof. Dr Mário Monteiro Rolim (co-orientador), pela orientação e amizade.

A todos os docentes do programa, pelos ensinamentos e apoio, nos momentos necessários;

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em nome de Socorro e Noca, pelo atendimento e qualidade no ambiente de trabalho do programa;

Aos servidores administrativos da Universidade Federal do Ceará, Dr. Almiro Tavares Medeiros, e Francisco José da Silva, e ao colega Neuzo Batista de Moraes, pela colaboração e amizade;

Ao estagiário do Departamento da Universidade Federal do Ceará, Júnior, pela colaboração e amizade.

Aos colegas de curso, pela amizade e companheirismo;

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

# SUMÁRIO

## RESUMO

## ABSTRACT

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	03
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	04
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	14
3.1 Caracterização do estudo	14
3.2 Metodologia com rebaixamento do lençol freático	14
3.3 Metodologia com equação empírica de van Beers	18
3.4 Metodologia da ABNT	20
3.5 Metodologia com uso da curva característica de umidade do solo	21
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	25
4.1 Análise granulométrica dos solos	25
4.2 Estimativa da porosidade drenável do solo pelo método de Taylor	25
4.3 Estimativa da porosidade drenável do solo pela equação de van Beers --	27
4.4 Estimativa da porosidade drenável do solo conforme a ABNT	29
4.5 Estimativa da porosidade drenável do solo pela curva característica	30
<b>5. CONCLUSÕES</b>	33
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	34
<b>7. APÊNDICES</b>	40

# ESTIMATIVA DA POROSIDADE DRENÁVEL POR DIFERENTES METODOLOGIAS

Autora: Maria Zane Nogueira Feitoza.

Orientador: Prof. Dr. José Júlio Vilar Rodrigues.

## RESUMO

: O estudo teve por objetivo estimar a porosidade drenável por diferentes metodologias. Foram utilizadas quatro metodologias baseadas no rebaixamento do lençol freático, equação empírica de van Beers, **ABNT** e curva característica da umidade do solo. No estudo do rebaixamento do lençol freático utilizou-se um modelo físico constituído por três tanques de alvenaria, medindo 1,5 m de altura, 2,0 m de largura e 1,5 m de comprimento, existentes em área do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará – UFC. Na metodologia de van Beers utilizou-se o permeâmetro de carga constante, e na ABNT e curva característica o aparato de Haines. Foram utilizadas três classes de solos com composições granulométricas diferenciadas. Um permeâmetro de carga constante foi utilizado para o cálculo da condutividade hidráulica do solo saturado (**K<sub>o</sub>**) para estimativa da porosidade drenável (**f**) pela equação empírica proposta por van Beers. Na implementação da metodologia preconizada pela **ABNT** utilizou-se amostras indeformadas coletadas nos tanques, nas profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, e levada a um funil de Bückner à tensão de -60 cm de coluna de água. Na metodologia da curva característica utilizou-se amostras coletadas nos tanques 01, 02 e 03, nas profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, e levada ao funil de Bückner, saturadas e submetidas a colunas de água (Potencial Mátrico) de (-1, -3, -5, -10, -15, -20, -30, -40, -50 e -60 cm) sendo calculados os conteúdos volumétricos de água em equilíbrio com estas tensões. A porosidade drenável foi obtida plotando-se as curvas correspondentes às profundidades de 0,0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m, e calculando-se, por integração numérica, o volume de água resultando da diferença de área entre as curvas sucessivas. Usando-se o método do rebaixamento do lençol freático como referência, foi observado que o método de van Beers forneceu os piores resultados, e as melhores correlações foram obtidas pelo método da curva característica.

**Palavra chave:** Porosidade drenável, metodologia, condutividade hidráulica, macroporosidade.



# ESTIMATING THE DRAINABLE POROSITY USING DIFFERENT METHODOLOGIES

## ABSTRACT

This study had as its objective to estimate the drainable porosity through different methodologies. Four methods were utilized: the first one was based upon the water table drawdown in a soil filled tank; the second one based upon the Van Beers empirical equation, the third one through the **ABNT** recommendation, and the last one based upon the water release curve. Three soils with different granulometric composition were used. In the water table drawdown study a physical model made up of three brick and masonry tanks measuring 1.5 x 2.0 x 1.5 m ( Height, Width and Length) which were situated within the area of the Laboratório de Hidráulica e Irrigação of the Universidade Federal do Ceará –UFC were used. Drainable porosity from this method were obtained from the volume of water drained as a result of lowering the water table from 0 to 0.20 m, 0.20 to 0.40 m and 0.40 to 0.6 m. respectively. In the VanBeers method a constant head permeameter was utilized to obtain the saturated hydraulic conductivity (**K<sub>o</sub>**) where the drainable porosity (**f**) was obtained by correlation. In the **ABNT** method a Haines funnel apparatus was used to obtain the volumetric water content at a water column height ( equal to the Matric Potential) of 60 cm. Three undisturbed soil cores were taken at 0.10, 0.30 and 0.50 m, and drainable porosity calculated by the difference of this volumetric water content and total porosity. In the water release curve method core samples taken from the same depths of the **ABNT** method, were saturated and volumetric water content at the tensions ( Matric Potential ) of -1, -3, -5, -10, -15, -20, -30, -40, -50 and - 60 were calculated . Drainable porosity was obtained by plotting the curves representing the depths of 0 to 20 cm, 0 to 40 cm and 0 to 60 cm, and calculating, by numerical integration, the water volume differences between each successive curves. Using the water table drawdown method as the standard, it was observed that the Van Beers method gave the poorest agreement, where the best correlation were obtained by the water release curve method.

## 01 INTRODUÇÃO

A porosidade drenável, também denominada porosidade livre de água ou porosidade efetiva, é definida como o volume de água que é drenada livremente por unidade de volume de solo, através do rebaixamento do lençol freático Cruciani, (1989). Beltran (1986) e Pizarro (1978) definem porosidade drenável como uma fração da porosidade total na qual a água se move livremente, cujo valor equivale ao conteúdo de ar presente no solo na capacidade de campo.

A porosidade drenável pode ser determinada usando métodos de campo e de laboratório, e ainda, estimada em função de algumas propriedades do solo ou equações empíricas. A determinação da porosidade drenável em campos experimentais de drenagem ou modelos reduzidos de laboratório pode ser feito por meio de medições simultâneas de cargas hidráulicas e descarga de drenos, sendo os resultados mais representativos das condições reais, por envolver um volume maior de solo, o que contribui para a redução da variabilidade espacial dos dados (Queiroz, 1997).

Na impossibilidade de estimativa da porosidade drenável, van Beers sugere estimá-la a partir do valor da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), (Beltran, 1986). Sua determinação em laboratório é obtida pela diferença entre o conteúdo de água na saturação e na capacidade de campo, sendo essa metodologia sugerida pela ABNT (1998).

A porosidade drenável é um parâmetro hidrodinâmico do solo de grande importância para fins de dimensionamento de sistema de drenagem subterrânea, portanto constitui variável necessária para o cálculo do espaçamento entre drenos para condições de fluxo variável, quanto para o cálculo do coeficiente de drenagem subterrânea.

O presente estudo teve como objetivo determinar a estimativa da porosidade drenável em três unidades de solo e proceder a uma análise comparativa, por meio do rebaixamento do lençol freático e descarga de drenos, da equação empírica sugerida por van Beers, da metodologia sugerida pela ABNT e da curva característica de umidade do solo.

## 02 REVISÃO DE LITERATURA

Depois de cessada a precipitação ou irrigação, a camada superior do solo que foi saturada não retém toda a água, surgindo um movimento descendente em resposta aos gradientes de potencial gravitacional e potencial de pressão. Esse movimento da água no perfil do solo após a infiltração é denominado drenagem ou redistribuição interna. Dependendo das condições existentes, a velocidade com que a redistribuição ocorre pode ser apreciável por muitos dias ou torna-se rapidamente desprezível. A intensidade da redistribuição e sua duração determinam a capacidade de armazenamento do solo. Essa é uma propriedade importante no estudo de várias questões da engenharia de recursos hídricos, tornando-se fundamental em projetos de irrigação (Tucci, 2001).

A drenagem é uma técnica que, se bem utilizada, viabiliza a exploração agrônômica, tornando-a economicamente viável, em áreas com problemas de arejamento no solo, de mecanização agrícola e de imobilização de nutrientes provocada por excesso de água no solo. A drenagem se destina a eliminar e/ou controlar a umidade excessiva no solo, consiste no rebaixamento do lençol freático, por meio da construção de drenos. Esta operação permite o aproveitamento racional dos recursos naturais solo e água (Lamster, 1980).

O teor de água do solo na capacidade de campo é função, entre outros fatores, da textura do mesmo, geralmente variando de 15 a 45% do volume. As plantas podem extrair facilmente água de um solo quando sua umidade está próxima da capacidade de campo. À medida que o solo começa a secar, entretanto, os potenciais matriciais mais negativos seguram a água do poro até um determinado ponto, quando as plantas não podem mais extrair qualquer água do solo. Esse estado de umidade do solo é chamado de “ponto de murcha”. A umidade ou teor de água no solo no ponto de murcha geralmente varia de 5 a 25% do volume (Sands, 2001).

A drenagem subsuperficial fornece um caminho para que a água “excessiva” ou “drenável” deixe o solo. A água drenável é retida por potenciais matriciais menos negativos, com teores de umidade entre a capacidade de campo e a saturação do solo.

As areias ou solos de textura mais grosseira têm grandes porosidades drenáveis, enquanto as argilas ou solo de textura mais fina têm menores porosidades drenáveis. Isso significa que para uma mesma quantidade igual de água drenada, um

solo mais arenoso vai mostrar uma menor queda do lençol freático do que um solo de maior teor de argila (Sands, 2001).

O espaço poroso de um solo é a porção ocupada pelo ar e pela água. O tamanho deste espaço poroso é determinado principalmente pela distribuição e arranjo das partículas sólidas (Buckman & Brady, 1989).

Kiehl (1979) define a porosidade como sendo o volume de vazios ou ainda o espaço do solo não ocupado pela “matriz” (conjunto dos componentes orgânicos e inorgânicos).

A porosidade do solo é normalmente expressa em % e, segundo Hillel et al. (1972) os valores de porosidade total geralmente encontram-se na faixa de 30 a 60%, variando conforme o tipo de solo. No entanto, valores fora destes limites podem ser encontrados em função da textura e estrutura dos mesmos. A porosidade é uma característica física do solo que pode ser alterada pelo manejo do mesmo (Hillel et al. 1972; Ferreira, M.M & Dias, 2001).

Segundo Ritzema (1994) poros grandes retêm pouca ou nenhuma água, mais são muito efetivos na condução de água sob condições saturadas ou próximas as saturações (encharcamento, ou chuva que causa empossamento). O oposto é verdadeiro para poros pequenos, que têm por função a retenção da água, e conduz a água lentamente. Parte da água nesses poros pode ser absorvida pelas raízes das plantas. Quando considerado o tamanho e a função dos poros, pode-se fazer a distinção entre microporos (3 a 30  $\mu\text{m}$  de diâmetros), mesoporos (30 a 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro) e macroporos (maior que 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro). O solo com a distribuição de tamanho de poros ótimo para o crescimento da planta tem suficiente micro e mesoporos para reter água, e suficiente macroporos para drenar o excesso de água. Os macroporos são principalmente criados pela fauna do solo (minhocas, etc), de modo que o aumento da população da fauna do solo é uma maneira de melhorar as condições de drenagem e aeração do solo.

