

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

APLICABILIDADE DO TUBO DE PVC PARA ESGOTO COMO MATERIAL  
DRENANTE ALTERNATIVO

POR  
ESPEDITO GONZAGA

CAMPINA GRANDE-PARAÍBA

ABRIL - 1994

FT

920



---

G642a Gonzaga, Espedito  
Aplicabilidade do tubo de PVC para esgoto como material drenante alternativo / Espedito Gonzaga. - Campina Grande, 1994.  
60 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Esgoto - 2. Dissertacao I. Oliveira, Gilvan Rodrigues de, M.Sc. II. Silva, Cicero Alexandre, M.Sc. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 628.2:678.743(043)

---

**ESPEDITO GONZAGA**

**APLICABILIDADE DO TUBO DE PVC PARA ESGOTO COMO MATERIAL  
DRENANTE ALTERNATIVO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

**Área de Concentração:** Engenharia de Irrigação e Drenagem

**Orientadores:** Gilvan Rodrigues de Oliveira

(Prof. Adjunto da UFPB)

Cícero Alexandre Silva

(Pesq. da UFAL)

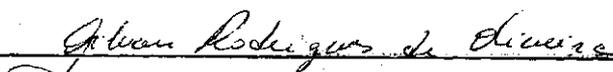
**Campina Grande-Paraíba**

**Abril - 1994**

**APLICABILIDADE DO TUBO DE PVC PARA ESGOTO COMO MATERIAL  
DRENANTE ALTERNATIVO**

**POR  
ESPEDITO GONZAGA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 03 / 04 / 1994**



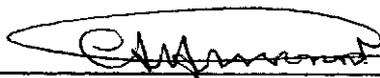
**Prof. Gilvan Rodrigues de Oliveira - M.Sc.**

**Presidente**



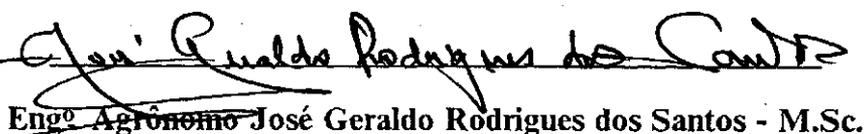
**Engº Agrônomo Cícero Alexandre Silva - M.Sc.**

**Examinador**



**Prof. Carlos Alberto Vieira de Azevedo - Ph.D.**

**Examinador**



**Engº Agrônomo José Geraldo Rodrigues dos Santos - M.Sc.**

**Examinador**

**Campina Grande-Paraíba**

**Abril - 1994**

À memória dos meus pais **João  
Gonzaga Filho e Izaura Alves de Lira.**

## MINHA HOMENAGEM

À minha esposa **Maria José Gonzaga**,  
pela sua paciência, o que representou  
muito para mim.

Aos meus filhos **Gregório, Gustavo e  
Gláucia** em quem deposito grandes  
esperanças.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Escola Agrotécnica Federal de Satuba-Al, pela oportunidade concedida a realização do curso.

Aos colegas e amigos, professores e funcionários da Escola Agrotécnica Federal de Satuba-Al, pelo apoio financeiro e entusiástico para realização dos trabalhos experimentais.

Aos alunos da Escola Agrotécnica Federal de Satuba-Al, em especial Daniel Almeida de Oliveira e Wanderlei Almeida de Oliveira na participação da coleta dos dados experimentais.

Ao Prof<sup>o</sup> Gilvan Rodrigues de Oliveira e ao pesquisador Cicero Alexandre Silva, pela paciente orientação em todas as etapas do trabalho.

Ao professor Eng<sup>o</sup> R. J. Oosterban (ILRI) pela valiosa contribuição no fornecimento de material bibliográfico.

À Fundação de Apoio a Pesquisa de Alagoas-FAPEAL, pelo apoio financeiro para finalização do mestrado.

À Empresa de Tubos e Conexões Tigre, pela doação de materiais drenantes.

Ao Diretor do Campus Delza Gitai/UFAL, Dr. Jarbas Elias da Rosa Oiticica, pelo consentimento do uso do laboratório e serviços de xerox.

Aos Prof<sup>es</sup> Dr. Paulo Wanderlei Ferreira e Geraldo Veríssimo Barbosa pelas valiosas sugestões e orientações nas análises estatísticas.

Ao amigo e colega de curso Júlio Roberto Araújo de Amorim, pesquisador da EMPARN, pelas valiosas críticas e sugestões apresentadas.

Aos amigos Prof. Nagel Alves Costa e José Nazareno dos Santos pelos trabalhos de edição e orientação no uso do computador.

Aos técnicos agrícolas do Campus Delza Gitai/UFAL Arnaldo Batista dos Santos e José Mariano da Silva no apoio da montagem e coleta dos dados experimentais.

Ao Sr. Coordenador do NPD/CCT/UFPB José Jonas de Oliveira por permitir a impressão deste trabalho a laser.

E aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

## RESUMO

O presente trabalho consiste de um estudo da aplicabilidade do tubo liso de PVC para esgoto como um material drenante não convencional. Foram testados tubos de 50, 75 e 100 mm de diâmetros nominais, considerando-se áreas de entrada de 16 e 23 cm<sup>2</sup>/m, sob condições controladas em tanques de areia. Como testemunhas foram utilizados tubos corrugados padrões da TUPY (TUPY - DRENO) e o DRENOFLEXE da TIGRE, com diâmetros nominais de 65 e 110 mm. O estudo da aplicabilidade do uso efetivo do material não convencional baseou-se na avaliação do desempenho de diferentes sistemas drenantes, em função dos parâmetros: cargas hidráulicas de entrada e total, resistência de entrada, fator de resistência e o diâmetro efetivo. Os critérios adotados para avaliar o desempenho dos sistemas levaram em conta as sugestões de DIELEMAN & TRAFFORD (1976) e WESSELING & VAN SOMEREN (1972). Do ponto de vista das cargas hidráulicas de entrada, os sistemas não convencionais e padrões foram considerados regulares a bons. Conforme às resistências de entrada, todos os sistemas testados foram bons. Levando em consideração o fator de resistência, os sistemas funcionaram dentro de uma faixa satisfatória. Os diâmetros efetivos obtidos para os tubos lisos não convencionais, demonstraram que o aumento dos diâmetros nominais teve pouca influência sobre os resultados deles, enquanto o aumento da área de entrada proporcionou diâmetros efetivos mais elevados. Os diâmetros efetivos conseguidos com os tubos padrões foram praticamente o triplo daqueles obtidos com os tubos não convencionais. Observou-se que os tubos padrões foram superiores (em desempenho) em relação aos não convencionais - consequência talvez das melhores geometrias das aberturas e perfurações para entrada d'água. Isto sugere outros estudos sobre os materiais não convencionais, considerando diferentes geometrias das aberturas e envoltórios, tanto a nível de protótipo físico como a nível de campo.

## SUMMARY

The results of a study of the applicability of the PVC tube as a non-conventional drain are presented in this work. Three tubes with diameters 50, 75 and 100 mm using opening areas of 16 and 23cm<sup>2</sup>/m were tested under controlled conditions in tanks filled with sand. Standard corrugated tubes of TUPY (TUPY-DRENO) and DRENOFLEX (TIGRE) with 65 and 110 mm diameter were used as reference tubes. The study applicability of the effective use of the non-conventional material based on the evaluation of the performance of the different drainage systems as a function of the following parameters: entrance and total hydraulic head losses; entrance resistance; resistance factor; and the effective diameter. The criteria adapted for the evaluation of the systems took into account the suggestion of DIELEMAN & TRAFFORD (1976) and WESSELING & VAN SOMEREN (1972). From the view point of hydraulic head losses, the non-conventional systems and the reference standard were considered moderate to good. According to the entrance resistance all the systems tested were considered good. The systems performed satisfactorily within the range when the resistance factor was taken into account. The effective diameters, obtained for the non-conventional tubes, showed that the increase in diameter had little influence on the effective diameter while the increase in entrance area resulted in increased effective diameter. The effective diameters obtained from the standard reference tubes were almost three times those of non-conventional tubes. It is observed that the standard reference tubes were superior (in performance) in relation to non-conventional tubes. Probably as a consequence of better geometry of openings and perforation for the entry of water. It suggests that other studies related to the non-conventional material, with different opening geometries and envelopes should be realized at the prototype level as well as at the field level.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A, A_d, A_e, A_i$	áreas: da seção transversal; do perfil do solo drenado; de entrada e impermeável ou de impedimento para entrada d'água ( $L^2$ )
$C$	comprimento unitário do dreno (L)
$D$	distância da camada impermeável até a capa freática no ponto médio entre drenos (L)
$d$	espessura da camada equivalente da equação de Hooghoudt (L)
$D_e$	diâmetro efetivo do tubo drenante (L)
$DN$	diâmetro nominal do tubo (L)
$D_c$	diâmetro comercial do tubo (L)
$E$	energia, trabalho (J)
$e$	base do logaritmo Neperiano
$f$	fator de fricção da equação de Darcy-Weisbach
$g$	aceleração da gravidade ( $L.T^{-2}$ )
$h$	perda de carga hidráulica da equação de Darcy-Weisbach, carga hidráulica sobre as duas equações de Hooghoudt (L)
$h_e$	carga hidráulica de entrada (L)
$h_{tot}$	carga hidráulica total (L)
$h_o$	nível da água no dreno e altura inicial do lençol frático (L)
$h_r$	altura do lençol freático sobre os drenos após rebaixamento (L)
$i$	gradiente hidráulico da equação de Darcy, intensidade de corrente da Lei de Ohm (A)
$K, K_1, K_2$	condutividade hidráulica do solo ( $L.T^{-1}$ )
$K_m$	fator de resistência da equação de Manning
$K_D$	transmissividade do solo ( $L^2.T^{-1}$ )
$L$	comprimento da tubulação da equação de Darcy-Weisbach (L)
$\ln$	logaritmo neperiano
$m$	massa (kg)
$\hat{M}$	média de carga hidráulica de entrada e de resistência de entrada
$p$	perímetro molhado do dreno (L)
$P$	peso ou força (N)
$q$	taxa de descarga unitária ( $L^2.T^{-1}$ )
$Q$	recarga do lençol freático, descarga do dreno ( $L.T^{-1}$ )
$r$	resistência elétrica Lei de Ohm ( $\Omega$ )

$r_e$	resistência de entrada (T.L <sup>-1</sup> )
$S$	espaçamento entre drenos (L)
$t$	tempo em dias para que o lençol passe da altura inicial para final (T)
$v$	tensão elétrica da Lei de Ohm (V)
$V$	volume (L <sup>3</sup> ), velocidade (L.T <sup>-1</sup> )
$Y, H$	potencial total ou hidráulico da água no solo (L)
$Y_p, H_p$	potencial de pressão da água no solo (L)
$Y_g, H_g$	potencial gravitacional da água no solo (L)
$Y_m$	potencial matricial da água no solo (L)
$Y_{os}$	potencial osmótico da água no solo (L)
$Z_n$	profundidade do lençol freático após drenagem (L)
$Z_{n-1}$	profundidade do lençol freático antes da drenagem (L)
$\Delta t$	intervalo de tempo (T)
$\alpha$	fator de resistência de entrada (adimensional)
$\pi$	pi (3,14)
$\rho$	densidade volumétrica (kg.L <sup>-3</sup> )
$\mu$	porosidade drenável do solo (%)

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Critérios de classificação dos poros do solo em função do tamanho e condução da água (VAN BEERS, 1977) .....	07
TABELA 2	- Especificações dos tubos empregados em cada sistema drenante .....	28
TABELA 3	- Propriedades físicas da areia utilizada no enchimento dos tanques ..	29
TABELA 4	- Razão entre cargas hidráulicas $h_e/h_{tot}$ como critério de rendimento de drenos (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976) .....	32
TABELA 5	- Carga hidráulica de entrada ( $h_e$ ) como critério de rendimento de drenos (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976 e WESSELING & VAN SOMEREN, 1972) .....	33
TABELA 6	- Resistência de entrada ( $r_e$ ) e fator de resistência ( $\alpha$ ) como critério de rendimento de drenos (WESSELING & VAN SOMEREN, 1972) ..	33
TABELA 7	- Médias aritméticas dos parâmetros hidráulicos: cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ); razão entre cargas hidráulicas de entrada e total ( $h_e/h_{tot}$ ); resistência de entrada ( $r_e$ ); taxa de descarga unitária ( $q$ ) e fator de resistência ( $\alpha$ ). Médias probabilísticas a 50% dos mesmos parâmetros com exceção da taxa de descarga e fator de resistência. ....	36
TABELA 8	- Contrastes entre as médias das cargas hidráulicas de entrada dos sistemas drenantes .....	38
TABELA 9	- Áreas impermeáveis ( $A_i$ ), diâmetro nominais (DN), áreas de entrada ( $A_e$ ), e resistências de entrada ( $r_e$ ) .....	42
TABELA 10	- Contrastes entre as médias das resistências de entrada em $(\text{dia/m}) \times 10^{-3}$ dos sistemas drenantes .....	43
TABELA 11	- Diâmetros nominais (DN), resistência de entrada ( $r_e$ ), fatores de resistência ( $\alpha$ ) e diâmetros efetivos ( $D_e$ ) dos sistemas drenantes. ....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tanques de areia com sistemas drenantes, poços de observação e reservatórios graduados. ....	27
Figura 2 - Geometria das cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ) e total ( $h_{tot}$ ) e nível d'água no dreno ( $h_o$ ). ....	31
Figura 3 - Relação entre cargas hidráulicas de entrada médias a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A,B,C,D,E,F,G e H). ....	37
Figura 4 - Relação entre as médias das razões de cargas hidráulicas a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A,B,C,D,E,F,G e H). ....	38
Figura 5 - Relação entre cargas hidráulicas de entrada e taxas de descargas unitárias ( $q$ ) dos sistemas drenantes (A,B,C e D). ....	40
Figura 6 - Relação entre cargas hidráulicas de entrada e taxas de descargas unitárias ( $q$ ) dos sistemas drenantes (E,F,G e H). ....	40
Figura 7 - Relação entre resistências de entrada ( $r_e$ ) médias a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A,B,C,D,E,F,G e H). ....	41
Figura 8 - Relação entre diâmetros efetivos ( $D_{ef}$ ) e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A,B,C,D,E,F,G e H). ....	45

## LISTA DE APÊNDICE

Tabela A-1 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante A .....	54
Tabela A-2 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante B .....	54
Tabela A-3 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante C .....	55
Tabela A-4 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante D .....	55
Tabela A-5 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante E .....	56
Tabela A-6 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante F .....	56
Tabela A-7 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante G .....	57
Tabela A-8 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante H .....	57
Tabela A-9 - Cargas hidráulicas de entrada $h_e$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas A, B, C e D ...	58
Tabela A-10 - Cargas hidráulicas de entrada $h_e$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas E, F, G e H	58
Tabela A-11 - Relação entre cargas hidráulicas $h_e/h_{tot}$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas A, B, C e D ...	59
Tabela A-12 - Relação entre cargas hidráulicas $h_e/h_{tot}$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas E, F, G e H ...	59
Tabela A-13 - Resistência de entrada $r_e$ (dia/m) $\times 10^{-3}$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas A, B, C e D ...	60
Tabela A-14 - Resistências de entrada $r_e$ (dia/m) $\times 10^{-3}$ por ordem de magnitude com respectivas probabilidades apresentadas pelos sistemas E, F, G e H ...	60

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>3</b>
<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
<b>1 - FLUXO DA ÁGUA NO SOLO</b> .....	<b>3</b>
1.1 - Potencial Total .....	3
1.2 - Lei de Darcy .....	5
1.3 - Condutividade Hidráulica .....	6
1.4 - Espaço Poroso do Solo .....	6
1.4.1 - Porosidade Total .....	6
1.4.2 - Porosidade Drenável .....	7
<b>2 - FLUXO D'ÁGUA PARA OS DRENOS</b> .....	<b>8</b>
2.1 - Fluxo em Regime Permanente .....	8
2.2 - Fluxo em Regime Transitório .....	10
<b>3 - DESEMPENHO DO SISTEMA DRENANTE</b> .....	<b>12</b>
3.1 - Tubo Drenante .....	12
3.2 - Material Envoltório .....	14
<b>4 - FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO SISTEMA DRENANTE</b> .....	<b>16</b>
<b>5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DRENANTE</b> .....	<b>21</b>
5.1 - Testes em Campo .....	21
5.2 - Testes em Tanques de Areia .....	23
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>26</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
1 - CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	26
2 - MATERIAL UTILIZADO .....	26
3 - SISTEMAS DRENANTES .....	29
4 - LEITURAS DE CARGAS HIDRÁULICAS E VOLUMES DRENADOS .....	30
5 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	31
6 - DESEMPENHO DOS SISTEMAS DRENANTES .....	32
7 - PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO .....	34
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>35</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>46</b>
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>48</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>53</b>

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A recente expansão da agricultura irrigada no Brasil tem motivado o governo federal a dispensar especial atenção às áreas propícias para irrigação, no momento em que é traçada uma política voltada para essa finalidade através da Secretaria Nacional de Irrigação. Esta política tem como meta atingir os estados do Nordeste, abrangendo as áreas potencialmente irrigáveis na região de clima semi-árido.

De acordo com o Ministério da Agricultura existe, no Brasil, cerca de 24.000.000 ha de várzeas apropriadas para irrigação, porém, conforme salienta LAMSTER (1983), por falta de uma infra-estrutura de drenagem agrícola, não têm sido totalmente aproveitadas.

A drenagem de terras agrícolas constitui, sem dúvida nenhuma, um complemento indispensável aos projetos de irrigação, havendo situações em que se torna fator limitante à exploração agrícola, como é frequente nas áreas salinizáveis e de várzeas inundáveis.

O emprego da drenagem subsuperficial, através de drenos entubados, nos perímetros irrigados do Nordeste, praticamente inexistente, especialmente na região semi-árida, que é mais propensa aos problemas de salinização. Isso, porém, pode ser atribuído à falta de materiais apropriados no mercado, ou mesmo por falta de pesquisas sobre parâmetros intrínsecos do solo e de materiais drenantes.

Estudos relacionados com a elevação do lençol freático e a redução da produção agrícola têm mostrado que o excesso da água na zona de exploração radicular reduz a taxa de oxigênio disponível às plantas, cria uma resistência no fluxo da solução do solo para o interior das raízes, forma compostos indesejáveis, baixa a temperatura do solo, diminuindo a ação microbiana responsável pela mineralização da matéria orgânica e

promove a ascensão dos sais solúveis responsáveis pela salinização das terras irrigadas que não possuem sistemas de drenagem adequados.

O problema da salinização nas terras irrigadas no mundo é causado pelo fornecimento contínuo de sais dissolvidos na água de irrigação, ou pela elevação do lençol freático potencialmente salino. VAN DER MOLEN (1977), reportando-se sobre o balanço de sais e a necessidade de lavagem do solo, salienta que mesmo a água de irrigação sendo de boa qualidade pode salinizar um solo, de maneira que uma lâmina de 1000mm/ano de água, contendo 250mg/l de sais dissolvidos, leva para o solo 2500kg/ha de sais durante esse período. A lavagem dos sais do solo, por sua vez, requer a técnica da drenagem como uma das soluções conhecidas até o momento.

Apesar da implantação de uma rede de drenagem subterrânea implicar num alto custo inicial, tem-se observado que este custo, comparado com o gasto decorrente da construção, da perda de área e da manutenção de valas abertas, torna-se praticamente equivalente. É sabido ainda, que os gastos alusivos à implantação de um sistema de drenagem subterrâneo são originados pelos altos custos dos materiais necessários. Outrossim, alternativas de baixo custo, em particular aquelas que sejam facilmente aplicáveis a região Nordeste, devem ser utilizadas para tal finalidade. A propósito, a opinião de BATISTA et al. (1984), é que, no Brasil, até que seja produzido e facilmente disponível, o tubo de PVC corrugado pode ceder lugar ao tubo de PVC liso, próprio para esgoto, considerando o baixo custo final de um sistema implantado com esses tubos.

### **Objetivo Geral**

O presente trabalho teve como principal objetivo estudar a aplicabilidade do tubo de PVC para esgoto como material drenante não convencional.

### **Objetivos Específicos:**

- 1) Desenvolvimento em protótipos físicos de sistemas drenantes;
- 2) Análise estatística dos parâmetros hidráulicas dos sistemas drenantes e
- 3) Avaliação do desempenho dos sistemas drenantes em função dos parâmetros hidráulicos: cargas hidráulicas de entrada e total; resistência de entrada; fator de resistência e diâmetro efetivo.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO DE LITERATURA

#### 1 - FLUXO DA ÁGUA NO SOLO

##### 1.1 - Potencial Total

O estudo do movimento da água no solo é importante no desenvolvimento das teorias que tratam do dimensionamento dos sistemas de drenagem, quer seja em condições de regime permanente ou de regime transitório (PIRES et al.,1983).

A água no solo possui uma energia, independentemente da fase física na qual se encontra, e parte desta pode ser utilizada em seu movimento. Segundo REICHARDT (1978), a física clássica reconhece duas formas principais de energia a que todo corpo pode estar submetido: uma energia cinética (ou de movimento) e uma energia potencial (ou de posição). Considerando que a água no solo se movimenta com baixíssima velocidade, a energia cinética pode ser desprezível. Assim, os estudos relacionados com o movimento da água no solo, quer em situação de saturação ou não, fundamentam-se no estudo da energia potencial da água (BAVER et al.,1973; REICHARDT,1978)

A energia potencial da água no solo, segundo BAVER et al. (1973), é a combinação de várias formas de energia, sendo tão complexa quanto o estudo do fenômeno considerado. No caso do estudo do movimento da água no solo em condições de saturação, esses autores consideram a energia potencial de pressão e a energia potencial gravitacional, como as mais importantes. Consideram ainda que a energia potencial por unidade de massa ou volume de água é o potencial do líquido.

Segundo REICHARDT (1975), as formas mais utilizadas para definir as unidades do potencial da água no solo são: a) energia por unidade de volume igual a pressão ( $\frac{E}{V} = \frac{mgh}{V} = \rho gh$ ); e b) energia por unidade de peso ( $\frac{E}{P} = \frac{mgh}{mg} = h$ ) que

representa também pressão quando indica uma coluna d'água ou carga hidráulica. De acordo com o mesmo autor, o potencial total da água no solo pode ser definido matematicamente como :

$$Y = Y_p + Y_g + Y_m + Y_{os} \quad (1)$$

onde:

$Y$  é o potencial total da água no solo (L)

$Y_p$  é o potencial de pressão (L)

$Y_g$  é o potencial gravitacional (L)

$Y_m$  é o potencial matricial (L)

$Y_{os}$  é o potencial osmótico (L)

A soma dos dois potenciais de pressão e gravitacional, sob condições de saturação do solo, e com dimensões de cargas hidráulicas, de acordo com BAYER et al. (1973), representa o potencial hidráulico da água no solo, podendo ser escrito como:

$$H = H_p + H_g \quad (2)$$

onde:

$H$  é o potencial hidráulico (L)

$H_p$  é o potencial hidráulico de pressão (L)

$H_g$  é o potencial hidráulico gravitacional (L)

Para REICHARDT (1975), o movimento da água entre dois pontos só é possível quando existe uma diferença de potencial entre os mesmos, isto é, quando há uma variação da energia potencial da água e o movimento ocorre no sentido do maior para o menor potencial, obedecendo ao princípio universal de que todo corpo tende naturalmente a atingir seu estado mínimo de energia. Segundo o mesmo autor, essa diferença de potencial, responsável pelo deslocamento da água, define o gradiente

hidráulico utilizado nos estudos do movimento do lençol freático para diferentes pontos do terreno.