A distribuição do tamanho de poros, que influencia fortemente as propriedades de retenção de água e de transmissão de água no solo, é de grande importância para os processos físicos que ocorrem no solo. Ela pode ser verificada qualitativamente por observação visual num perfil do solo. Macroporos são visíveis a olho nu; mesoporos são visíveis a um aumento de 10 vezes; microporos não são visíveis, mas a sua presença pode alguma vez ser deduzida a partir das faces dos agregados, por meio de

uma superfície grosseira indicando a presença de microporos. Não há métodos de campo disponível para a avaliação quantitativa da distribuição de poros (Ritzema, 1994).

A porosidade total também pode ser classificada em micro e macroporosidade. A microporosidade, também denominada de porosidade capilar, representa a proporção de poros existentes no solo, responsáveis pela retenção da água, enquanto a macroporosidade representam a proporção de macroporos, responsáveis pela drenagem e aeração (Brady 1979; Kiehl, 1979). White (1985) afirma que, embora os macroporos possam compreender apenas uma pequena fração do volume total do solo, eles podem ter um profundo efeito sobre a taxa de infiltração e redistribuição da água no solo.

Klar (1988) observa que, de modo geral, quanto maior a porosidade total, maior a capacidade do solo em armazenar água. Conseqüentemente, os solos argilosos (textura fina) geralmente apresentam maior capacidade de retenção e distribuição de água às plantas que os solos arenosos (textura grossa). Segundo Buckman & Brady (1989), apesar de um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao predomínio de macroporos, que permite maiores movimentos de água e do ar.

A porosidade do solo é a propriedade que interfere na aeração, condução e retenção de água, capacidade de penetração e ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (Tognon, 1991).

Para Bertoni & Lombardi Neto (1990), a perda da porosidade está associada à redução do teor de matéria orgânica, à compactação e ao efeito do impacto das gotas das chuvas, diminuindo o tamanho dos agregados.

A arquitetura dos poros dos solos tem estreita relação com a estrutura, e esta com o manejo e natureza química da solução do solo. Costa et al. (1991) verificaram os efeitos da natureza química da solução do solo sobre as propriedades físicas, ressaltando a ação desagregante do sódio, o qual promove a dispersão dos colóides trazendo implicações diretas sobre o índice de agregação e conseqüentemente sobre a porosidade do solo.

O estudo da água subterrânea, realizado através da estimativa e avaliação das propriedades físicas do solo, constitui o aspecto principal para definição dos problemas

de drenagem. Dentre os principais parâmetros hidrodinâmicos do solo, destacam-se a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ) e a porosidade drenável ( $f$ ). A condutividade hidráulica, que representa a capacidade do solo de transmitir água, é necessária ao cálculo do espaçamento entre drenos, em condições de regime de fluxo permanente ou não permanente. Já a porosidade drenável, que compõe a fração do volume do solo por onde a água se movimenta e drena após exceder a capacidade de campo, é necessária, juntamente com a condutividade hidráulica, para o cálculo do espaçamento entre drenos em condição de regime de fluxo não permanente e importante para a caracterização de critérios de drenagem (Soares, 1996). Portanto, uma análise adequada destes parâmetros constitui um aspecto de fundamental importância no planejamento do sistema de drenagem subterrânea.

A porosidade drenável, também é chamada de macroporosidade ou de porosidade efetiva, é definida como a fração da porosidade total através da qual a água move-se livremente, cujo valor equivale ao conteúdo de ar presente no solo na capacidade de campo (Pizarro, 1978; Beltran, 1986). Segundo Skaggs et al. (1973), a porosidade drenável representa a fração do volume de solo drenado durante o processo de rebaixamento do lençol freático. Assim, sendo  $V_a$  volume de água drenado livremente de um volume de solo  $V_s$ , a porosidade drenável pode ser expressa como:  $f = V_a/V_s$ .

Vários autores (Taylor, 1959; French & O'callaghan, 1966; Pizarro, 1978) definem porosidade drenável, efetiva ou macroporosidade como sendo a porcentagem de poros ocupados por ar quando a água que excede a capacidade máxima de retenção do solo tem sido drenada livremente, podendo ser determinada pela diferença entre a porosidade total ou a umidade volumétrica de saturação ( $\theta_s$ ) e o conteúdo de água correspondente à umidade volumétrica na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ). Já Medina & Grohmann (1966) apresentam uma definição prática da porosidade drenável ou macroporosidade como a fração do volume de poros cheios de água que pode ser drenado quando submetido à tensão da ordem de - 60 a - 100 cm de coluna de água. Essa propriedade física também é definida como volume de água drenada de um solo, por unidade de volume desse solo, quando o lençol freático é baixado de uma posição vertical  $Z_{n-1}$  em relação à superfície do solo, para uma posição  $Z_n$ , Taylor (1959); Bouwer & Jackson (1974).

O espaço poroso drenável é também chamado de porosidade drenável, ou porosidade efetiva. É uma quantidade adimensional, normalmente expressa como uma porcentagem, cujo valor varia de menos 5% para material argiloso, até 35% para areias grossas e areias cascalhentas (Ritzema, 1994).

Os valores da porosidade drenável (**f**), segundo Pizarro (1978) podem variar, conforme a textura do solo, de aproximadamente 2,0% a 27,0%. Os valores médios de (**f**) encontrados pelos autores, a seguir, variam conforme o tipo de solo pesquisado: Queiroz (1987), **f** = 1,4 a 5,2%; Suguino et al. (1988), **f** = 7,0 a 24,0%; Costa (1988), **f** = 2,5 a 5,3%; Souza (1991), **f** = 16,0%; Pontes et al. (1992) **f** = 9,0 a 20,0%.

Valores representativos da porosidade drenável (**f**), para uso nas equações de regime de fluxo não permanente, são difíceis de medir-se com precisão. Entretanto, um erro na estimativa de (**f**), de aproximadamente 25%, resultará um erro no cálculo do espaçamento entre drenos, equivalente a 10% (FAO, 1986).

A porosidade drenável pode ser determinada usando-se métodos de campo e de laboratório e, ainda, estimada em função de algumas propriedades do solo.

Investigações de campo evidenciam que a porosidade drenável varia não só com a textura, mas também com a profundidade do lençol freático (LF) ou com a carga hidráulica (Buckland et al., 1986; Queiroz, 1997). Quando outras condições não causam variação, a porosidade drenável aumenta com o aumento da profundidade do lençol freático (LF). Determina-se em laboratório pela diferença entre o conteúdo de água na saturação e na capacidade de campo (Pizarro, 1978; Beltran, 1986; Millar, 1988). Desta forma, já que o conteúdo de água na saturação é constante, a porosidade drenável varia com o conteúdo de água na Capacidade de Campo, cujo valor não é constante para um tipo de solo, mas varia com a situação de campo.

A determinação da porosidade drenável em áreas experimentais de drenagem ou em modelos reduzidos de laboratório pode ser feita por meio de medições simultâneas das cargas hidráulicas (**h**) e da descarga de drenos (**q**), onde os resultados obtidos são mais representativos em condições reais estudadas, por envolver um volume maior de solo para as determinações, o que contribui para a redução da variabilidade espacial dos dados (Queiroz, 1997). Por meio dos métodos tradicionais de laboratório, podem-se reunir informações de todos os parâmetros requeridos, mas em condições de acentuada variabilidade do perfil do solo é desejável apoiar-se em resultados de campo. A vantagem dos testes de campo é a coleta em pouco tempo de

um grande número de informações, tais como: condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento, além do fornecimento de informações sobre as condições experimentais de profundidade e espaçamento de drenos, Amorim (1995). Buckland et al. (1986) comentam que as melhores estimativas de (**f**) são obtidas em condições de campo, salientando, porém que tais determinações não são práticas para investigações rotineiras de drenagem. A dificuldade e o elevado custo de determinação (**f**) no campo, tem provocado a utilização de métodos mais econômicos, baseados na utilização de curvas e de quadros empíricos de outros solos, FAO (1980). No entanto, os custos e a infra-estrutura necessária para a determinação em campo tornam este método inviável para fins de projeto de drenagem.

Taylor (1959) descreveu um procedimento de determinação da porosidade drenável em colunas de solo por meio de medidas do rebaixamento do lençol freático e do volume de água drenado, tendo utilizado a seguinte expressão:

$$f = \frac{V_a}{A(Z_n - Z_{n-1})} \quad \text{Equação (1)}$$

sendo:

**f**: porosidade drenável do perfil do solo, em  $[L^3.L^{-3}]$ ;

**V<sub>a</sub>**: volume de água drenada do perfil, quando o lençol freático passa de  $Z_{n-1}$  a  $Z_n$ , em  $[L^3]$ ;

**A**: área da seção da coluna de solo drenado,  $[L^2]$ ;

**Z<sub>n</sub>**: profundidade final do lençol freático, em  $[L]$  e.

**Z<sub>n-1</sub>**: profundidade inicial do lençol freático, em  $[L]$ .

Em sistema de drenagem já instalado, a porosidade drenável pode ser calculada a partir de medidas simultâneas de alturas do lençol freático e descarga de drenos em função do tempo (Dieleman & Trafford, 1976; Millar, 1978; Braun & Kruijne, 1994).

Conforme Beltran (1986), a porosidade drenável pode ser determinada em uma curva característica de umidade do solo pela diferença entre a umidade volumétrica correspondente à saturação e a capacidade de campo. O inconveniente deste método é a escassa representatividade que tem uma pequena amostra indeformada ou não, tendo a necessidade de várias amostras para obter valores médios, que represente a



tendência da porosidade. A relação funcional entre a umidade do solo e seu respectivo potencial mátrico, denomina-se de curva característica de umidade do solo. Gardner et al. (1922), utilizando um tensiômetro com cápsula porosa foi um dos primeiros pesquisadores a identificar tal relação. Haines (1930) desenvolveu o método hoje largamente utilizado em laboratório e conhecido como método do funil de placa porosa ou funil de Haines. Posteriormente, Richards (1941) descreveu o aparelho de membrana de pressão conhecido como câmara de pressão de Richards. Estes dois equipamentos são atualmente utilizados com larga frequência e de forma conjunta em laboratórios de física de solos, sendo o funil de Haines para valores de potencial mátrico entre -100 e 0 cm de coluna de água, e a câmara de pressão de Richards, para valores entre -15000 e -100 cm de coluna de água.

Na impossibilidade de determinação experimental de estimativa da porosidade drenável, van Beers sugere estimá-la a partir do valor da condutividade hidráulica do solo saturado (**K<sub>o</sub>**), (Beltran, 1986; Pizarro, 1978), conforme a equação:

$$f = \sqrt{K_0 (cm/dia)} \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo (**f**) a porosidade drenável em [L<sup>3</sup>.L<sup>-3</sup>] e (**K<sub>o</sub>**) a condutividade hidráulica em [cm.dia<sup>-1</sup>].

De acordo com FAO (1986), as medições de porosidade drenável, determinadas em laboratórios, realizadas com amostras de solo indeformadas, não são representativas para serem utilizadas em projetos de drenagem, devido às pequenas dimensões e à destruição parcial da estrutura do solo.

Fernandes et al. (1989) ao realizarem estudo de estimativa da porosidade drenável (**f**), em função da condutividade hidráulica do solo saturado (**K<sub>o</sub>**), em um solo orgânico, verificaram que a equação obtida do gráfico proposto pelo United State Department of the Interior, apresentou satisfatório ajuste aos dados de (**f**) e (**K<sub>o</sub>**).

Galdino (1988), ao investigar algumas características de solo de várzea, verificou que o modelo empírico proposto por van Beers não foi eficaz na estimativa da porosidade drenável. Resultado similar foi obtido por Otto (1988).

Ao estudar sistemas de drenagem em regime de fluxo não permanente, Sediya et al. (1990) verificaram que o efeito da porosidade drenável depende

principalmente dos critérios de drenagem, da profundidade dos drenos e da recarga do lençol freático.

A condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas do solo mais importante na determinação quantitativa e qualitativa do movimento de água no solo e no dimensionamento do sistema de drenagem.

Investigando a variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado (**K<sub>o</sub>**) pelo método do furo do trado, Rogers et al. (1991) verificaram que os valores obtidos mostraram variação espacial moderada e que estes valores podem ser utilizados para prognosticar a profundidade do lençol freático e os movimentos das substâncias químicas dissolvidas no perfil do solo.

O fator de proporcionalidade **K<sub>o</sub>** da equação de Darcy é uma propriedade do meio poroso que traduz sua capacidade de transporte do líquido que o atravessa. Seu aumento, portanto, depende das propriedades do meio e do líquido. Sendo o solo o meio poroso de interesse, as principais propriedades que afetam o fator **K<sub>o</sub>** são: textura, tortuosidade, porosidade, densidade do solo, estabilidade estrutural, tamanho dos agregados, atividade de microrganismos, presença de ar e composição química do solo, Hillel et al. (1972). Quando o solo fica submerso por longos períodos de tempo, os processos de natureza física, química e biológica podem atuar com maior intensidade, exercendo grande influência na condutividade hidráulica, Klute (1965). Reichardt (1996) reitera que a condutividade hidráulica varia enormemente de solo para solo e dentro de um mesmo solo, devido a variações estruturais, compactação, teor de água no solo, expansão e contração do solo, migrações de partículas de argila segundo o fluxo e entre outras características do meio.

A determinação da condutividade hidráulica do solo pode ser feita por métodos de laboratório e de campo. No laboratório é possível atingir um grau de precisão e refinamento muito superior ao campo, devido ao elevado grau de controle das condições experimentais. Por outro lado, nas condições de campo, não obstante o grau de complexidade, as medidas são feitas em condições naturais e com perturbação mínima do solo (Carvalho et al., 2004). Segundo Louzada (1988), os métodos de campo devem ter preferência, tendo em vista o volume de solo envolvido.

Vários são os métodos, de campo e de laboratório, empregados na estimativa da condutividade hidráulica (Pizarro, 1978; Millar, 1988; Klar, 1988; Cruciani, 1989; Libardi, 1995). Os métodos de laboratório mais conhecidos na literatura são:

permeâmetro de carga constante e permeâmetro de carga variável. Conforme Carvalho et al. (2004), a condutividade hidráulica determinada em laboratório por meio de permeâmetro exige menor esforço físico, além de ser relativamente prática e rápida, porém requer bastante atenção na coleta e preparação das amostras indeformadas, para evitar qualquer tipo de desagregação estrutural adicional.

A condutividade hidráulica saturada é um dos principais parâmetros utilizados no cálculo do espaçamento entre linhas de dreno, seja para condições de fluxo em regime permanente ou variável. Neste último caso, seu valor é usado juntamente com a porosidade drenável (Bouwer & Jackson, 1974; Cruciani, 1983).

Em condições de campo, para determinações abaixo do lençol freático, os métodos mais destacados, pela fácil operacionalidade e precisão são: furo de trado, indicados para solos de perfil homogêneo (não estratificados) e piezômetro, indicado para perfis com estratos bem definidos (Otto, 1988).

Na estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado para fins de dimensionamento de sistema de drenagem, os métodos de campo devem ser preferidos (Kessler & Oosterbaan, 1973; Cruciani, 1989; FAO, 1986). Saunders et al. (1978) em estudos da condutividade hidráulica em condições de campo, justificam tal processo em função da maior aproximação das condições reais, pois em condições de laboratório utilizam-se simples amostras de solo que podem conduzir a grandes erros, ocasionados por alterações das condições naturais do solo.

Bouwer & Jackson (1974), avaliando diversas técnicas para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, asseguram que o método mais efetivo é por meio das medidas das descargas dos drenos e posição do lençol freático. Observam ainda, que a variabilidade é muito maior a partir dos erros na medição da condutividade hidráulica, do que os relacionados aos métodos de medidas.

Em solos estratificados, tais como os solos aluviais, a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ), medida pelo método auger-hole (poço), varia consideravelmente. Numerosos testes em um solo franco-siltoso e franco-argilo-siltoso identificaram que a condutividade hidráulica varia não somente entre os poços (variabilidade do solo), mas também com a profundidade do poço, profundidade do lençol freático e profundidade da água removida do poço (Rogers & Carter, 1987).

Pizarro (1978) afirma que os métodos de laboratório apresentam como inconvenientes a pouca representatividade de uma amostra de solo de tamanho reduzido e a dificuldade de obtenção de amostras com estruturas indeformadas.

De acordo com Cruciani (1983), a literatura é unânime em afirmar que os métodos de laboratório oferecem resultados aproximados, sendo recomendado em estudo de drenagem apenas quando os métodos de campo são impraticáveis. Kamra & Rao (1985) afirmam que os métodos de campo fornecem resultados com variações menores do que os métodos de laboratório. Para Millar (1988) os métodos de campo, além de mais precisos, fornecem resultados mais reais para aplicação nos cálculos de drenagem subterrânea.

O método do furo de trado, conhecido na literatura internacional como “auger hole method”, tem sido amplamente empregado em pesquisa de drenagem por sua rapidez e representabilidade de um considerável volume de solo natural, o que tende a reduzir a variabilidade nos dados.

Kessler & Oosterbaan (1973) denominam de condutividade hidráulica o fator de proporcionalidade **K<sub>o</sub>** da equação de Darcy para o fluxo da água no solo, e que representa sua propriedade de transmissão de água, que depende principalmente do número e diâmetro dos poros presentes. Se estes estão uniformemente distribuídos, o solo é considerado homogêneo ou isotrópico para tal propriedade, ou seja, a condutividade hidráulica é a mesma em todas as direções. Por outro lado, se os solos apresentam estratificação, de forma que a condutividade hidráulica varia de um ponto a outro, denominam-se heterogêneo ou anisotrópico.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do estudo

No estudo realizou-se uma análise comparativa dos valores de porosidade drenável obtidos pelos seguintes métodos: a) método direto (Taylor, 1959); b) equação empírica de van Beers (1965); c) ABNT (1998); e d) curva característica de umidade do solo.

Três solos de composições granulométricas diferentes (areia, areia e franco argilo arenoso) foram utilizados para o cálculo da porosidade drenável, acondicionados em um modelo físico constituído por três tanques de drenagem (Figura 1). As camadas de solo corresponderam às profundidades de 0,00 – 0,20 m, 0,20 – 0,40 m e 0,40 – 0,60 m.



**Figura 1.** Modelo físico de drenagem.

#### 3.2 Metodologia com rebaixamento do lençol freático (Método de Taylor)

A porosidade drenável (Skaggs et al., 1973), representa a fração do volume de solo drenado durante o rebaixamento do lençol freático. A seguinte equação para estimativa da porosidade drenável (Taylor 1959), foi utilizada:

$$f = \frac{V_a}{A(Z_n - Z_{n-1})}$$

Equação (3)

sendo:

Va: volume de água percolada [L<sup>3</sup>];

A: área da seção transversal do perfil de solo drenado [L<sup>2</sup>];

Z<sub>n</sub> e Z<sub>n-1</sub>: profundidade final e inicial do nível de água [L];

f: porosidade drenável, [L<sup>3</sup>.L<sup>-3</sup>].

Na estimativa da porosidade drenável utilizou-se um modelo físico constituído por tanques de drenagem construídos na área do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará - U.F.C. Os tanques foram revestidos de argamassa e internamente impermeabilizados, medindo 1,5 m de altura, 2,0 m de largura e 1,5 m de comprimento.

Na parte interna de cada tanque instalou-se um dreno tubular corrugado e flexível de PVC (DN 65), na profundidade de 1,10 m. No ponto de descarga do dreno, adaptou-se um tubo de PVC rígido de 0,30 m de comprimento com tampa roscável. Foram colocadas duas entradas de água junto à base do tanque, ambas ligadas a um registro para controle da recarga.

Na parte externa instalou-se, na parede frontal, um tubo de PVC de ¾" com quatro saídas de água, a intervalos regulares de 0,20 m, acoplado a uma saída de água na parte inferior do tanque. Nas respectivas saídas de água foram acopladas mangueiras plásticas de ½" para coleta da água de drenagem.

O modelo físico foi projetado de forma a permitir uma saturação do perfil de solo por fluxo ascendente. Na Figura 2 visualiza-se um corte longitudinal e a planta baixa de um desses tanques de drenagem.

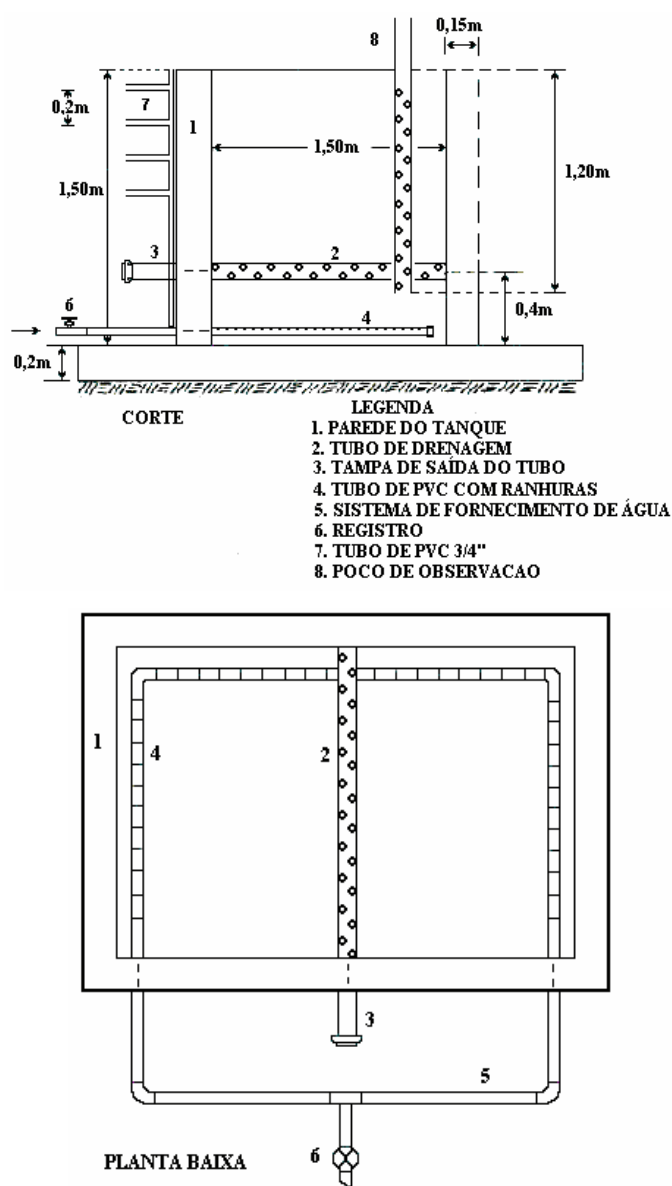
Na colocação do solo nos tanques de drenagem, o mesmo foi seco ao ar e passado em peneira de 5,0 mm (Figura 3) com a finalidade de obtenção de uma maior uniformidade e, portanto, de uma densidade de solo semelhante ao longo do perfil.