## 1.2 - Lei de Darcy

Os estudos iniciais que possibilitaram quantificar o movimento da água no solo se deve a Darcy, que, em 1856, descreveu o fluxo da água num meio poroso (coluna de areia) como sendo proporcional ao produto da área transversal interceptada pelo fluxo e o gradiente entre os pontos considerados (LUTHIN, 1974; REICHARDT, 1975; BELTRAN, 1986). A equação de fluxo definida por Darcy pode ser escrita como:

$$Q = - K.i.A \quad (3)$$

onde:

$Q$  é o fluxo, descarga ou vazão  $L^3.T^{-1}$

$K$  é a permeabilidade ou condutividade hidráulica do meio poroso ( $L.T^{-1}$ )

$i$  é o gradiente hidráulico (adimensional)

$A$  é a área da secção transversal de escoamento ( $L^2$ )

O sinal negativo da Equação de Darcy indica que a direção do fluxo ocorre com o decréscimo da carga hidráulica (BELTRAN, 1986). Segundo OOSTERBANN (1992), as experiências de Darcy foram conduzidas em uma coluna de solo confinado e de seção uniforme que possibilita um fluxo constante. Porém, a Equação (3) pode também ser aplicada às condições de fluxo não uniforme, isto é, quando a seção de escoamento no sentido do deslocamento for variável.

A lei de Darcy permite traçar certas comparações com outras leis físicas, por exemplo, com a lei de Ohm  $i = \frac{V}{r}$ , onde:  $i$  é a intensidade de corrente,  $V$  é a potência e  $r$  é a resistência ôhmica.

Fazendo-se uma analogia entre as duas leis, verifica-se que o inverso da condutividade hidráulica  $\frac{1}{K}$  é comparável à resistência da lei de Ohm. Portanto, o

inverso da condutividade hidráulica representa uma resistência do fluxo da água ao seu deslocamento (DIELEMAN & RIDDER, 1977).

### **1.3 - Condutividade Hidráulica**

A constante de proporcionalidade  $K$  da lei de Darcy, também conhecida como condutividade hidráulica, é uma importante propriedade do solo utilizada no dimensionamento de sistemas de drenagem para estabelecer espaçamento e profundidade de drenos e em pesquisas de campo e protótipo físico (tanques de areia) para diagnosticar as propriedades hidrológicas dos materiais drenantes (NIEUWENHUIS & WESSELING, 1978; WESSELING, 1978)

BATISTA (1992), reportando-se sobre condutividade hidráulica, revela que os valores deste parâmetro obtidos em laboratório não refletem a realidade de campo. Por isso, segundo o autor, em estudos de drenagem subterrânea o que interessa são os valores da condutividade hidráulica do solo na presença do lençol freático.

### **1.4 - Espaço Poroso do Solo**

#### **1.4.1 - Porosidade Total**

O espaço poroso do solo é a porção ocupada pelo ar e pela água, teoricamente representado em torno de 50% do solo, que é originado pelo arranjo das partículas sólidas no perfil. Em solos arenosos e subsolo compactos, a porosidade total é reduzida. Em solos de textura média e com elevado teor de matéria orgânica, o espaço poroso total é elevado (BUCKMAN & BRADY, 1976).

Segundo VAN BEERS (1977), a porosidade total em solos minerais varia entre 35% em solos compactos a 60% em solos soltos e superficiais e, ao se considerar as propriedades de transmissão e retenção da água no solo, é mais importante a distribuição dos poros por tamanho do que o espaço poroso total, conforme mostra a Tabela 1.

**TABELA 1- Critérios de classificação dos poros do solo em função do tamanho e condução da água (VAN BEERS, 1977)**

Nome descritivo	Tamanho (micra)	Principal função
Macroporos	100	Aeração e drenagem (Fluxo por gravidade)
Mesoporos	30-100	Condução da água (Fluxo capilar rápido)
Microporos	3-30	Condução da água (Fluxo capilar lento)

#### 1.4.2 - Porosidade Drenável

A elaboração e implantação de projetos de drenagem subsuperficial para regime de fluxo variável exigem o conhecimento de propriedades hidrológicas do solo como condutividade hidráulica e porosidade drenável (QUEIROZ, 1987; BELTRAME & FIETZ, 1988)

Segundo BELTRAME & FIETZ (1988), a condutividade hidráulica é de fácil obtenção, enquanto o conhecimento da porosidade drenável exige equipamentos laboratoriais ou áreas piloto de campo. Por esta razão, o emprego da relação entre estas duas propriedades hidrológicas para estimativa da segunda assume grande importância nos estudos de drenagem, conforme trabalhos de Baver (1939) e Van Beers (1966), citados por BELTRAME & FIETZ, (1988)

Por outro lado, Taylor (1959), citado por QUEIROZ (1987), tem utilizado a flutuação do lençol freático e sua descarga para determinar a porosidade drenável através da seguinte equação matemática:

$$\mu = \left[ \frac{V}{A_d} (Z_n - Z_{n-1}) \right] \cdot 100 \quad (4)$$

onde:

$\mu$  é o espaço poroso drenável em (%);

$V$  é o volume d'água drenado ( $L^3$ );

$A_d$  é a área da seção do perfil do solo drenado ( $L^2$ );

$Z_n$  é a profundidade do lençol freático após drenagem ( $L$ ) e

$Z_{n-1}$  é a profundidade inicial do lençol freático ( $L$ )

## 2 - FLUXO D'ÁGUA PARA OS DRENOS

### 2.1 - Fluxo em Regime Permanente

DIELEMAN & TRAFFORD (1976) consideram que o regime de fluxo é permanente quando ocorre um equilíbrio da recarga do lençol freático com sua respectiva descarga. A recarga do lençol freático pode ser proveniente da irrigação ou da chuva. Segundo esses autores, a condição de equilíbrio do lençol freático se torna difícil com a utilização da irrigação por métodos superficiais, podendo ser conseguida pela irrigação por aspersão ou com chuvas prolongadas se bem distribuídas.

A maioria das resoluções dos problemas de fluxo d'água e sistemas de drenagem se baseiam nas simplificações da teoria de Dupuit-Forchheimer (1863; 1930), expressa por VAN SCHILFGAARDE (1974). Essas hipóteses simplificadoras consideram as linhas de fluxo em direção aos drenos como sendo paralelas e horizontais. Consideram, ainda, o limite superior da região de fluxo como sendo a capa freática, cuja altura determina a carga hidráulica na seção considerada, a declividade da capa freática define o gradiente hidráulico, e em uma seção vertical a densidade de fluxo é constante (KIRKHAN, 1966; GROENEVELT & KUNE, 1977; BELTRAN, 1986)

Hooghoudt (1940), citado por DIELEMAN & TRAFFORD (1976), em estudos análogos sobre fluxo em direção a um poço inserido verticalmente num lençol e um dreno tubular subterrâneo, verificou que o fluxo pode ser essencialmente radial se o solo for homogêneo, isotrópico e de profundidade infinita, isto é, a barreira impermeável está muito distante dos drenos. Concluindo, afirmou que tanto o fluxo horizontal como radial são válidos para condições particulares e que as equações não podiam ser generalizadas. Com isto, propôs uma solução baseada nas hipóteses combinadas do

fluxo horizontal e radial. Através de extensos cálculos, considerando as hipóteses simplificadoras de Dupuit-Forchheimer (1863-1930) válidas, levando em consideração a existência de duas regiões de fluxo e que os drenos estariam situados no limite entre estas duas regiões, Hooghoudt deduziu uma equação que combinou os fluxos horizontal e radial simultaneamente (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976; CRUCIANI, 1980; MILLAR, 1987). A Equação de Hooghoudt foi originalmente escrita sob a forma:

$$q = \frac{4.K_1.h^2}{S^2} + \frac{8.K_2.D.h}{S^2} \quad (5)$$

onde:

- $q$  é a descarga do dreno em  $(L.T^{-1})$ ;
- $K_1$  e  $K_2$  são respectivamente as condutividades hidráulicas das regiões de fluxo, acima e abaixo do dreno.  $(L.T^{-1})$ ;
- $D$  é a distância da camada impermeável até o nível d'água nos drenos  $(L)$ ;
- $h$  é a carga hidráulica sobre os drenos  $(L)$  e
- $S$  é o espaçamento entre drenos  $(L)$

Para considerar a influência radial, Hooghoudt introduziu uma profundidade  $d$ , no lugar de  $(D)$ , e denominou-a de camada equivalente. Esta camada é menos espessa do que a camada real  $(D)$  e é função do diâmetro do tubo drenante, e do espaçamento  $S$  (BELTRAN,1986). Desde que  $0 < d/S < 0,3$ , a Equação que define a camada equivalente de Hooghoudt é escrita sob a forma:

$$d = \frac{D}{\left[ 2,5 \left( \frac{D}{S} \right) \ln \left( \frac{D}{P} \right) + 1 \right]} \quad (6)$$

onde:

- $d$  é a camada equivalente de Hooghoudt  $(L)$  e

$P$  é o perímetro molhado do dreno ( $L$ )

Segundo WESSELING (1977), a equação de Hooghoudt é largamente utilizada nos cálculos para dimensionar espaçamento de drenos a partir dos fatores: recarga; distância da capa freática até os drenos; condutividade hidráulica e altura da camada impermeável até o nível dos drenos. Pode ser também utilizada para calcular as constantes do solo tais como: condutividade hidráulica; altura da camada impermeável (quando se conhece a recarga); espaçamento e o raio do tubo drenante.

Donnan (1946), com base em Dupuit-Forchheimer e na condição de um regime permanente, apresentou uma equação semelhante a de Hooghoudt. A equação não considera a influência do fluxo radial e a profundidade da barreira deve ser considerada pequena para validar sua teoria (DIELEMAN & RIDDER, 1977).

Nos projetos de drenagem nem sempre é possível fazer coincidir a profundidade dos drenos com o limite entre duas camadas de diferentes permeabilidades. Diante destas dificuldades apresentadas nas teorias de Hooghoudt, Ernst (1956) apresentou uma solução para fluxo em regime permanente, particularmente adequada aos solos aluviais estratificados, em que o limite das camadas de diferentes permeabilidades pode estar acima ou abaixo da linha dos drenos (WESSELING, 1977; BELTRAN, 1986).

## **2.2 - Fluxo em Regime Transitório**

Em regiões com precipitações pluviométricas elevadas e frequentes, torna-se difícil aceitar as hipóteses de regime de fluxo permanente, conforme trabalharam Hooghoudt, Donnan e Ernst, cujo critério teórico foi considerar a recarga igual a descarga com o nível do lençol freático estabilizado. Na realidade, o fluxo está num processo dinâmico e, por isso, a hipótese de fluxo variável na direção dos drenos parece ser melhor entendida. Assim, os critérios de drenagem para regime de fluxo transitório são formulados em função da velocidade com que se deseja rebaixar o nível do lençol, após sua elevação (WESSELING, 1977; PIZARRO, 1978; BELTRAN, 1986).

Glover e, em seguida, Dumm (1954), ambos discutidos em VAN SCHILFGAARDE (1974), desenvolveram estudos para solucionar problemas de drenagem em regime transitório, como é frequente em regiões de elevadas precipitações irregulares ou em regiões semi-áridas sob condições de irrigação periódica. Esses autores apresentam uma fórmula simplificada que se baseia no princípio da propagação do fluxo de calor através de sólido e estabelece que inicialmente a capa freática é horizontal a certa altura sobre o nível dos drenos e que não permanece horizontal, em função do tempo de descarga ( $t$ ), para que o lençol passe de uma posição inicial ( $h_o$ ) para uma posição final ( $h_i$ ), em função do espaçamento entre os drenos ( $S$ ) e das propriedades do solo. A Equação de Glover-Dumm pode ser escrita da seguinte forma:

$$S^2 = \pi^2 \cdot \frac{KD \cdot t}{\mu} \cdot \frac{1}{\left( \ln 1,16 \cdot \frac{h_o}{h_i} \right)} \quad (7)$$

onde:

- $S$  é o espaçamento entre os drenos (L);
- $KD$  é a transmissividade do solo ( $L^2 \cdot T^{-1}$ );
- $\mu$  é a porosidade drenável do solo (%);
- $h_o$  é a altura inicial do lençol sobre os drenos (L);
- $h_i$  é a altura do lençol sobre os drenos após seu rebaixamento (L) e
- $t$  é o tempo em dias para que o lençol passe da altura inicial para a final

O emprego da Equação de Glover-Dumm não só permite determinar o espaçamento entre drenos, em projetos a serem instalados, como também possibilita determinar os parâmetros tais como: condutividade hidráulica; capacidade de armazenamento do solo; porosidade drenável; espessura do lençol freático e profundidade da camada impermeável, a partir de testes em projetos já implantados (MILLAR, 1988).