Após o enchimento com o solo, os tanques de drenagem foram cobertos com lona plástica (Figura 4), como forma de impedir a evaporação.

No intuito de acompanhar a posição do lençol freático por ocasião da coleta de dados, instalou-se, em cada tanque, um poço de observação (Cordeiro et al., 1986). Os

poços foram abertos com trado tipo holandês e instalados numa profundidade de 1,20 m. Na instalação utilizou-se a metodologia preconizada por Pizarro (1978) e, como filtro, para evitar obstruções na secção perfurada para a entrada de água, uma manta geotêxtil de bidim.

Na medição do volume de água drenada por ocasião dos testes, utilizou-se um recipiente de forma cilíndrica contendo em sua parte externa um piezômetro que proporcionava uma leitura direta em unidade de volume, porquanto se realizou previamente sua calibração obtendo a relação 1,0 cm/0,565 L (Figura 5).



**Figura 2.** Planta baixa e corte longitudinal de um tanque de drenagem.





**Figura 3.** Processo de tamização do material de solo.



**Figura 4.** Tanque de drenagem com cobertura plástica na parte superior.





**Figura 5.** Cilindro coletor com piezômetro previamente calibrado.

A coleta de dados foi realizada entre novembro de 2004 e fevereiro de 2005. Os tanques de drenagem receberam inicialmente uma recarga com os drenos fechados, no intuito de elevar o lençol freático até a superfície do solo. Atingida essa condição, a recarga era suspensa, procedendo-se às medições da água drenada nas diferentes camadas.

### **3.3 Metodologia com equação empírica de van Beers**

A estimativa da porosidade drenável a partir do valor da condutividade hidráulica do solo saturado, foi feita pelo método sugerido por van Beers (1965) conforme a equação:

$$f = \sqrt{K_0 (cm/dia)} \quad \text{Equação (4)}$$

sendo:

f: porosidade drenável [ $L^3.L^{-3}$ ];

$K_0$ : condutividade hidráulica do solo saturado [ $L.T^{-1}$ ].

A condutividade hidráulica do solo saturado foi obtida através do método do permeâmetro de carga constante, com o uso de um frasco de Mariotte. O método é baseado na equação de Darcy e deve ser executado quando se utilizam amostras com estrutura indeformadas. A seguir descreve-se o procedimento utilizado nos testes:

Cobriu-se a extremidade inferior da amostra de solo com uma peça circular de pano presa no local com elástico. Conectou-se um cilindro vazio adicional na outra extremidade por meio de uma fita adesiva. Colocou-se a amostra de solo com esta parte coberta para baixo numa bandeja com água, de maneira que o nível de água na bandeja ficasse um pouco abaixo do topo da amostra. Deixou-se assim por um período de tempo suficiente para saturação da amostra. Colocou-se um papel de filtro no topo da amostra e, vagarosamente, adicionou-se água no cilindro superior até aproximadamente 3/4 de seu volume.

Rapidamente, transferiu-se a amostra para um suporte e ativou-se o frasco de Mariotte.

Na Figura 6 visualiza-se amostras de solo em bandejas com água em processo de saturação e a montagem em laboratório do permeâmetro de carga constante com frasco de Mariotte para manutenção de uma carga hidráulica. No cálculo de ( $K_0$ ) utilizou-se à equação de Darcy, em que:

$$K_0 = \frac{V_A \cdot L}{A \cdot t(h + L)}$$

Equação (5).

sendo:

$K_0$ : condutividade hidráulica [ $L \cdot T^{-1}$ ];

$V_A$ : volume de água percolada durante o tempo  $t$  [ $L^3$ ];

$A$ : área da secção transversal da amostra [ $L^2$ ];

$L$ : comprimento da amostra [ $L$ ];

$h$ : potencial de pressão ou carga hidráulica no topo da amostra [ $L$ ];

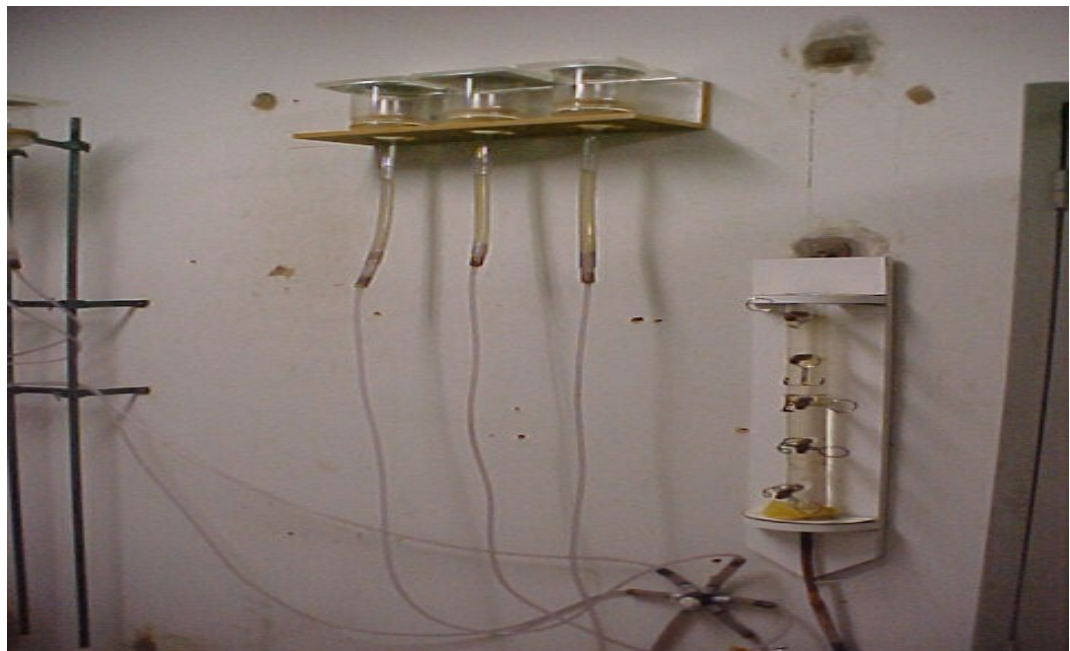
$t$ : tempo [ $T$ ].



**Figura 6.** Saturação de amostras de solo e permeâmetro de carga constante.

### 3.4 Metodologia da ABNT

De acordo com a ABNT (1998), a porosidade drenável é o volume de poros drenados por unidade de volume de um solo previamente saturado, quando o teor de umidade cai de saturado (potencial mátrico zero) para um teor de umidade em equilíbrio com um potencial mátrico de -60 cm de coluna de água. No estudo utilizou-se para fins de obtenção do potencial mátrico, um funil de Buckner, conforme se visualiza na Figura 7.



**Figura 7.** Aparato de Haines com amostra a um potencial mátrico de -60 cm de coluna de água.

Coletou-se em três repetições amostras de solo em cilindros de Uhland, em cada um dos tanques de drenagem, nas posições correspondentes aos pontos médios

das camadas de solo estudadas, ou seja, às profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m. No procedimento seguiram-se as seguintes etapas:

Cobriu-se a extremidade inferior da amostra de solo com uma peça circular de pano presa ao local com elástico. Colocou-se a amostra com esta parte coberta para baixo numa bandeja com água, de forma que o nível de água na bandeja ficasse um pouco abaixo do topo da amostra. Deixou-se a amostra por um período de tempo suficiente até completar a saturação. Após a saturação transferiu-a para o aparato de Haines a um potencial mátrico de  $-60$  cm de coluna de água até atingir o equilíbrio. Calculou-se a porosidade drenável através da diferença entre a umidade no solo saturado e a umidade no solo à capacidade de campo.

### **3.5 Metodologia com uso da curva característica de umidade do solo.**

As curvas características de umidade no solo foram determinadas utilizando-se a metodologia do funil de placa porosa (funil de Bückner). As amostras de solo foram coletadas em cada um dos tanques de drenagem, nas posições correspondentes aos pontos médios das camadas de solo estudadas, ou seja, às profundidades de 0,10, 0,30 e 0,50 m.

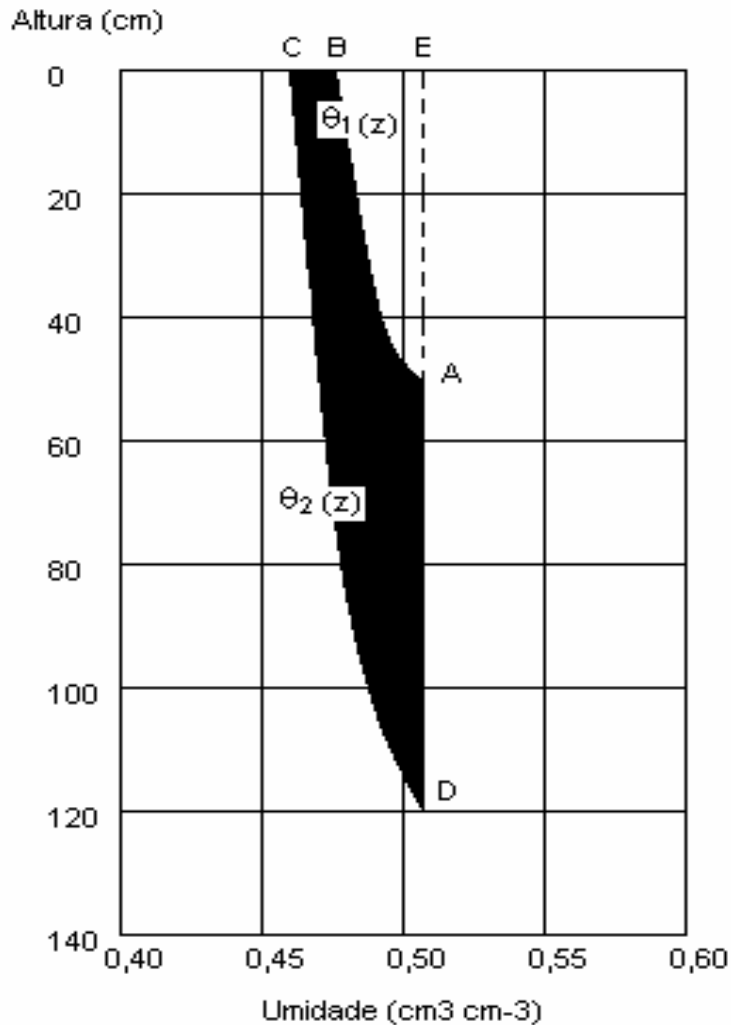
Para a determinação da curva característica foi usado o Aparato de Haines que consiste de um funil de Bückner com placa porosa de vidro sinterizado, provido de uma coluna pendente de água terminando numa pipeta de  $50 \text{ cm}^3$ . As amostras de solo foram colocadas num cilindro de PVC com um volume de  $53,01 \text{ cm}^3$  (5,2 cm. de diâmetro e 2,5 cm de altura), assentadas sobre a placa porosa do funil de Bückner previamente saturada. O nível da água foi elevado no funil até a altura do cilindro de PVC e mantido por 24 horas para assegurar a saturação completa. As amostras de solo foram submetidas a 10 estágios de sucção (-1, -3, -5, -10, -15, -20, -30, -40 -50, -60). Após a saturação o excesso de água acima da placa foi retirado e o nível do menisco ajustado para a marca de -1 cm, e a leitura do volume na pipeta registrado. Após cessar a drenagem da amostra de solo em equilíbrio com esta sucção, o menisco foi rebaixado para o próximo valor de sucção e o procedimento de leitura até o equilíbrio foi repetido sucessivamente. Quando a leitura de equilíbrio do último valor de sucção foi atingida, a amostra foi retirada do funil e pesada ainda úmida, e o peso seco determinado após secagem por 24 horas em estufa a  $105^{\circ} \text{ C}$ . Com os dados da umidade volumétrica em

função da altura da coluna de água (que corresponde ao potencial matricial), foi obtida a curva característica de umidade para cada solo.



**Figura-8**-Funil de placa porosa (funil de Bückner) com amostras de solo submetidas a sucção (-1, -3, -5, -10, -15, -20, -30, -40 -50, -60) de coluna de água.

Como exemplo, o cálculo da porosidade drenável para o rebaixamento do lençol freático é mostrado na Figura 9.



**Figura 9.** Curva característica de umidade do solo.

Nesta figura, a curva característica ilustrada de um solo é representada pela linha A-B para o nível do freático de 0,50 m abaixo da superfície, e pela linha C-D para o lençol a 1,20 m de profundidade. A porosidade drenável neste caso é representada pela área circunscrita em ABCD (que representa a mudança na umidade do solo), dividida pela mudança na altura do lençol freático, ou seja:

$$f = \frac{ABCD}{AD}$$

Para a determinação dos valores de (f) para o rebaixamento do freático de 0,00 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m, e 0,40 a 0,60 m, o perfil de solo foi dividido em incrementos de 5 cm e calculado a diferença média da umidade volumétrica entre cada duas curvas características sucessivas para cada intervalo. Essa média é multiplicada por cada

profundidade do intervalo, o que fornece o teor de umidade por intervalo. O somatório deste valor dividido pela respectiva profundidade de rebaixamento fornece a porosidade drenável ( $f$ ). Esses cálculos foram obtidos em planilha excel, cujos valores estão mostrados no apêndice D, tabelas-1D, 2D e 3D (para solos dos tanques 01, 02 e 03).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Granulométrica dos Solos

Os resultados das análises granulométricas dos solos utilizados nos três tanques de drenagem são mostrados na tabela 1 abaixo, visando facilitar a análise comparativa do estudo. Embora a classificação textural dos solos utilizados nos tanques 01 e 02 seja a mesma, isto é, classe areia, em função dos seus altos teores de areia total ( 96% e 91%, respectivamente) , nota-se a predominância da areia grossa no solo do tanque 01 ( 78%) em relação ao solo do tanque 02 ( 33% ) e , conseqüentemente, a inversão dos valores de areia fina , com 18% para o tanque 01 contra 58% do tanque 02. Esta diferença de teores de areia grossa e fina serve para explicar as diferenças no comportamento da porosidade drenável desses solos, como será demonstrado adiante. O solo do tanque 03 apresenta textura bem mais fina que os outros dois, sendo classificado como franco-argilo-arenoso, com a redução do teor de areia para 67%, e aumento do teor de argila para 24%, conferindo a este solo uma maior capacidade de retenção de umidade em relação aos solos arenosos dos dois primeiros tanques.

**Tabela-1.** Características físicas do solo utilizado no Tanque de Drenagem 01, 02 e 03.

Composição Granulométrica (g.kg <sup>-1</sup> )					
Tanques	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classificação textural
01	780	180	20	20	Areia
02	330	580	50	40	Areia
03	360	310	90	240	Franco-argilo-arenoso

### 4.2 Análise da porosidade drenável do solo pelo método do rebaixamento do lençol freático

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da porosidade drenável em três camadas do perfil (de 0,0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m) obtidos em três solos com diferentes texturas (areias e franco argilo arenoso), utilizando-se o método do rebaixamento do lençol freático, descrito por Taylor (1959), no qual a porosidade drenável é obtida pela relação entre o volume de água drenada e o volume de solo drenado.



**Tabela-2** Valores de porosidade drenável obtidos pelo método do rebaixamento do lençol freático.

<b>Tanque de drenagem 01</b>			
Camadas (m)	Volume de solo (m <sup>3</sup> )	Volume de água (m <sup>3</sup> )	Porosidade drenável (%)
0,00 – 0,20	0,6	0,0792	13,22
0,20 – 0,40	0,6	0,1241	20,69
0,40 – 0,60	0,6	0,1349	22,48
<b>Tanque de drenagem 02</b>			
0,00 – 0,20	0,6	0,0192	3,20
0,20 – 0,40	0,6	0,0883	14,73
0,40 – 0,60	0,6	0,1184	19,74
<b>Tanque de drenagem 03</b>			
0,00 – 0,20	0,6	0,0193	3,22
0,20 – 0,40	0,6	0,0426	7,11
0,40 – 0,60	0,6	0,0726	12,10

Os maiores valores de porosidades drenáveis dos solos dos tanques de drenagem 01 e 02, com textura arenosa, quando comparados aos valores observados no solo com textura franco-argilo-arenoso (tanque de drenagem 03), são resultados do maior percentual da fração granulométrica areia total contido nestes solos (Tabela 1). Os solos de textura mais grosseira apresentam porosidades drenáveis maiores, enquanto os solos de textura mais fina têm menores porosidades drenáveis (Sands, 2001). De outra forma, o maior percentual da soma das frações granulométricas silte e argila, contido no solo com textura franco-argilo-arenosa (tanque de drenagem 03), cujo valor médio é de 30%, confere ao mesmo uma maior capacidade de retenção de umidade, resultando em menores porosidades drenáveis. Pizarro (1978) observa que a porosidade drenável apresenta variações amplas, sendo normalmente encontrado valores médios entre 2 a 27% para solos cujas texturas vão de argilosos a areia grossa.

O solo do tanque de drenagem 02 apresenta menores valores de porosidade drenável, quando comparados ao tanque de drenagem 01, embora se trate de solos com a classificação textural arenosa. Esse fato se justifica em razão do maior percentual de areia grossa do solo do tanque 01 e, reversamente, da maior soma das frações granulométricas areia fina, silte e argila no solo do tanque de drenagem 02. Estas frações granulométricas são responsáveis pela maior ou menor retenção de

umidade Sands, (2001). A grande diferença de porosidade drenável verificada na camada de 0,00 – 0,20 m entre os solos dos tanques 01 e 02 (13,22 e 3,20, respectivamente) , pode ser explicada pelo elevado percentual de areia fina em relação ao de areia grossa no tanque de drenagem 02 em comparação a situação reversa apresentada pelo tanque 01. Millar, (1988) e Sands, (2001) demonstram que os solos de texturas grosseiras possuem poros maiores que drenam mais facilmente com potenciais ou alturas menores.

A semelhança verificada nas porosidades drenáveis da camada de 0,00 – 0,20 m nos solos dos tanques de drenagem 02 e 03 (3,20 e 3,22%) é consequência dos valores semelhantes da soma de areia fina, silte e argila nos dois solos. Todavia os valores menores da porosidade drenável nas demais camadas do tanque de drenagem 03 em relação ao tanque 02 são explicados pelo maior percentual de argila encontrado no tanque 03 (24%) em relação ao tanque 02 (4%).

Os valores da porosidade drenável aumentam com a profundidade em todos os solos. No entanto, a granulometria destes praticamente não varia com a profundidade, em função da homogeneização dos mesmos antes do preenchimento dos tanques. Este aumento dos valores da porosidade drenável é devido à contribuição incremental das camadas superiores à medida que o lençol freático é rebaixado. Isto significa que quando o lençol é rebaixado de 0,0 a 0,20 m de profundidade, a porosidade drenável é representada pela quantidade de água que drena apenas desta camada. Seguindo-se o rebaixamento do lençol de 0,20 para 0,40 m de profundidade, a porosidade drenável é representada agora não só pela água que drena desta camada, mas também da água adicional drenada da camada de 0,0 a 0,20 m., e assim sucessivamente para outros incrementos.

#### **4.3 Análise da estimativa de porosidade drenável do solo pela equação empírica de van Beers**

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios da porosidade drenável obtidos através da equação empírica preconizada por van Beers (1965), nas três camadas de solo, acondicionadas nos três tanques de drenagem. A porosidade drenável seguiu a seqüência de maiores valores no tanque 01 seguido do tanque 02 e do tanque 03. Esta seqüência de queda dos valores da porosidade drenável segue a

tendência da granulometria mais grosseira para a mais fina apresentada pelos solos dos três tanques.

**Tabela-3.** Valores médios de porosidade drenável obtidos pelo método de van Beers.

Camadas(m)	Tanque de drenagem-01		Tanque de drenagem-02		Tanque de drenagem 03	
	Ko(cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)	Ko(cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)	Ko(cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)
0,00–0,20	2399,04	48,98	220,96	14,86	29,76	5,45
0,20–0,40	3442,59	58,67	174,62	13,21	62,40	7,89
0,40–0,60	2261,45	47,55	81,72	9,03	16,80	4,05

Embora os valores da porosidade drenável tenham acompanhado a tendência correta da granulometria, observa-se que os mesmos diferem, na maioria das vezes, de maneira significativa, daqueles obtidos pelo método direto (Taylor, 1959). O método de van Beers, sendo baseado na condutividade hidráulica saturada (**K<sub>o</sub>**), incorpora os erros inerentes à determinação da mesma. Por exemplo, a presença de um “megaporo” numa amostra de solo terá pouco efeito na porosidade drenável, mas muito na condutividade hidráulica saturada. Para algumas amostras, obtiveram-se valores altos de (**K<sub>o</sub>**), o que pode ser devido à altura da amostra, permitindo pequeno espaço para passagem da água e inesperado grande número de macroporos contínuos. Fenômeno similar foi reportado por Lauren et al. (1988). Este resultado, com tamanha diferença entre os valores, confirma os dados apresentados por Otto (1988) que observou a ineficácia da equação proposta por van Beers na estimativa da porosidade. Segundo técnicos da FAO (1980) a correlação entre os valores de (**K<sub>o</sub>**) no campo e no laboratório é baixa o que neste caso se deve fundamentalmente à utilização de amostras de pequenas dimensões e à destruição parcial da estrutura do solo, provocando grande variação dos dados obtidos.

Da mesma forma, Galdino (1988) usando o modelo empírico de van Beers para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica para um solo franco argiloso de Viçosa-MG concluiu que este método mostrou-se ineficiente. No entanto Fernandes et al. (1989), ao realizarem estudo da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado, em um solo orgânico, verificaram

que a equação obtida do gráfico proposto pelo United States Department of the Interior, apresentou ajuste satisfatório entre os dados de porosidade drenável e da condutividade hidráulica.

#### 4.4 Estimativa de porosidade drenável do solo em conformidade com a ABNT

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da porosidade drenável ( $f$ ) através da metodologia preconizada pela ABNT (1998). Neste método a porosidade drenável corresponde ao volume de poros equivalente ao volume de água que drena quando uma amostra de solo saturado é submetida a uma tensão de - 60 cm de coluna de água tomada como o valor da capacidade de campo. Na tabela estão os valores médios dos testes realizados nas três camadas de cada tanque.