### 3 - DESEMPENHO DO SISTEMA DRENANTE

#### 3.1 - Tubo Drenante

Os tubos utilizados na drenagem subterrânea com fins agrícola, são estruturas que visam controlar o nível do lençol freático, com o objetivo de aumentar a produção dos cultivos. Na escolha dos tubos drenantes, o critério básico adotado é que estes atendam às necessidades locais sob o ponto de vista técnico e econômico (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976).

Segundo WESSELING & VAN SOMEREN (1972), um sistema drenante é considerado eficiente quando é capaz de drenar com suficiente rapidez o excesso da água de um solo. Outrossim, sua eficiência é frequentemente descrita em termos de altura do nível freático, sendo o sistema considerado ineficiente quando se observam níveis elevados sobre os drenos. Referindo-se ao diâmetro dos tubos drenantes, esses autores consideram que de certa forma o diâmetro determina a forma do nível freático, de modo que, quanto maior for o diâmetro mais fácil será a circulação da água, melhorando a capacidade de transporte e minimizando o efeito de acúmulo de sedimentos.

Nas observações de CAVELAARS (1977) e JOHNSTON (1978), os tubos de cerâmica, bem como os de concreto, são vantajosos apenas por serem de diâmetros maiores e por suportarem grandes pressões externas. Porém, são muito pesados, o que dificulta e elevam os custos de implantação. No caso específico do tubo de concreto, há uma desvantagem adicional, uma vez que, está sujeito a desintegração por ácidos e sulfatos existentes no solo, podendo inviabilizar o projeto de drenagem. Salientam, ainda, que já foram muito usados nos países baixos antes do surgimento dos tubos de plástico. DIELEMAN & TRAFFORD (1976), reportando-se sobre tipos de tubos para drenagem, consideram que os tubos de cerâmica e de concreto podem ser menos eficientes do que os tubos de PVC lisos e corrugados com relação a entrada da água. Isto porque as linhas de corrente são obrigadas a se desviarem para as junções dos tubos por onde penetram, promovendo um aumento da perda de carga do fluxo na direção dos drenos com o surgimento da resistência de entrada.

Segundo FOUSS (1974) os trabalhos envolvendo as primeiras pesquisas com tubos de plástico para drenagem, ocorreram com as investigações de Schwab (1947-1954), podendo este ser considerado o período de desenvolvimento e uso do tubo de plástico nos USA, se não no mundo. VAN ZEIJTS (1978) reportando-se sobre a utilização do tubo de plástico liso, em projetos de drenagem na Holanda, salienta que até 1972, este país já tinha aplicado cerca de 10.000 km deste tubo, em rede de drenagem coberta, abrangendo uma área de aproximadamente 16.000 ha.

Desde que foram introduzidos em projetos de drenagem, a demanda dos tubos plásticos tem aumentado consideravelmente. Inicialmente, foram produzidos com superfície lisa e de comprimento bem maiores do que os tubos de cerâmica e de concreto. A partir de 1965 passaram a ser fabricados sob a forma corrugada, que os tornam flexíveis, podendo ser produzidos em bobinas de comprimento variável (FOUSS, 1974; BELTRAN, 1986; CAVELAARS, 1977).

Considerando a eficiência de condução, os tubos de PVC lisos podem apresentar melhor desempenho como tubo drenante. Na condução da mesma vazão, o diâmetro do tubo liso, com relação ao tubo corrugado, pode ser reduzido até 25%. Além disso, são menos susceptíveis ao entupimento por invasão de partículas do solo (CAVELAARS, 1977).

A hipótese de dreno ideal, assumida nos cálculos de espaçamento de linhas de drenos em projetos de drenagem, não é verdadeira. Os tubos drenantes têm superfícies impermeáveis, obrigando as linhas de corrente a se deslocarem para as extremidades destes ou para as perfurações neles distribuídas, resultando, portanto, uma resistência de entrada responsável pela redução do diâmetro efetivo do dreno real (KNOPS & DIERICKX, 1978; NIEUWENHUIS & WESSELING, 1978; DIERICKX & VAN DER MOLEN, 1981; TILLIGADAS, 1988).

A forma de corrugação introduzida no tubo de PVC tem produzido diversas vantagens a este tubo em projetos de drenagem agrícola. Segundo FOUSS (1974); STUYJT (1989); CAVELAARS (1977) e KNOPS et al. (1978), o formato corrugado da superfície do tubo, garante melhor estabilidade sobre pressão externa, maior e melhor

distribuição das perfurações sem enfraquecer o tubo. Além disso, a flexibilidade imposta pelas corrugações permite que o tubo seja produzido em bobinas de comprimento muitas vezes superior ao tubo liso. Garante, também, a sua implantação através de máquinas apropriadas utilizadas com a finalidade de reduzir os custos dos projetos. Por outro lado, a implantação inadequada do tubo corrugado pode inverter o declive contribuindo para a formação de bolsas de ar ao longo do comprimento do dreno, e com isso acelerar o processo de entupimento por partículas do solo (STUYJT, 1989).

### 3.2 - Material Envoltório

WILLARDSON (1974) conceitua envelope para dreno como material que apresenta boa condutividade hidráulica e promove aumento no diâmetro efetivo do tubo drenante. Além disso, o envelope deve estabilizar o solo nas vizinhanças do dreno, prevenindo a invasão de partículas do solo para o tubo.

De acordo com DIELEMAN & TRAFFORD (1976), a finalidade principal de qualquer material de envelope é aproximar a eficiência de um dreno real a um ideal. Para isso, o material utilizado deve apresentar uma condutividade hidráulica da ordem de 10 a 100 vezes mais do que a do solo. Também é importante que o material a ser colocado como envelope contorne por completo o tubo. Assim, consegue-se aumentar a eficiência do sistema drenante com um aumento do diâmetro efetivo do dreno.

Notavelmente, as partículas inorgânicas granulares são mais utilizadas como material para envelope de drenos, por apresentarem elevada condutividade hidráulica e vida útil prolongada. Na opinião de WESSELING & VAN SOMEREN (1972), WILLARDSON (1974), MILLAR (1978) e STUYJT (1989), são considerados envelopes inorgânicos os cascalhos e areia grossa, podendo ser ainda utilizado o solo superficial, contanto que contenha baixo ou nenhum conteúdo de matéria orgânica. Esses materiais, porém, têm uso limitado em algumas regiões em decorrência de elevados custos. KNOPS & DIERICKX (1978) consideram que esses materiais são muito utilizados em solos arenosos, siltosos e dispersivos, em áreas irrigadas de regiões áridas e semi-áridas, por exigirem material espesso e de elevada condutividade hidráulica.

No sentido de permitir a mecanização na implantação de drenos subterrâneos, nas últimas décadas, tem-se desenvolvido muito rapidamente a utilização das fibras sintéticas de fina espessura, conhecidas como fibras geotextil (WILLARDSON & WALKER, 1979). Esses materiais, ao contrário dos materiais inorgânicos, são produzidos com pequena espessura e apresentam elevada condutividade hidráulica, além de permitirem o pré-envelopamento dos tubos drenantes, nas instalações mecanizadas. Segundo IRWIN & HORE (1978), testes de campo e resultados obtidos em laboratórios com materiais sintéticos, não têm registrados falhas em drenos entubados. Porém, WESSELING & VAN SOMEREN (1972), reportando-se sobre tipos de materiais para envelope de drenos, utilizados nos países baixos, consideram, por exemplo, que lona de vidro e fibra de vidro de pequena espessura têm demonstrado pouca eficiência como material drenante, sendo muito vulneráveis ao fechamento dos poros em solos contendo elevados níveis de areia fina, silte, matéria orgânica e óxido de ferro.

A expectativa da vida útil e adequabilidade de materiais orgânicos não são conhecidas para totais condições de solo. Segundo STUYJT (1989), a matéria orgânica pode afetar as reações químicas e biológicas do solo resultando portanto, em problemas de fechamento (clogging) dos drenos. Se o óxido de ferro estiver presente, o envelope orgânico poderá ser utilizado com cautela, segundo comenta o autor. Para WILLARDSON (1974), o sucesso de materiais orgânicos como envelope de drenos, depende das propriedades físicas e químicas de cada solo.

Os estudos de BENATTI Jr. et al. (1983), referindo-se à durabilidade de diferentes fibras vegetais utilizadas como envelope de drenos em condições de laboratório, demonstraram susceptibilidade à deteriorização em curto espaço de tempo. Segundo observam esses autores, os resultados negativos podem ser atribuídos às condições severas, intencionais, a que foram submetidos esses materiais, com sucessivos períodos de encharcamento e ressecamento do solo, seguramente diferente do mecanismo da variação do lençol freático nas condições naturais de campo.

DIERICKX (1987), reportando-se sobre as funções hidráulicas dos materiais para envelope de drenos, constatou que aqueles mais volumosos, no caso de materiais

orgânicos e inorgânicos, são mais eficientes do que os materiais de espessura fina, a exemplo das fibras sintéticas. A explicação, portanto, para este fato deve-se ao aumento considerável do raio efetivo do dreno.

#### 4 - FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO SISTEMA

##### DRENANTE

Os fatores que influenciam diretamente o rendimento de um sistema drenante, segundo DIELEMAN & TRAFFORD (1976), são: abertura nas junções dos tubos drenantes; perfurações ou ranhuras nas paredes dos tubos de plástico e propriedades hidrológicas do material de envelopamento. Por sua vez, esses fatores sofrem influências da distribuição e espessura do envelope, da estabilidade do terreno, da altura do lençol freático, da umidade atual do solo, das condições meteorológicas reinantes durante a implantação dos drenos, da altura da vala e da presença de elementos químicos indesejáveis.

Um fator pouco citado na literatura especializada que pode influenciar o rendimento de um sistema de drenagem subterrânea, é a resistência hidráulica oferecida ao fluxo pelos diferentes tubos drenantes. Segundo WESSELING & HOMMA (1967), para tubos plásticos, a resistência hidráulica ao escoamento da água depende da qualidade das perfurações, enquanto para tubos de cerâmica a aspereza da superfície interna é um importante fator. Para tubos de plásticos corrugados, esses autores recomendam utilizar o fator de resistência  $K_m = 71$ , previsto na fórmula de Manning.

IRWIN & MOTYCKA (1979), referindo-se ao fator de fricção em tubos de plásticos corrugados, consideram que estes tubos são hidraulicamente menos vantajosos do que os tubos de cerâmica e de concreto, devido a presença das rugosidades da superfície interna. Salientam ainda que a perda de carga hidráulica ( $h$ ) no tubo é proporcional ao fator de fricção ( $f$ ), ao quadrado da velocidade da água, ao comprimento do tubo e inversamente proporcional ao diâmetro e o dobro da aceleração da gravidade apresentados na fórmula de Darcy-Weisbach  $h = f \cdot \left( \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \right)$ , e que o fator de fricção ( $f$ ) não é um valor constante, porém depende da geometria da

rugosidade, isto é, da altura, da espessura e da distribuição destas. Contudo, BATISTA (1983), referindo-se ao funcionamento dos tubos corrugados sem envelope em solos de boa estabilidade, reporta que o solo dentro das corrugações naturalmente não é compactado, mantendo uma alta permeabilidade ao fluxo; o que não acontece com tubos de cerâmica e plástico de paredes lisas.

PARFFIT & CRUCIANI (1988), estudando a geometria de perfuração em drenos tubulares e suas descargas subterrâneas, ressaltam que a literatura em geral enfatiza a necessidade de mais informações sobre o desempenho dos drenos, nas mais variadas condições de geometria de perfurações para entrada d'água. Também salientam que todas as equações de cálculo de espaçamento de linhas de drenos em projetos de drenagem consideram que este espaçamento é proporcional a condutividade hidráulica do solo, e inversamente proporcional à taxa de descarga exigida dos drenos. Porém, não fazem referências ao tipo de dreno, se aberto ou fechado, e ao número de perfurações que o tubo deve conter.