**Tabela-4** Valores de porosidade drenável em conformidade com a ABNT.

Camadas(m)	Tanque de drenagem-01	Tanque de drenagem-02	Tanque de drenagem-03
	f (%)	f (%)	f (%)
0,00 – 0,20	20,95	26,91	15,07
0,20 – 0,40	27,57	28,66	15,70
0,40 – 0,60	26,22	19,24	13,69

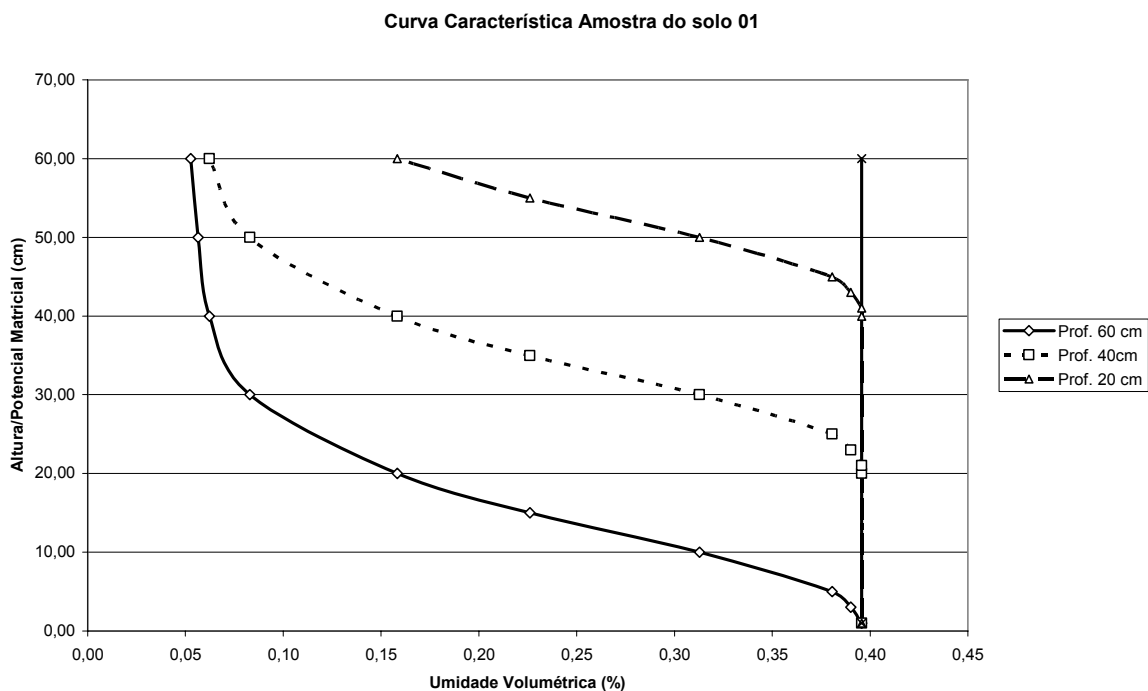
Os valores da porosidade drenável por este método não seguem a seqüência de textura dos solos dos três tanques, principalmente na inversão dos tanques 01 e 02, onde a porosidade drenável deste último tem valores maiores que o primeiro, embora sua textura seja mais fina, demonstrando a pequena precisão do mesmo.

Os valores da porosidade drenável estimados pela metodologia da ABNT que se assemelharam aos verificados no método direto de Taylor foram para a camada de 0,40 a 0,60 m do solo dos três tanques de drenagem, cujos valores foram 26,22 e 22,48 % para o tanque 01, 19,24 e 19,74% para o tanque 02 e 13,69 e 12,10% para o tanque 03, respectivamente. Essa correlação melhor nesta faixa de profundidade se explica pelo fato de que este método adota uma sucção de -60 cm de coluna de água como valor de “Capacidade de Campo”. Por outro lado, os valores da porosidade drenável obtido por esse método, são obrigatoriamente superestimados nas camadas de 0,00 -

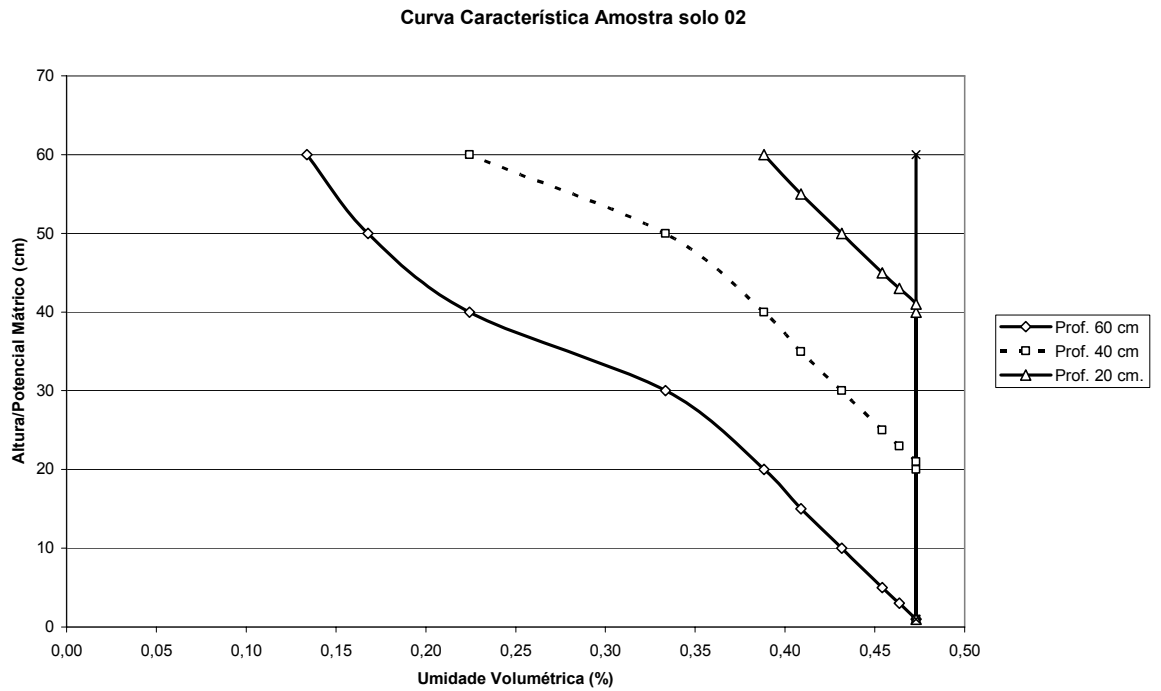
0,20 m e de 0,20 – 0,40 m, já que os solos nestas camadas só drenam até sucções equivalentes até a 0,20 e 0,40 m respectivamente.

#### 4.5 Estimativa de porosidade drenável do solo pela curva característica da umidade do solo.

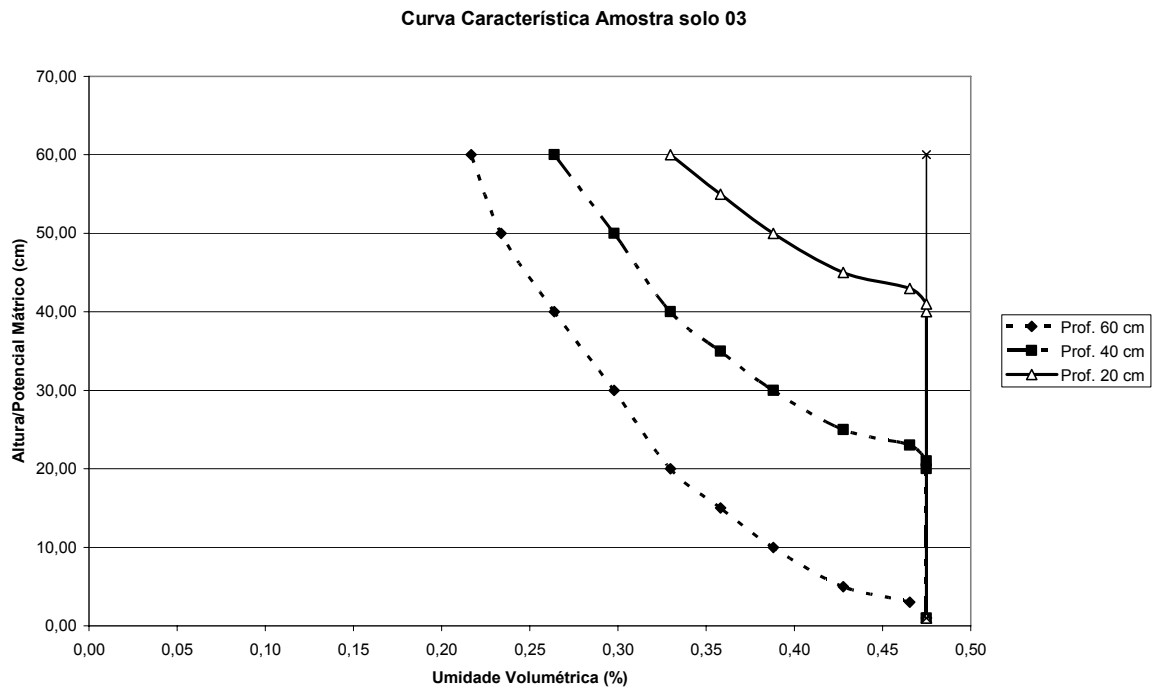
A porosidade drenável para as três camadas dos solos dos tanques 01, 02 e 03 foi obtida das curvas características de cada solo, mostradas nas Figuras 9, 10, e 11. Os valores são obtidos pelo cálculo da área circunscrita entre duas curvas sucessivas simulando o rebaixamento do lençol freático. As planilhas de cálculo das porosidades estão no apêndice D, tabelas-1D, 2D e 3D (para os tanques 01, 02 e 03).



**Figura-9** Curva Característica da amostra de solo do tanque de drenagem 01, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.



**Figura-10** Curva Característica da amostra de solo do tanque de drenagem 02, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.



**Figura-11** Curva Característica da amostra de solo do tanque de drenagem 03, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.

Na tabela 5 estão os valores da porosidade drenável para todos os tanques, nas três camadas. Os valores de porosidade drenável obtidos pelo método da curva característica seguem a tendência daqueles medidos pelo método direto de Taylor, em todos os solos e camadas. Isto decorre pelo fato de que neste método simula-se a drenagem das diferentes camadas, enquanto nos métodos de van Beers e da ABNT, a profundidade de rebaixamento do freático não é levada em consideração, fazendo com que as amostras retiradas em diferentes camadas não acompanhassem a tendência de campo. Outra vantagem deste método é que, desde que o solo seja uniforme, o perfil pode ser simulado com apenas uma amostra. Caso as texturas das camadas sejam diferentes, então é necessário tirar uma amostra por camada. A coluna de solo usada na determinação da curva característica pelo método de Haines tem apenas 2,5 cm de altura. Isto pode explicar as diferenças nos valores absolutos da porosidade drenável entre o método da curva característica e o método direto de Taylor, já que a drenagem nos dois casos não é idêntica. Estudos posteriores poderão ser feitos para a correção deste erro.

**Tabela-5** Valores de porosidade drenável obtido pelo método de curva característica de umidade do solo.

Camadas(m)	Tanque de drenagem-01	Tanque de drenagem-02	Tanque de drenagem-03
	f (%)	f (%)	f (%)
0,00 – 0,20	10	4	7
0,20 – 0,40	30	16	17
0,40 – 0,60	34	23	23

A melhor correlação deste método com o método direto de Taylor permite concluir que a estimativa de porosidade drenável do solo pela curva característica é a metodologia mais recomendável, em face da sua eficácia e praticidade. Por outro lado, a diferença verificada nos valores da porosidade drenável obtido por esse método e o método direto de Taylor era esperada, pois apesar da profundidade de rebaixamento ser também levada em consideração o volume da amostra é extremamente inferior.

## 05 CONCLUSÕES

- Os valores da porosidade drenável obtidos pelo rebaixamento do lençol freático - método de Taylor - foram consistentes com as texturas dos solos nos três tanques;
- O modelo empírico baseado na condutividade hidráulica saturada proposto por van Beers seguiu a tendência da granulometria, mas não foi preciso na estimativa da porosidade drenável, especialmente por não considerar a profundidade do rebaixamento do freático;
- A porosidade drenável estimada pela metodologia da ABNT só se assemelha aos valores do método direto de Taylor na profundidade de 0,40 a 0,60 m, já que a amostra de solo saturado é submetida a uma tensão de - 60 cm de coluna de água.
- A metodologia da curva característica seguiu os valores obtidos pelo método do rebaixamento tanto quanto a granulometria à exceção do tanque 03, com classificação textura franco-argilo-arenoso, quanto a variação com a profundidade, mostrando ser o mais adequado para a determinação indireta da porosidade drenável.



## 06 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnicas. **Requisitos para elaboração de projetos de drenagem subterrânea para fins agrícolas**. Rio de Janeiro, ABNT, 1998, 3p. NBR 14144: 1998.

AMORIM, V. B. **Diagnostico e avaliação de desempenho de drenagem subterrânea no perímetro irrigado de Bebedouro-PE**. 1995. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

BEERS, W.F.J. VAN. **Some monographs for the calculation of drain spacings**. In: International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wagening, 1965. 48p.

BELTRAN, J.M. **Drenaje agrícola (USBR)**. Madrid: Iryda, v. 1, 239p., 1986.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo:Ícone, 1990. 355p.

BOUWER, H.; JACKSON, R.D. **Determining soil properties**. In: Van.SCHILFGAARDE, J. Drainage for agriculture. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1974. Cap. X. p.611-66.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 5.ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1979.647p.

BRAUN, H.M.H.; KRUIJNE, R. Soil conditions. In: RITZEMA, H. P. (Ed.). **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994. p. 77-110.

BUCKLAND, G. D.; HARKER, D. B.; SOMMERFELDT, T. G. Comparison of methods for determining saturated hydraulic and drainable porosity of two southern Alberta soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 66, p.249-259, 1986.

BUCKMAN, H. D.; BRADY, N. O. **Natureza e propriedades dos solos**. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 594p.

CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; CRUZ, A. C. R. **Condutividade hidráulica do solo em condições de campo**, 2004. 378-379p.

CORDEIRO, G.G.; SUGUINO, H.H.; JÚNIOR, W.C. & VALDIVIESO, C.R. – **Parâmetros de drenagem subterrâneas nos latossolos do perímetro irrigado de Bebedouro**. VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 1986. 607-619p.

COSTA, R.N.T. **Avaliação de um sistema de drenagem e tratamentos mecânicos na recuperação de solos sódico no Vale do Curu**, CE. Fortaleza: UFC, 1988. 75p. Dissertação Mestrado.

COSTA, J.L.; PRUNTY, L.; MONTGOMERY, B.R.; RICHARDSON, J.L, & ALESSI, R.S **Water quality effects on soils and alfafa**; II Soil physical and chemical properties. Soil Sci, Soc Am. J. 55(1): 203-209, 1991.

CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. 4 ed. São Paulo, Nobel, 1989. 337p.

DIELEMAN, P.J.; TRAFFORD, B.D. **Drainage testing**. Rome: FAO, 1976.(FAO. Irrigation and Drainage, Paper n. 28)

FAO. Irrigation and drainage paper n.38 – Drainage Design Factors – Food and agriculture organization of the united nations-rome, 1980.

FAO. **Drainage design factors**; 28 questions and answers. Rome, FAO, 1986. 52p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 38).

FERNANDES, B.; CECON, P.R.; FERREIRA, P.A.; LOUREIRO, B.T.; OTTO, S.R.L. Estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica saturada, em um solo orgânico. **Revista Ceres**, Viçosa, 36(207): 399-405. 1989.

FERREIRA, M.M. & DIAS JUNIOR, M. S. Física do solo. **Relação de massa e volume dos constituintes do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 28-29 p.

FRENCH, B. E., and J. R. O'CALLAGHAN. A field test of drain spacing equations for agricultural land. **J. Agr. Eng. Res**, 1966.

GALDINO, S. **Estimativa da macroporosidade em função de algumas características de solo de várzea**. Viçosa, 1988. 61p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

GARDNER, W.; ISRAELSEN, O. W.; EDLEFSEN, N. E.; CONRAD, H. The capillary potential function and its relation to irrigation practice. **Phys. Rev., Ser. 2**, 20, 196, 1922.

HAINES, W.B.; Studies of the physical properties of soils. V. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture associated therewith. **J. Agric. Sci.**, 20:97-116, 1930.

HILLEL, D., KRENTOS, V.D. & STILIANOU, Y. Procedure and Test of on Internal Drainage Method for Meas pring Soil Hydraulic Conductivity in situ. **Soil. Sci.** 114: 395-400, 1972.

KAMRA, S. K.; RAO. K. V. G. K. Selection of representative hydraulic conductivity value for drainage system design. **Irrigação and Power**, v.42, n.4, p.355-9, 1985.

KESSLER, J.; OOSTERBAAN, R.J. **Determinacion de la conductividad hidráulica de los suelos**. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones Del Drenaje. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 3: 275-320 1973.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.262p.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. ed. São Paulo, Nobel, 1988, 408p.

KLUTE, A. **Laboratory Measurement of Hidráulic Conductivity of Saturated Soil.** In: Black, C.A. Methods of Soil Analysis. Amer. Soc. Agron, 1965. 253-61p.

LAMSTER, E. C. **Programa nacional de aproveitamento racional de várzeas – PROVÁRZEAS** nacional. Informação Agropecuária, Belo Horizonte, 6(65): 3-8, 1980.

LAUREN, J.G.; WAGENET, R.J.; BOUMA, J.; WOSTEN, J.H.M. Variability of saturated hydraulic conductivity in a glossoaquic hapludalf with macropores. **Soil Science**, v.145, n.1, p.20-8, 1988.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** 1. ed. Piracicaba, 1995, 497p.

LOUZADA, J.A. – **Modelo matemático para drenagem subsuperficial considerando a zona não saturada** – Anais do VIII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Florianópolis-SC, 1988.

MEDINA, H.P. e F. GROHMANN. **Disponibilidade de água em alguns solos sob cerrado.** Bragantia, 1966. 65p.

MILLAR, A.A.; GOMES, P.C.F. Determinação das propriedades hidráulicas de solos aluviais através da descarga de drenos subterrâneos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 2: 90-4, 1978.

MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas:** bases agronômicas. 2. ed. São Paulo, Editeria Editorial, 1988, 306p.

OTTO, S.R.L. **Estimativa da porosidade drenável em função de propriedades de um solo orgânico.** Viçosa, 1988. 89p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos.** Madrid, Editorial Agrícola España, 1978, 521p.

PONTES, P. D.; SALAZAR, C.R.V.; CORDEIRO, G.G. **Drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado Bebedouro II: Estudo das características hidrodinâmica dos solos.** EMBRAPA-CPATSA, Petrolina, 73: 1-22. 1992.

QUEIROZ, J.E. **Avaliação do desempenho hidráulica de dois sistemas de pilotos de drenagem subterrâneos usando manilhas de barro, no Perímetro Irrigado de Sumé Paraíba.** Campina Grande, 1987. 98p.Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba.

QUEIROZ, J.E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea.** Tese (doutorado). Universidade de São Paulo (ESALQ), 1997.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505p.

RICHARDS, L. A. **A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution.** Soil Sci., 51: 377-386, 1941.

RITZEMA, H. P. **Drainage Principles and Applications.**The Netherlands,1994.

ROGERS, J.S.; CARTER, C.E. **Auger hole hydraulic conductivity determination in layered soils.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, 30(2): 374-8, 1987.

ROGERS, J.S.; SELIM,H.M.; CARTER, C.E.; FOUSS, J.L. Variability of auger hole hydraulic conductivity values for a commerce silt loam. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, 34(3): 876-82 1991.

SANDS, G. **Agricultural Drainage.** Publication Series: University of Minnesota, 2001.

SAUNDERS, L.C.U.; P. L. LIBARDI e K. REICHARDT, 1978. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. **Rev. bras. Ci. Solo,** 164-167p.

SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, P.A.; BACK, A.J.; VIEIRA, M. Sistemas de drenagem em regime variável. **Revista Ceres**, Viçosa, 37 (209): 36-49. 1990.

SKAGGS, R.W.; KRIZ, G.L.; BERNAL, R.F. Field evaluation of transient drain spacing equations. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.3, p.590-5, 1973.

SOARES, O. H. D. **Monitoramento do processo de recuperação de um solo aluvial sódico em condições de drenagem subterrânea**. Fortaleza, 1996. 106p. (Mestrado na Universidade Federal do Ceará).

SOUZA, J.B. **Avaliação e eficiência de sistema de drenos subsuperficiais e tratamentos mecânicos na melhoria das condições de drenabilidade dos solos do perímetro** Maniçoba-Ba. Fortaleza: UFC, 1991. 112p. Dissertação Mestrado.

SUGUINO, H. H.; VALDIVIESO, C.R.; CORDEIRO, G.G; JÚNIOR, W.C. Drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Maniçoba-BA: critérios de dimensionamento e avaliação de performance. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 23(4): 405-413. 1988

TAYLOR, G. S. Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. **Soil Science**, Ohio, 90(6): 338-43 1959.

TOGNON, A. A. **Propriedades físicas hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 67p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. 943p.