As dimensões e formas das aberturas para entrada d'água nos tubos de drenagem, que são utilizadas em diferentes países europeus, têm sido examinadas pela FAO, sendo constatado que no caso de tubos lisos de PVC pode-se adaptar uma fórmula combinando a resistência física dos tubos e a aquisição destes com um preço mais econômico. WESSELING & VAN SOMEREN (1972) destacam que a distância mínima necessária entre tubos de cerâmica para entrada d'água deixa contradições. Com o objetivo de manter a perda de carga hidráulica nas proximidades das junções dentro de limites desprezíveis, aconselha-se nos Estados Unidos, para solos estáveis, uma separação de 3 a 10 mm. Em solos arenosos e limosos são preferíveis tubos unidos por juntas. Também, depende muito da qualidade dos tubos. De acordo com as experiências práticas dos países baixos, os tubos devem ser colocados de modo a se tocarem.

No que se refere aos tubos de plásticos, WESSELING & VAN SOMEREN (1972) ressaltam que quanto maior for o número de perfurações no tubo, melhor será a entrada d'água. Porém, isto diminui sensivelmente a sua resistência física. A fim de evitar

paredes demasiadamente espessas para poder manter o preço o mais reduzido possível, nos países baixos, o número de perfurações é de 40 por metro linear, com aberturas de 25 mm de comprimento por 0,6 a 0,9 mm de largura, o que origina uma área porosa de entrada com 9 cm<sup>2</sup>/m. As experiências de laboratório e de campo têm demonstrado que as perdas hidráulicas causadas pela resistência de entrada são desprezíveis com estas considerações.

Segundo NIEUWENHUIS & WESSELING (1979) e DIERICKX (1986), o rendimento dos tubos drenantes depende da área porosa de entrada, do formato das perfurações e da distribuição dos furos na superfície do tubo. Consideram ainda que, com a mesma área de entrada, porém com perfurações de diâmetros menores, conseqüentemente maior número de furos, o desempenho do sistema drenante pode melhorar consideravelmente.

DIERICKX (1987), reportando-se sobre a escolha de materias para drenagem subterrânea, ressalta que no tubo drenante comercial, a área de entrada não é muito diferente de 1 a 2% da área superficial do tubo. Assim, a diferença entre dreno real e dreno ideal é bem acentuada. Considera ainda que os estudos relacionados com o diâmetro comercial do tubo e a resistência de entrada têm demonstrado pouca influência, enquanto que a resistência exerce influência direta sobre o diâmetro efetivo. Desta forma, pode-se fazer uso da equação que define o diâmetro efetivo em função do diâmetro comercial e do fator de resistência.

$$D_{ef} = D_o \cdot e^{(-2 \cdot \pi \cdot \alpha)} \quad (8)$$

onde:

$D_{ef}$  é o diâmetro efetivo do dreno ( $L$ );

$D_o$  é o diâmetro comercial do tubo ( $L$ ) e

$\alpha$  é o fator de resistência adimensional.

A penetração de partículas de solo em tubo drenante, tem causado graves problemas em drenagem de terras agrícolas. Solos arenosos e siltosos de fraca estruturação são os que mais influenciam o fenômeno. Desta forma, a utilização de envelopes na composição do sistema drenante é de fundamental importância (DIERICKX,1986): O mesmo autor revela que existe a necessidade urgente para resolver a questão. Referindo-se ao uso de determinado material para envelope, ressalta que envelopes orgânicos espessos não têm demonstrado rendimento satisfatório, devido a sua pouca durabilidade. Por outro lado, envelopes sintéticos de fina espessura também são vulneráveis ao fenômeno de "clogging", responsável pelo fechamento interno do tubo. A natureza e o aspecto hidráulico do material de envelope é de fundamental importância no desempenho de qualquer sistema drenante. Segundo DIERICKX (1987) e STUYJT (1989), a permeabilidade elevada é responsável pelo aumento do diâmetro efetivo do dreno, devido o contato entre a área do material com o solo circunvizinho e a superfície do tubo dreno, além de facilitar o fluxo em direção às perfurações de entrada. Desta forma, a resistência de entrada pode ser diminuída.

KNOPS & DIERICKX (1978), ressaltam que a condutividade hidráulica do material de envelope deverá ser no mínimo o equivalente a do solo circunvizinho ao dreno, no sentido de garantir uma resistência aceitável. Ressaltam ainda que a alta condutividade hidráulica reduz o risco causado pelo gradiente de saída, no sentido de impedir o movimento de partículas de solo para os drenos.

BATISTA (1980) e DIERICKX (1986), consideram que o gradiente hidráulico de saída ou de falha, pode alcançar um valor crítico responsável pelo rompimento da estrutura do solo nas vizinhanças do dreno. Este rompimento tem uma relação direta com o índice de plasticidade do solo. Assim sendo, BATISTA (1983) recomenda a utilização de envelopes com elevada condutividade hidráulica em solos de fraca estabilidade.

O risco de fechamento de drenos e envelopes, por partículas finas do solo, depende fundamentalmente de sua textura e estrutura. A função mecânica dos materiais de envelopamento de tubos drenantes é, portanto, evitar a migração das partículas do solo

para o dreno. Segundo STUYJT (1989), o risco de fechamento é mais acentuado em solos com predominância de areia fina e silte. Uma abordagem feita por DIERICKX & YOUCOUGLU (1988) tem consideração similar.

Tentativas no sentido de avaliar o emprego de envoltório em drenos subterrâneos têm se baseado em alguns aspectos da mecânica dos solos. Segundo DIELEMAN & TRAFFORD (1976), são recomendadas as faixas de valores da uniformidade ( $u$ ) das partículas:

$u >$	15	sem tendência à sedimentação;
$u$ entre	5-15	pouca tendência à sedimentação e
$u <$	5	elevada tendência à sedimentação.

Outro aspecto considerado, e citado por BATISTA (1983), é a relação argila/silte. Se maior do que 0,5 existe baixa possibilidade de ocorrer sedimentação. Além destes fatores, o índice de plasticidade ( $IP$ ) também tem sido utilizado como referência para indicar o uso de envelope em drenos entubados. Segundo DIELEMAN & TRAFFORD (1976), para as faixas de valores de:

$IP >$	12	não existe tendência à sedimentação;
$IP$ entre	6-12	existe pouca tendência à sedimentação e
$IP <$	6	existe alta tendência à sedimentação.

As condições meteorológicas, presença do lençol freático e teor de umidade elevado do solo, por ocasião da instalação do sistema drenante, têm motivado a ocorrência de falhas dos sistemas de drenagem subterrâneos. Segundo KNOPS & DIERICKX (1978), essas condições, aliadas a um local de assentamento dos drenos inadequado (por exemplo, valeta em nível e se tratando de solos sensíveis a desestruturação), têm sido as principais causas de falhas. Salientam, ainda, que o solo de enchimento das valas, desestruturado por ocasião da escavação, pode contribuir sensivelmente ao fechamento

dos poros do material de envelope sob condições de umidade elevada ou de alto ressecamento.

A vida útil do sistema drenante também tem sido avaliada quanto ao desempenho de drenos. Hakansson (1968), citado por WESSELING & VAN SOMEREN (1972), comparando dados de diferentes anos em projetos de drenagem subterrânea, constatou que, para a maioria dos materiais investigados, os valores da resistência de entrada foram sempre crescentes com a idade do sistema. Isso, porém, pode ser consequência da mudança do estado físico do solo com relação as suas propriedades hidrológicas (WESSELING & VAN SOMEREN,1972)

## **5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DRENANTE**

### **5.1 - Testes em Campo**

Os trabalhos de pesquisa que visam a obtenção de novos materiais para drenagem subsuperficial, bem como tecnologias operacionais de implantação de drenos subterrâneos, receberam especial atenção nos países europeus (especialmente nos países baixos) e nos Estados Unidos, decorrente das investigações em campo e laboratório. Em laboratório são testados materiais que posteriormente serão utilizados em condições de campo, onde são aproveitadas as propriedades hidrológicas que apresentam melhor desempenho (WESSELING & VAN SOMEREN,1972; KNOPS,1978; ZUIDEMA & SCHOLTEN,1978).

QUEIROZ & OLIVEIRA (1988) ressaltam que ensaios com sistemas pilotos, desenvolvidos em condições de campo, além de proporcionarem informações acerca do desempenho dos materiais drenantes, permitem ainda testar novas técnicas de instalações de drenos subterrâneos e avaliar as equações teóricas desenvolvidas para determinadas condições de solo e clima.

Segundo DIELEMAN & TRAFFORD (1976), há casos em que só se efetuam uma ou duas inspeções no ano seguinte às instalações de drenos. Quando se constata escoamento nas saídas dos drenos, considera-se que o sistema funciona bem.

Naturalmente, estas inspeções não correspondem a critérios tecnicamente científicos. Se a vazão é pequena, enquanto os níveis freáticos estão muito acima dos drenos, a carga hidráulica a que está submetido o sistema é considerada como de má qualidade. Segundo esses autores, a vazão dos drenos não deve ser considerada isoladamente sem se levar em conta os fatores que a influenciam, principalmente, a carga hidráulica de entrada.

DIELEMAN & TRAFFORD (1976) observam que a teoria de Ernst (1954 -1962) permite descrever a eficiência de um sistema drenante por meio de resistências a que está submetido o fluxo d'água até os drenos, sendo estas representadas usualmente por cargas hidráulicas. Assim, existe uma componente vertical ( $h_v$ ) na zona compreendida entre o fundo da vala e o nível freático; uma componente horizontal ( $h_h$ ) que sofre influência direta das propriedades do solo e do espaçamento entre drenos; uma componente radial ( $h_r$ ), influenciada pelas propriedades do solo e pela geometria dos drenos; e ainda uma componente de entrada ( $h_e$ ), que depende da permeabilidade do material de envelope, da geometria das perfurações para entrada d'água no tubo, bem como do material de enchimento da vala.

DIELEMAN & TRAFFORD (1976), referindo-se à avaliação do desempenho dos sistemas drenantes sob condições de campo, consideram que a carga hidráulica de entrada ( $h_e$ ) constitui um parâmetro importante, tanto como um valor singular como no fracionamento da perda de carga total, por definir a resistência de entrada como perda de carga por unidade de fluxo. Além disso, ao se analisar o rendimento do sistema drenante, é necessário relacionar os dados da vazão com as condições do solo e do nível freático. Esses autores têm recomendado tomar a relação entre a carga de entrada ( $h_e$ ) e a carga total ( $h_{tot}$ ) como critério para avaliação do desempenho dos sistemas drenantes.

Segundo WESSELING & VAN SOMEREN (1972) e WESSELING (1978), a resistência de entrada ( $r_e$ ) pode ser calculada mediante a Equação:

$$r_e = \frac{h_e \cdot C}{q} \quad (9)$$

onde:

- $r_e$  é a resistência de entrada ( $T.L^{-1}$ );  
 $h_e$  é a carga hidráulica de entrada ( $L$ );  
 $C$  é o comprimento do dreno ( $L$ ) e  
 $q$  é a descarga do dreno ( $L^3.T^{-1}$ )

O fator de resistência ( $\alpha$ ), de acordo com a teoria de Engelund (1953) citado por WESSELING & VAN SOMEREN (1972), depende do diâmetro do tubo drenante, da forma e da distribuição das aberturas para entrada d'água. E pode ser calculado mediante a Equação 10:

$$\alpha = r_e \cdot K \quad (10)$$

onde  $\alpha$  é o fator de resistência adimensional

## 5.2 - Testes em Tanques de Areia

A utilização de tanques de areia nos estudos de fluxo d'água para drenos subterrâneos é muito importante. Os tanques devem ser empregados em estudos de situações que não podem ser analisadas através de modelos teóricos. Em particular, existe boa evidência de que a elevada velocidade do fluxo nas vizinhanças das linhas de drenos causa turbulência, e conseqüente perda de energia que não é prognosticada. Neste caso, as medições diretas feitas em tanques de areia têm maior confiabilidade do que num modelo analógico. Os tanques podem ser utilizados para avaliar o efeito de fatores como: diâmetro do tubo drenante, espaçamento, perfurações, comprimento de tubos e uso de materiais para envelopamento, e a distribuição de carga hidráulica sobre os drenos (LUTHIN, 1974).

Segundo WESSELING & VAN SOMEREN (1972), as experiências em laboratório para determinar as propriedades hidrológicas dos materiais drenantes se realizam em breves períodos de observações na obtenção dos dados. Isso pode ser considerado inconveniente na comprovação dos resultados. Contudo, esses autores têm mostrado

que as experiências com material de enchimento dos tanques homogêneos, e testes comparativos com materiais de propriedades hidrológicas já comprovadas, têm incentivado os pesquisadores na utilização de tanques de areia.

KNOPS (1978) considera que na avaliação do desempenho dos materiais drenantes, em tanques de areia, os princípios teóricos são válidos tanto para as experiências práticas de campo como de laboratório.

Dois modelos de tanques de areia têm sido utilizados nos países baixos para determinação das propriedades hidrológicas dos materiais drenantes. Um modelo vertical cilíndrico que consiste de um tanque impermeável de formato cilíndrico, onde é colocada a areia e o tubo drenante envelopado que funciona como um poço vertical. A água é fornecida por meio de uma entrada lateral e mantida em nível constante. São colocados piezômetros junto ao dreno para identificar as cargas hidráulicas. A fórmula de Thiem-Dupuit pode ser usada para determinar a descarga do dreno.

Segundo KNOPS (1978), o modelo cilíndrico vertical oferece as seguintes vantagens: o tanque pode ser fácil e rapidamente preparado; a taxa de descarga pode ser facilmente mudada e o modelo reagirá rapidamente devido a elevada permeabilidade; a entrada de sedimentos no dreno pode ser constatada e medida. Contudo, existem as desvantagens em que solos normais de campo, com permeabilidade na ordem de poucos centímetros a um metro por dia, não podem ser usados como material para enchimento do tanque, devido às dificuldades na obtenção de resultados consistentes e reproduzíveis, bem como à pressão que fibras sintéticas e orgânicas usadas como material envoltório receberiam sob condições normais.

Outro modelo de tanque de areia descrito por KNOPS (1978) é o modelo horizontal que consiste de um tanque impermeável e um recipiente retangular com fundo em forma de "U" e com paredes permeáveis. O tanque de paredes impermeáveis contendo água recebe o recipiente permeável cheio com areia mais o sistema drenante que é colocado na posição horizontal. Um piezômetro é inserido no dreno para determinar a altura da água ( $h_0$ ) dentro deste. Junto ao dreno e a 50 cm deste são

colocados dois piezômetros com a finalidade de identificar as cargas hidráulicas. A resistência de entrada fica definida mediante a utilização da Equação 9.

O modelo horizontal é preferível, segundo KNOPS (1978), pelas seguintes razões: a posição do dreno é equivalente à do campo - portanto a pressão do material de enchimento é constante ao longo do comprimento do dreno e o fluxo radial é induzido pelo formato em "U". Contudo, o tempo necessário nas operações são maiores do que no modelo vertical, podendo aumentar os custos operacionais.

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 1 - CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Com o objetivo de estudar a aplicabilidade e o desempenho de sistemas drenantes, usando tubos de PVC lisos próprios para esgoto e tubos drenos corrugados, ambos envelopados com fibra sintética, comercialmente conhecida como manta BIDIM, implantou-se um protótipo físico (tanques com areia) e a partir dos dados coletados obter-se algumas informações sobre as propriedades hidrológicas inerentes aos respectivos sistemas.

A Figura 1 mostra o layout do protótipo experimental onde foram construídos quatro tanques de alvenaria com as seguintes dimensões:

comprimento	1,00m
largura	2,80m
altura	1,20m

Os tanques foram construídos na área perimetral da Escola Agrotécnica Federal de Satuba-Alagoas às margens da BR-101 sul, distante 21 km da capital (Maceió-Alagoas).

#### 2 - MATERIAL UTILIZADO

Os sistemas drenantes consistiram de tubos de PVC lisos com diâmetros nominais de 50, 75 e 100mm e tubos de PVC corrugados de 65 e 110mm de diâmetros nominais. Todos receberam envólpe de fibra sintética de poliéster fabricada pela Ródia do Brasil, de referência OP-30, ou seja de densidade superficial 300 g/m<sup>2</sup>, com aproximadamente

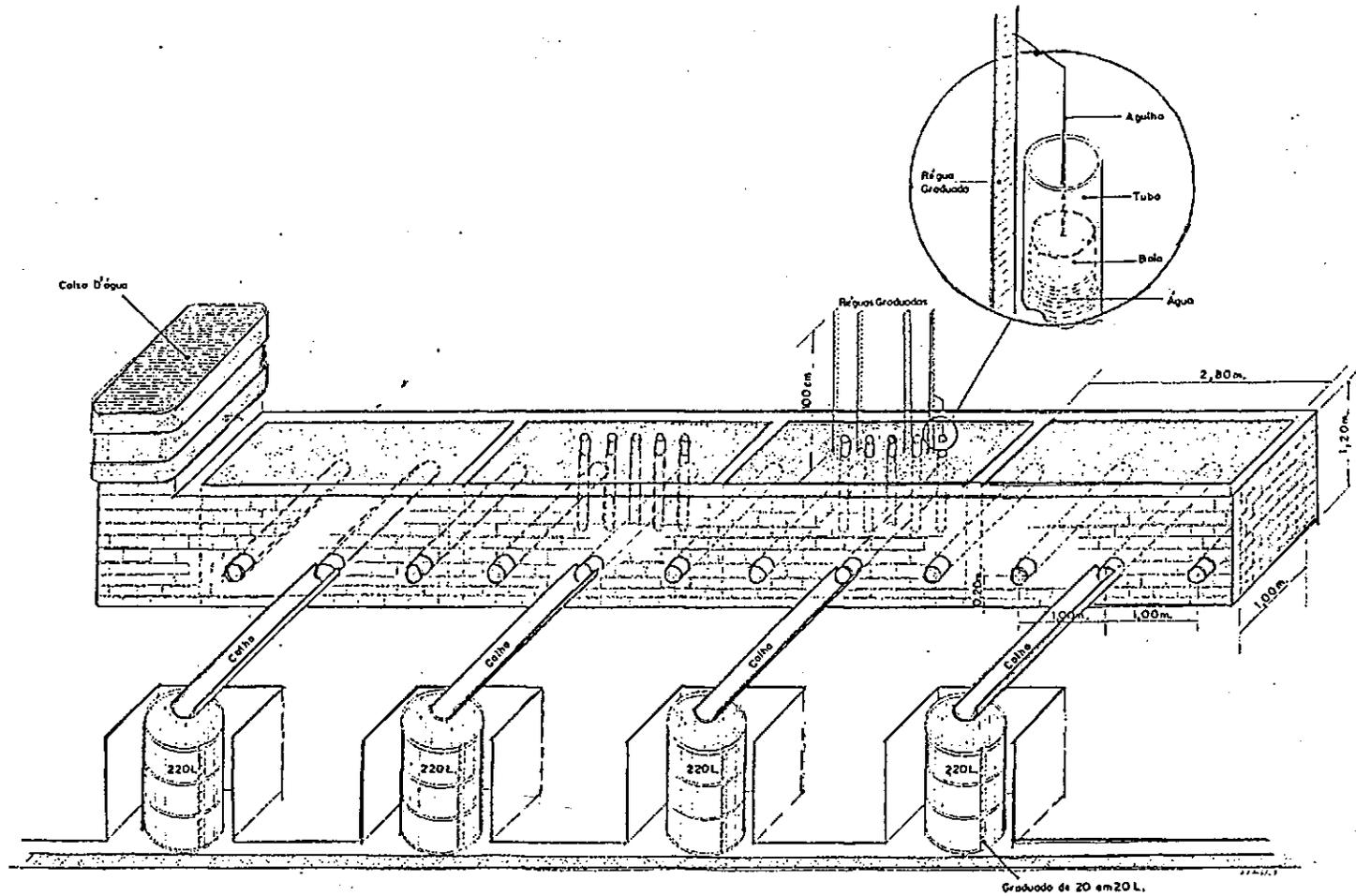


Figura 1 - Layout do protótipo físico (Tanques de areia com sistemas drenantes)

3mm de espessura. Na Tabela 2 são apresentadas as características dos sistemas estudados.

**TABELA 2** Especificações dos tubos empregados em cada sistema drenante

Sistemas drenantes	Diâmetros nominais (mm)	Áreas de entrada (cm <sup>2</sup> /m)
A - Tubo de PVC liso de esgoto	50	16
B - Tubo de PVC liso de esgoto	75	16
C - Tubo de PVC liso de esgoto	100	16
D - Tubo de PVC corrugado para drenagem	110	16
E - Tubo de PVC liso de esgoto	50	23
F - Tubo de PVC liso de esgoto	75	23
G - Tubo de PVC liso de esgoto	100	23
H - Tubo de PVC corrugado para drenagem	65	23

Os tubos que formaram os sistemas drenantes A, B e C receberam 51 perfurações, distribuídas em três fileiras nas suas superfícies, seguindo uma disposição angular de 120°, contados a partir do eixo central do tubo. Assim, cada fileira conteve 17 furos, espaçados de 5,90cm e afastados radialmente de 5,20; 7,80 e 10,50cm, respectivamente, para os tubos lisos de 50, 75 e 100mm. Os furos foram feitos com uma broca de 1/4", o que significa uma área por furo de aproximadamente 0,314cm<sup>2</sup>. Com isso, a área perfurada para entrada d'água nos tubos A, B e C foi aproximadamente 16cm<sup>2</sup>/m. Para o sistema drenante D foi utilizado o tubo DRENOFLEX (DN 110,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ) da Tigre, como testemunha dos sistemas A, B e C, por possuir a mesma área perfurada para entrada d'água, porém com adensamento de perfurações diferentes. As perfurações neste tubo foram distribuídas em seis fileiras afastadas radialmente de 5,30cm e a distância entre furos na fileira foi de 2,00cm. O número de perfurações para o sistema D foi de 288, de acordo com as normas do fabricante.

Com relação aos sistemas drenantes E, F e G, os tubos foram preparados utilizando-se a mesma metodologia empregada nos sistemas A, B e C, isto é, foram perfurados com a mesma broca de 1/4", com três fileiras de perfurações seguindo o ângulo de 120°. Contudo, o adensamento de furos mudou para 72 perfurações. Assim, a área perfurada para entrada d'água para estes sistema foi aproximadamente  $23\text{cm}^2/\text{m}$  de tubo. As distâncias radiais foram 5,20; 7,80 e 10,50cm, igualmente utilizadas nos sistemas A, B e C. No sistema H foi utilizado o tubo dreno da TUPY (DN 65), como testemunha dos sistemas E, F e G, que, de acordo com o catálogo do fabricante, possui nove fileiras de perfurações afastadas radialmente de 2,70cm, com uma distância de 1,60cm entre furos na fileira. Com isso, a área perfurada para entrada d'água foi de  $23\text{ cm}^2/\text{m}$  de tubo.

O meio poroso drenável consistiu-se de uma camada de areia de 1,20m de espessura. Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades físicas da areia. O material utilizado como meio poroso drenável (areia), está de acordo com as recomendações de GUITJENS (1967) e LUTHIN (1967). Esses autores fazem recomendações para que o material utilizado no enchimento de tanques não seja expansivo e não promova diversificação na condutividade hidráulica durante o período de observações.

**TABELA 3 Propriedades físicas da areia utilizada no enchimento dos tanques\***

Areia		Silte (%)	Classificação textural	Porosidade	
Grossa (%)	Fina (%)			Total (%)	Efetiva (%)
89	10	1	Areia	61,19	28

\* Análises realizadas no laboratório de física de solos Campus Delza Gitai - Rio Largo Al, 1993

### 3 - SISTEMAS DRENANTES

Cada sistema drenante foi composto por três tubos, dispostos paralelamente, sendo o central utilizado para coletar os dados de volume e carga hidráulica ( $h_0$ ), enquanto os dois drenos laterais serviram de bordadura para o sistema. Os tubos com 1,00m de

comprimento, envolvidos com manta BIDIM, além de possuírem o mesmo diâmetro e área porosa de entrada, foram instalados a 1,00m da superfície da areia e afastados de 0,20m do fundo do tanque, distanciados entre si de 1,00m com um declive de 1/1000. Foi instalada uma caixa d'água acima do nível dos tanques para o fornecimento da água, conforme Figura 1.