WHITE, R.E. The influence de macropores on the transport of dissolved and suspended matter though soil. **Advanced Soil Science**, v.3, 1985.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE - A

**Tabela-1A.** Análise granulométrica do material de solo do tanque de drenagem 01.

Amostra	Horizontes	Composição granulométrica (g.Kg <sup>-1</sup> )				Classificação textural
	Prof. (m)	Areia grossa	Areia fina	Silte	argila	
2004-913	0,0-0,2	786,9	184,6	18,3	10,2	Areia
2004-915	0,2-0,4	786,5	184,4	18,0	11,1	Areia
2004-917	0,4-0,6	787,3	184,6	19,4	8,7	Areia

**Tabela-2A.** Análise granulométrica do material de solo do tanque de drenagem 02.

Amostra	Horizontes	Composição granulométrica(g.Kg <sup>-1</sup> )				Classificação textural
	Prof. (m)	Areia grossa	Areia fina	Silte	argila	
2004-912	0,0-0,2	425,5	478,5	79,0	17,0	Areia
2004-914	0,2-0,4	364,0	525,5	80,5	30,0	Areia
2004-916	0,4-0,6	465,0	418,5	84,1	32,4	Areia

**Tabela-3A.** Análise granulométrica do material de solo do tanque de drenagem 03.

Amostra	Horizontes	Composição granulométrica(g.Kg <sup>-1</sup> )				Classificação textural
	Prof. (m)	Areia grossa	Areia fina	Silte	argila	
2004-912	0,0-0,2	380,2	323,2	65,1	231,5	Franco argila arenoso
2004-914	0,2-0,4	386,1	332,8	56,8	224,3	Franco argila arenoso
2004-916	0,4-0,6	367,8	317,1	55,2	259,9	Franco argila arenoso



## APÊNDICE - B

**Tabela-1B.** Dados para o cálculo da porosidade drenável pelo método de van Beers, para o tanque de drenagem 01.

### Tanque de drenagem-01

L(cm)	D(cm)	h(cm)	A(cm <sup>2</sup> )	V(mL)	t (min)	K <sub>0</sub> (cm min <sup>-1</sup> )	K <sub>0</sub> (cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)
7,1	7	5	38,48	550	5	1,677	2415,14	49,14
7,1	7	5	38,48	545	5	1,662	2393,18	48,92
7,1	7	5	38,48	544	5	1,659	2388,79	48,88
						1,666	2399,04	48,98
7,1	6,9	5,2	37,39	775	5	2,393	3445,56	58,70
7,1	6,9	5,2	37,39	775	5	2,393	3445,56	58,70
7,1	6,9	5,2	37,39	773	5	2,387	3436,66	58,62
						2,391	3442,59	58,67
7,1	7	5,0	38,48	520	5	1,586	2283,40	47,78
7,1	7	5,0	38,48	515	5	1,570	2261,45	47,55
7,1	7	5,0	38,48	510	5	1,555	2239,49	47,32
						1,570	2261,45	47,55

**Tabela-2B.** Dados para o cálculo da porosidade drenável pelo método de van Beers, para o tanque de drenagem 02.

**Tanque de drenagem 02**

L(cm)	D(cm)	h(cm)	A(cm <sup>2</sup> )	V(mL)	t (min)	K <sub>0</sub> (cm min <sup>-1</sup> )	K <sub>0</sub> (cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)
7	7	6	38,48	113	10	0,158	227,67	15,09
7	7	6	38,48	109	10	0,153	219,61	14,82
7	7	6	38,48	107	10	0,150	215,58	14,68
						0,153	220,96	14,86
7	7	5,6	38,48	85	10	0,123	176,69	13,29
7	7	5,6	38,48	84	10	0,121	174,62	13,21
7	7	5,6	38,48	83	10	0,120	172,54	13,14
						0,121	174,62	13,21
7	7	5,5	38,48	41	10	0,060	85,91	9,27
7	7	5,5	38,48	38	10	0,055	79,62	8,92
7	7	5,5	38,48	38	10	0,055	79,62	8,92
						0,057	81,72	9,03

**Tabela-3B.** Dados para o cálculo da porosidade drenável pelo método de van Beers, para o tanque de drenagem 03.

**Tanque de drenagem-03**

L(cm)	D(cm)	h(cm)	A(cm <sup>2</sup> )	V(mL)	t (min)	K <sub>0</sub> (cm min <sup>-1</sup> )	K <sub>0</sub> (cm dia <sup>-1</sup> )	f (%)
7,60	7,53	2,52	44,51	78	60	0,022	31,68	5,63
7,60	7,35	2,52	42,40	74	60	0,022	31,68	5,63
7,60	7,60	2,52	45,34	65,5	60	0,018	25,92	5,09
						0,021	29,76	5,45
7,60	7,53	2,53	44,51	162	60	0,046	66,24	8,14
7,60	7,60	2,53	45,34	157	60	0,043	61,92	7,87
7,60	7,60	2,63	45,34	150	60	0,041	59,04	7,68
						0,043	62,40	7,89
7,60	7,54	2,53	44,62	31	60	0,009	12,96	3,60
7,60	7,53	2,52	44,51	41	60	0,012	17,28	4,16
7,60	7,43	2,52	44,33	48	60	0,014	20,16	4,40
						0,011	16,80	4,05

## APÊNDICE-C

**Tabela-1C.** Valores de porosidade drenável em conformidade com a ABNT.

Tanques	Prof.(m)	M <sub>sat</sub> (g)	M <sub>cc</sub> (g)	M <sub>ss</sub> (g)	U <sub>cc</sub> (g g)	V <sub>t</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>s</sub> (g.m <sup>-3</sup> )	θ <sub>cc</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	θ <sub>sat</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	f (%)
01	0,0 – 0,2	180,04	159,38	150,84	0,0566	97,94	1,53	0,0866	0,2961	20,95
	0,2 – 0,4	180,13	149,96	148,32	0,0330	97,76	1,52	0,0502	0,3259	27,57
	0,4 – 0,6	176,31	148,31	145,58	0,0351	98,13	1,49	0,0523	0,3145	26,22
02	0,0 – 0,2	194,04	167,67	158,72	0,0564	97,54	1,62	0,0913	0,3604	26,91
	0,2 – 0,4	192,51	164,31	155,51	0,0565	98,13	1,58	0,0893	0,3759	28,66
	0,4 – 0,6	192,86	173,95	160,60	0,0831	98,31	1,63	0,1350	0,3274	19,24
03	0,0 – 0,2	128,86	118,73	100,18	0,1851	67,15	1,49	0,2757	0,4264	15,07
	0,2 – 0,4	125,66	115,14	95,79	0,2020	66,90	1,43	0,2888	0,4458	15,70
	0,4 – 0,6	130,57	121,39	101,92	0,1910	66,90	1,52	0,2903	0,4272	13,69

## APÊNDICE-D

**Tabelas-1D.** Valores de porosidade drenável pelo método da curva característica de umidade do solo do tanque de drenagem 01.

Profundidade	L= $\theta_v \cdot h$															
	$\theta_v$	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50			
0	0,40	20	0,16	0,24		40	0,06	0,1		60	0,05	0,01				
5	0,40	15	0,23	0,17	0,21	10,25	35	0,07	0,16	0,13	6,5	55	0,055	0,015	0,0125	0,625
10	0,40	10	0,31	0,09	0,13	6,50	30	0,08	0,23	0,195	9,75	50	0,06	0,02	0,0175	0,875
15	0,40	5	0,38	0,02	0,06	2,75	25	0,12	0,26	0,245	12,25	45	0,06	0,06	0,04	2
20	0,40	0	0,4	0,00	0,01	0,50	20	0,16	0,24	0,25	12,5	40	0,06	0,1	0,08	4
25	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	15	0,23	0,17	0,205	10,25	35	0,07	0,16	0,13	6,5
30	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	10	0,31	0,09	0,13	6,5	30	0,08	0,23	0,195	9,75
35	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	5	0,38	0,02	0,055	2,75	25	0,12	0,26	0,245	12,25
40	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	0	0,4	0	0,01	0,5	20	0,16	0,24	0,25	12,5
45	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	0	0,4	0	0	0	15	0,23	0,17	0,205	10,25
50	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	0	0,4	0	0	0	10	0,31	0,09	0,13	6,5
55	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	0	0,4	0	0	0	5	0,38	0,02	0,055	2,75
60	0,40	0	0,4	0,00	0,00	0,00	0	0,4	0	0	0	0	0,4	0	0,01	0,5
			0,52	0,40	20,00			1,27	1,22	61			1,37	68,5		
				Por.Drenável	0,1			Por.Drenável	0,305				Por.Drenável	0,3425		

**Tabelas-2D.** Valores de porosidade drenável pelo método da curva característica de umidade do solo do tanque de drenagem 02.

Profundidade	L=θv.h						L=θv.h						L=θv.h			
	θv	θv	Δθv	ΔθvMédio	ΔθvMédioX50		θv	Δθv	ΔθvMédio	ΔθvMédioX50	θv	Δθv	ΔθvMédio	ΔθvMédioX50		
0	0,44	0,34	0,10				40	0,26	0,08			60	0,15	0,11		
5	0,44	0,37	0,07	0,09	4,25		35	0,265	0,105	0,09	4,63	55	0,17	0,10	0,10	5,13
10	0,44	0,41	0,03	0,05	2,50		30	0,27	0,14	0,12	6,13	50	0,19	0,08	0,09	4,38
15	0,44	0,42	0,02	0,03	1,25		25	0,305	0,115	0,13	6,38	45	0,23	0,08	0,08	4,00
20	0,44	0,44	0,00	0,01	0,50		20	0,34	0,1	0,11	5,38	40	0,26	0,08	0,08	4,00
25	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		15	0,37	0,07	0,09	4,25	35	0,27	0,11	0,09	4,63
30	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		10	0,41	0,03	0,05	2,50	30	0,27	0,14	0,12	6,13
35	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		5	0,42	0,02	0,03	1,25	25	0,35	0,08	0,11	5,38
40	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		0	0,44	0	0,01	0,50	20	0,34	0,10	0,09	4,38
45	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		0	0,44	0	0,00	0,00	15	0,37	0,07	0,09	4,25
50	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		0	0,44	0	0,00	0,00	10	0,41	0,03	0,05	2,50
55	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		0	0,44	0	0,00	0,00	5	0,42	0,02	0,03	1,25
60	0,44	0,44	0,00	0,00	0,00		0	0,44	0	0,00	0,00	0	0,44	0,00	0,01	0,50
			0,22	0,17	8,50				0,66	0,62	31,00				0,93	46,50
				Por.Drenável	0,04				Por.Drenável	0,16				Por.Drenável	0,23	

**Tabelas-3D.** Valores de porosidade drenável pelo método da curva característica de umidade do solo do tanque de drenagem 03.

Profundidade	L= $\theta_v \cdot h$															
	$\theta_v$	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50	$\theta_v$	$\Delta\theta_v$	$\theta_v$ Médio	$\theta_v$ MédioX50			
0	0,47	20	0,34	0,13		40	0,26	0,08		60	0,22	0,04				
5	0,47	15	0,36	0,11	0,12	6,00	35	0,28	0,08	0,08	4,00	55	0,23	0,06	0,05	2,38
10	0,47	10	0,39	0,08	0,10	4,75	30	0,3	0,09	0,09	4,25	50	0,23	0,07	0,06	3,13
15	0,47	5	0,43	0,04	0,06	3,00	25	0,32	0,11	0,10	5,00	45	0,25	0,08	0,07	3,63
20	0,47	0	0,47	0,00	0,02	1,00	20	0,34	0,13	0,12	6,00	40	0,26	0,08	0,08	3,88
25	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	15	0,36	0,11	0,12	6,00	35	0,29	0,07	0,08	3,75
30	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	10	0,39	0,08	0,10	4,75	30	0,30	0,09	0,08	4,00
35	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	5	0,43	0,04	0,06	3,00	25	0,32	0,11	0,10	5,00
40	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	0	0,47	0	0,02	1,00	20	0,34	0,13	0,12	6,00
45	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	0	0,47	0	0,00	0,00	15	0,36	0,11	0,12	6,00
50	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	0	0,47	0	0,00	0,00	10	0,39	0,08	0,10	4,75
55	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	0	0,47	0	0,00	0,00	5	0,43	0,04	0,06	3,00
60	0,47	0	0,47	0,00	0,00	0,00	0	0,47	0	0,00	0,00	0	0,47	0,00	0,02	1,00
			0,36	0,30	14,75			0,72	0,68	34,00				0,93	46,50	
					Por.Drenável	0,07			Por.Drenável	0,17				Por.Drenável	0,23	