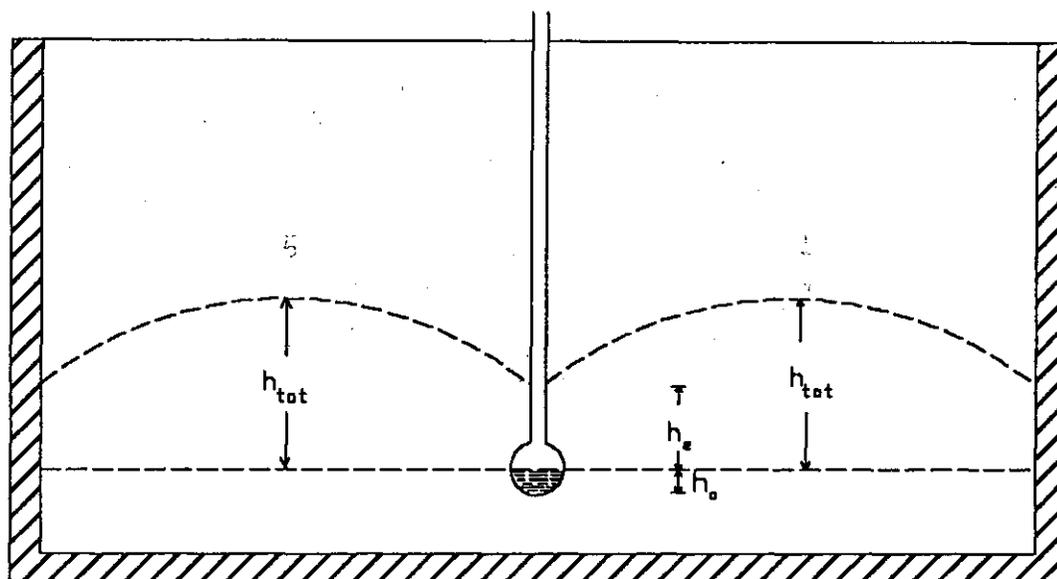
## 4 - LEITURAS DE CARGAS HIDRÁULICAS E VOLUMES

### DRENADOS

Em cada tanque foram instalados cinco poços para obtenção das leituras das cargas hidráulicas. Os poços foram tubos de PVC com 50mm de diâmetro e 1,00m de comprimento, perfurados e revestidos com manta BIDIM. A instalação dos poços seguiu critérios adotados por KNOPS (1978), conforme o modelo de tanque horizontal descrito por esse autor. Esses poços foram enumerados de 1 a 5 para facilitar a identificação no funcionamento do sistema drenante, conforme recomendações de ZUIDEMA & SCHOLTON (1978).

Os poços de números 1 e 5, colocados a uma distância de 50cm do dreno central, tiveram a função de fornecer dados para determinar as cargas hidráulicas ( $h_{tot}$ ) entre os drenos, enquanto os poços de números 3 e 4 forneceram dados para determinar as cargas hidráulicas de entrada junto ao dreno ( $h_e$ ). O poço de número 2 foi constituído de um tubo de 1/2" inserido no dreno central, em posição vertical, com a finalidade de identificar a carga hidráulica dentro do dreno ( $h_o$ ), por ocasião das operações de drenagem. A Figura 2, mostra o posicionamento das cargas hidráulicas  $h_{tot}$ ,  $h_e$  e  $h_o$ , atuantes no sistema drenante

Foi instalado um sistema de boias que atuou flutuando dentro dos poços. Cada boia foi composta de uma parte de isopôr e uma agulha de arame número 14. Junto aos poços, com exceção do número 2, foram instaladas réguas graduadas em centímetros, com o objetivo de registrar o rebaixamento instantâneo da capa d'água no perfil da areia.



**FIGURA 2 - Geometria das cargas hidráulicas total ( $h_{tot}$ ), de entrada ( $h_e$ ) e nível d'água no dreno ( $h_o$ )**

Quatro recipientes, graduados de 20 em 20 litros, foram utilizados para auxiliar o registro do tempo de drenagem a cada 20 litros. Na Figura 1 são mostrados os tanques, sistemas drenantes e poços de observações com boias e réguas graduadas.

## 5 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, com os drenos fechados, os tanques foram cheios até o encharcamento, constatado pelo posicionamento máximo das boias nos poços de observações. Nesta posição, o fornecimento d'água foi interrompido. Em seguida, os drenos foram abertos de modo a permitir que se fizessem as leituras do rebaixamento da água e registro do tempo de drenagem. Procedeu-se assim, até que fosse verificada a descarga mínima em cada sistema drenante, coincidindo com um volume drenado de 260 litros.

A carga hidráulica  $h_{tot}$  foi obtida pela diferença entre as leituras da água nos poços de número 1 e 5 e o nível da água dentro do poço de número 2, enquanto que a carga

hidráulica de entrada  $h_e$  foi obtida pela diferença entre as leituras da água nos poços de número 3 e 4 e o nível da água no poço de número 2.

Os parâmetros de drenagem, relacionados com a porosidade efetiva ( $\mu$ ) e condutividade hidráulica (K) foram calculados pelas Equações 4 e 5 respectivamente, conforme recomendações propostas por Taylor (1959), citado por QUEIROZ (1987), e WESSELING (1977). O cálculo da condutividade hidráulica teve como base a carga hidráulica (h) entre os drenos, a distância (S) e a taxa de descarga (q), enquanto que no cálculo da porosidade efetiva foi considerado o volume drenado (V), a área da seção transversal do perfil drenado ( $A_{de}$ ) e a posição inicial ( $z_{n-1}$ ) e final ( $z_n$ ) da água no tanque.

## 6 - DESEMPENHO DOS SISTEMAS DRENANTES

Na avaliação do desempenho dos sistemas drenantes a partir dos valores das cargas hidráulicas de entrada e total, DIELEMAN & TRAFFORD (1976), têm recomendado tomar a razão  $h_e/h_{tot}$  como critério de classificação do rendimento, conforme valores da Tabela 4.

**TABELA 4** Razão entre cargas hidráulicas  $h_e/h_{tot}$  como critério de rendimento de drenos (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976)

Fração da perda de carga ( $h_e/h_{tot}$ )	Classificação
Menor - 0,2	Bom
0,2 - 0,4	Regular
0,4 - 0,6	Ruim
Maior - 0,6	Muito ruim

Por outro lado, WESSELING & VAN SOMEREN (1972) e DIELEMAN & TRAFFORD (1976), consideram que a carga hidráulica de entrada ( $h_e$ ), isoladamente, constitui um parâmetro importante na avaliação do desempenho dos sistemas drenantes em condições de campo. Esses autores recomendam as faixas de valores apresentadas na Tabela 5.

**TABELA 5** Carga hidráulica de entrada ( $h_e$ ) como critério de rendimento de drenos (DIELEMAN & TRAFFORD, 1976 e WESSELING & VAN SOMEREN, 1972)

Perda de carga ( $h_e$ )	Classificação
Menor - 15 cm	Bom
15 - 30 cm	Regular
30 - 45 cm	Ruim
mais de 45 cm	Muito ruim

Outro critério proposto por WESSELING & VAN SOMEREN (1972) utilizado na classificação do desempenho dos materiais drenantes leva em consideração a resistência de entrada ( $r_e$ ) e o fator de resistência ( $\alpha$ ), tanto para condições de campo como para pesquisas em laboratório. Na Tabela 6 são apresentados os valores da resistência de entrada e fator de resistência para diferentes permeabilidades do solo.

**TABELA 6** Resistência de entrada ( $r_e$ ) e fator de resistência ( $\alpha$ ) como critério de rendimento de drenos (WESSELING & VAN SOMEREN, 1972)

Classificação	$r_e$ (dia/m)	Máximo fatores de resistência ( $\alpha$ ) para diferentes permeabilidades do solo			
		0,25	0,50	1,00	2,00 m/dia
Muito bom	0,475	0,12	0,24	0,48	0,96
Bom	0,475 - 0,95	0,24	0,48	0,95	1,90
Moderado	0,95 - 2,40	0,60	1,20	2,40	4,80
Ruim	2,40 - 4,75	1,20	2,40	4,80	9,60
Intolerável	4,75	-	-	-	-

Neste trabalho foram levados em consideração os critérios apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6. Além disso, foram feitos cálculos de probabilidade, estimando-se como

valor representativo das cargas hidráulicas  $h_e$  e  $h_{tot}$ , da razão  $h_e/h_{tot}$  e da resistência de entrada  $r_e$ , aquele obtido com probabilidade de 50%, conforme recomendações apresentadas por DIELEMAN & TRAFFORD (1976). Os valores dos diâmetros efetivos foram calculados mediante a Equação (8) proposta por DIERICKX (1986,87), assim como os valores das resistências de entrada ( $r_e$ ) e dos fatores de resistências ( $\alpha$ ) obtidos através das Equações (9) e (10) respectivamente propostas por WESSELING & VAN SOMEREN (1972).

## 7 - PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Foram feitas observações em cada sistema drenante, efetuando-se seis ensaios. Considerou-se como ensaio o levantamento dos dados de drenagem relacionados com volumes e cargas hidráulicas medidos da posição de encharcamento a uma situação de descarga mínima dos sistemas. Nestas condições, o regime de fluxo para os drenos foi considerado como variável. A análise das relações entre as cargas hidráulicas de entrada e total ( $h_e$  e  $h_{tot}$ ), bem como, das resistências de entrada ( $r_e$ ) dos sistemas drenantes, baseou-se numa distribuição normal de frequências destas variáveis, tomando-se como base os valores médios a 50% de probabilidade, conforme as recomendações de DIELEMAN & TRAFFORD (1976). A análise de regressão foi aplicada entre as variáveis cargas hidráulicas de entrada e taxas de descargas unitárias ( $q$ ). O teste  $t$  ao nível de 5% de probabilidade, foi aplicado no contrastes de médias das cargas hidráulicas de entrada e das resistências de entrada, conforme as recomendações de FERREIRA (1991).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas A-1 a A-8 (Apêndice A) são apresentados os resultados dos parâmetros hidráulicos obtidos nos ensaios com os sistemas drenantes estudados. Analisando-se as médias aritméticas, (Tabela 7), destes parâmetros verifica-se que o sistema drenante (C), formado a partir do tubo liso (DN-100,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ), não convencional, apresentou valores mais elevados, com excessão do parâmetro taxa de descarga unitária ( $q$ ). Comportamento inverso é observado no sistema drenante (H), formado pelo tubo corrugado padrão (DN-65,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ). Uma justificativa para isto pode ser as diferenças das perfurações e áreas de entrada apresentadas, respectivamente, nos sistemas. Este mesmo comportamento também é observado com relação as médias probabilísticas (Tabela 7).

De acordo com os critérios propostos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972), para classificação do desempenho de drenos entubados em função da carga hidráulica de entrada ( $h_e$ ), o sistema drenante (E), formado pelo tubo liso não convencional (DN-50) com uma carga hidráulica de entrada média de 13,41cm, a uma probabilidade de 50% teve bom rendimento, assim como os sistemas (D) e (H), formados a partir de tubos corrugados padrões, com 12,84cm e 8,41cm respectivamente. Este fato pode estar relacionado com o aumento do adensamento das perfurações apresentado por estes sistemas. O maior adensamento das perfurações e o maior número de filas nos tubos drenantes, proporcionando melhores rendimentos dos sistemas (D) e (H) concordam com resultados obtidos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972). Com relação aos sistemas drenantes (A,B,C,F e G), formados por tubos lisos não convencionais, com cargas hidráulicas de entrada médias 18,31; 18,83; 23,70; 16,61 e 19,13 cm, respectivamente, os rendimentos foram regulares.

**TABELA 7 - Médias aritméticas dos parâmetros hidráulicos: cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ); razão entre cargas hidráulicas de entrada e total ( $h_e/h_{tot}$ ); resistência de entrada ( $r_e$ ); taxa de descarga unitária ( $q$ ) e fator de resistência ( $\alpha$ ). Médias probabilísticas a 50% dos mesmos parâmetros com exceção da taxa de descarga e fator de resistência.**

Parâmetros	Sistemas Drenantes							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Hidráulicos	Médias Aritméticas							
$h_e$ (cm)	20,88	21,78	26,12	28,50	14,44	17,19	20,91	9,26
$h_e/h_{tot}$	0,78	0,79	0,90	0,71	0,73	0,81	0,85	0,48
$r_e$ (dia/m) $\times 10^{-3}$	7,60	8,70	10,70	4,70	5,70	7,20	8,90	2,40
$q$ (m <sup>3</sup> /dia/m)	26,20	25,34	24,94	33,17	26,50	25,67	27,11	36,08
$\alpha$	0,23	0,26	0,32	0,14	0,18	0,22	0,27	0,07
	Médias Probabilísticas a 50%							
$h_e$ (cm)	18,31	18,83	26,27	12,84	13,41	16,21	19,13	8,41
$h_e/h_{tot}$	0,77	0,77	0,89	0,70	0,71	0,79	0,84	0,49
$r_e$ (dia/m) $\times 10^{-3}$	7,00	8,30	10,00	4,10	5,30	6,80	8,10	2,40

As cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ) médias dos sistemas formados por tubos lisos, não convencionais, tomadas a partir de uma distribuição de frequência a 50% de probabilidade nas Tabelas A-9 e A-10 (Apêndice A), foram crescentes com os diâmetros dos tubos, tanto nos sistemas com 16 cm<sup>2</sup>/m como nos de 23 cm<sup>2</sup>/m de áreas de entrada, conforme pode-se observar na Figura 3. Estão claras, as diferenças entre as cargas hidráulicas médias para diâmetros similares.

Analisando-se estatisticamente estes resultados através do teste  $t$ , ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 8), observa-se que nos contrastes de médias das cargas hidráulicas, o sistema drenante (A) não diferiu dos sistemas (B, F e G) apresentando, portanto, rendimentos semelhantes. Nota-se ainda rendimentos similares entre os

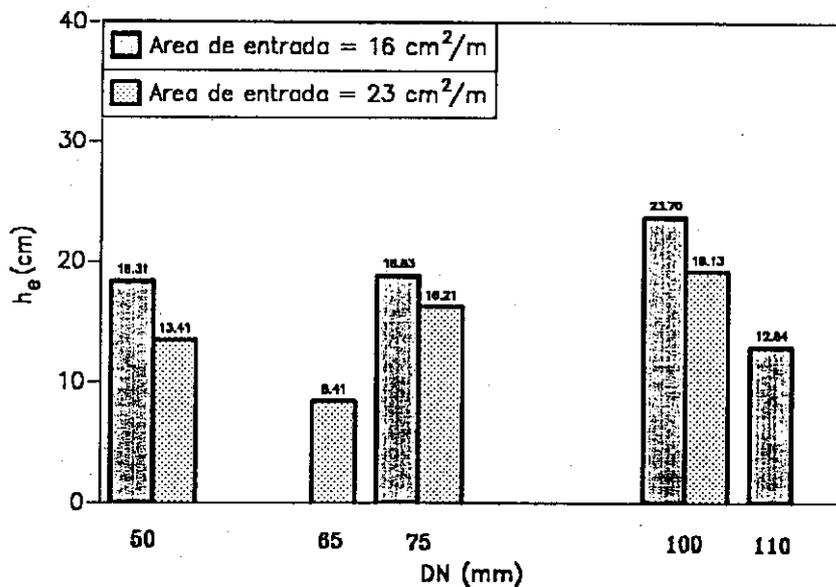


Figura 3 - Relação entre cargas hidráulicas de entrada médias a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A, B, C, D, E, F, G e H)

sistemas (B) e (G) bem como entre os sistemas (D) e (E). Os demais sistemas apresentaram diferenças significativas pelos contrastes de médias.

Nas Tabelas A-11 e A-12 (Apêndice A) estão presentes os resultados das razões entre as cargas hidráulicas de entrada e total ( $h_e/h_{tot}$ ) dos sistemas estudados. Analisando-se as médias a 50% de probabilidade destas razões (0,77; 0,77; 0,89; 0,70; 0,71; 0,79; 0,84 e 0,49), observam-se valores mais elevados nos sistemas drenantes formados a partir dos tubos não convencionais de maiores diâmetros, conforme pode ser visto na Figura 4.

O critério ( $h_e/h_{tot}$ ) proposto por DIELEMAN & TRAFFORD (1976) para avaliar o desempenho de drenos entubados indica que os rendimentos foram não satisfatórios, inclusive, o dos tubos corrugados padrões. Este critério, no entanto, tem como base uma taxa de descarga de 7 mm /dia com drenos espaçados de 15 m, que é uma situação não similar as que foram submetidos os sistemas drenantes de que trata este estudo, onde os drenos foram testados num meio poroso com elevada condutividade hidráulica ( $K = 30,81\text{m}/\text{dia}$ ) e espaçados de 1 m. Supõe-se, assim, que a elevada condutividade

TABELA 8 - Contrastes entre as médias das cargas hidráulicas de entrada dos sistemas drenantes

Médias das Cargas Hidráulicas $h_e$	$\hat{M}(A)$	$\hat{M}(B)$	$\hat{M}(C)$	$\hat{M}(D)$	$\hat{M}(E)$	$\hat{M}(F)$	$\hat{M}(G)$	$\hat{M}(H)$
	18,31	18,83	23,70	12,84	13,41	16,61	19,13	8,41
$\hat{M}(A)$ 18,31	-	0,52 <sup>ns</sup>	5,39*	5,47*	4,90*	1,70 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>	9,90*
$\hat{M}(B)$ 18,83		-	4,87*	5,99*	5,42*	2,22*	0,30 <sup>ns</sup>	10,42*
$\hat{M}(C)$ 23,70			-	10,86*	10,29*	7,09*	4,57*	15,29*
$\hat{M}(D)$ 12,84				-	0,57 <sup>ns</sup>	3,77*	6,29*	4,43*
$\hat{M}(E)$ 13,41					-	3,20*	5,72*	5,00*
$\hat{M}(F)$ 16,61						-	2,52*	8,20*
$\hat{M}(G)$ 19,13							-	10,72*
$\hat{M}(H)$ 8,41								-

$t(5\%) = 2,10$

ns = não significativo ao nível de 5% pelo teste ( $t$ )

\* = significativo ao nível de 5% pelo teste ( $t$ )

$\hat{M}$  = médias tomadas a partir de uma distribuição de frequência a 50% de probabilidade.

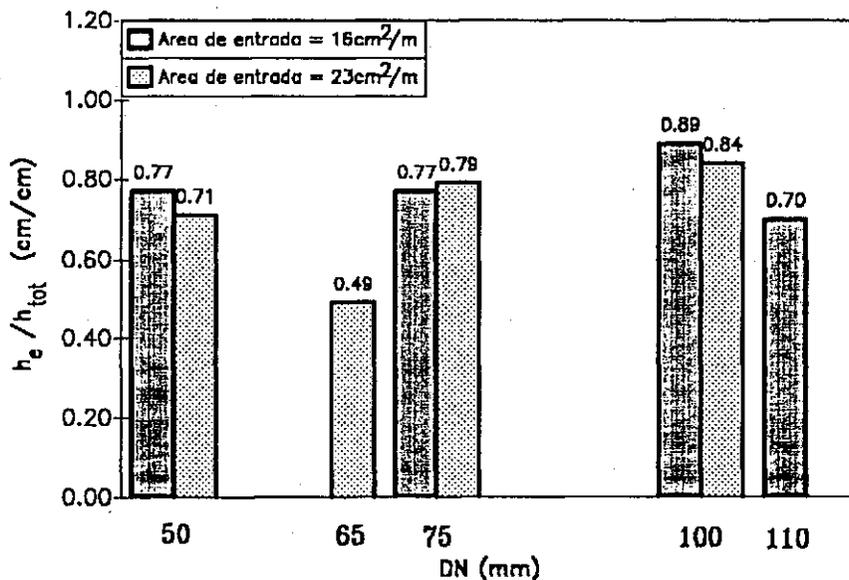


Figura 4 - Relação entre as médias das razões de cargas hidráulicas a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A, B, C, D, E, F, G e H).

hidráulica aliada ao pequeno domínio dos drenos nos tanques pode ter influenciado o rebaixamento da água, de forma a manter elevadas as razões entre as cargas hidráulicas

de entrada ( $h_e$ ) e total ( $h_{tot}$ ). Constata-se, então, a inadequabilidade desse critério na avaliação dos sistemas sob as condições em estudo. É importante, então, que outros critérios de avaliação sejam utilizados.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas as relações entre as cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ) e as taxas de descargas unitárias ( $q$ ). Verifica-se pelos altos coeficientes de correlação a existência de uma relação linear entre as duas variáveis. Nota-se ainda que nos sistemas drenantes formados a partir de tubos não convencionais os coeficientes angulares das retas, que também representam as resistências de entrada ( $r_e$ ), aumentaram com os diâmetros dos tubos, tanto nos sistemas com  $16\text{cm}^2/\text{m}$  como nos de  $23\text{cm}^2/\text{m}$  de área de entrada. Para uma mesma taxa de descarga unitária ( $q$ ), as cargas hidráulicas foram crescentes com o aumento dos diâmetros dos tubos lisos, indicando que as resistências de entrada foram maiores nestes tubos. Por outro lado, nos sistemas formados por tubos corrugados padrões, as inclinações das retas foram menores, mesmo no tubo (DN-110) de maior diâmetro, evidenciando melhores rendimentos destes sistemas.

Uma avaliação que poderia ser feita seria em função da descarga ou do rebaixamento do lençol freático. Obviamente, como trabalhamos com um solo de elevada condutividade hidráulica não houve necessidade desta consideração.

Comparando-se estes valores com os da Equação (9) observa-se pequenas diferenças decorrentes da linearização dos pontos, o que seria óbvio.

Os resultados das resistências de entrada ( $r_e$ ), por ordem de magnitude, estão presentes nas Tabelas A-13 e A-14 (Apêndice A). Observa-se pela Figura 7 que nos sistemas formados por tubos lisos não convencionais de mesmo diâmetro, as resistências de entrada ( $r_e$ ) médias foram maiores nos tubos com menor área de entrada. O aumento das resistências de entrada também está constatado nos tubos lisos não convencionais de maiores diâmetros. Por outro lado, os tubos corrugados padrões com maior número de filas de perfurações apresentaram os menores valores das resistências (ver Tabela 9). Desta forma, tanto o aumento da área de entrada como o número de filas perfuradas denotam influências na resistência hidráulica de entrada dos sistemas drenantes. Isto

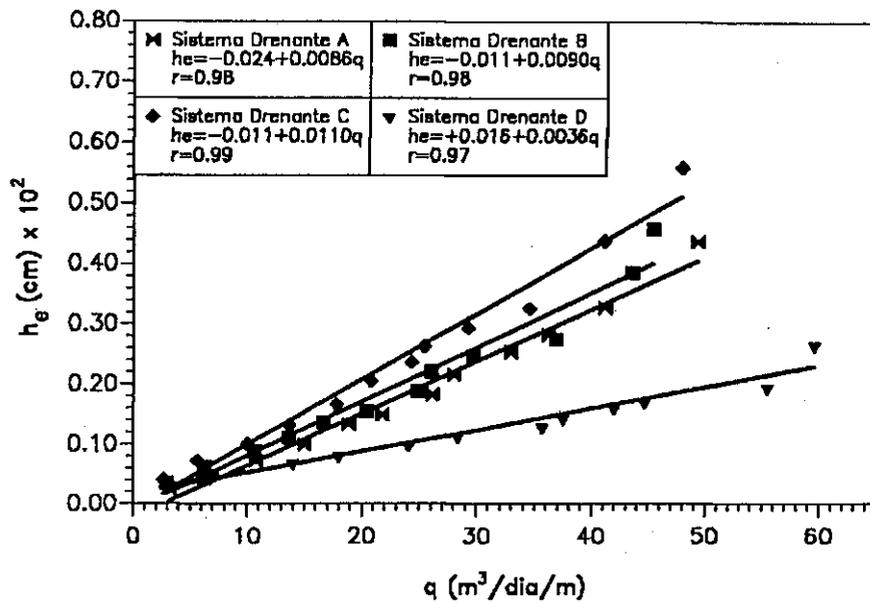


Figura 5- Relacao entre cargas hidraulicas de entrada e taxas de descargas unitarias dos sistemas drenantes (A, B, C e D).

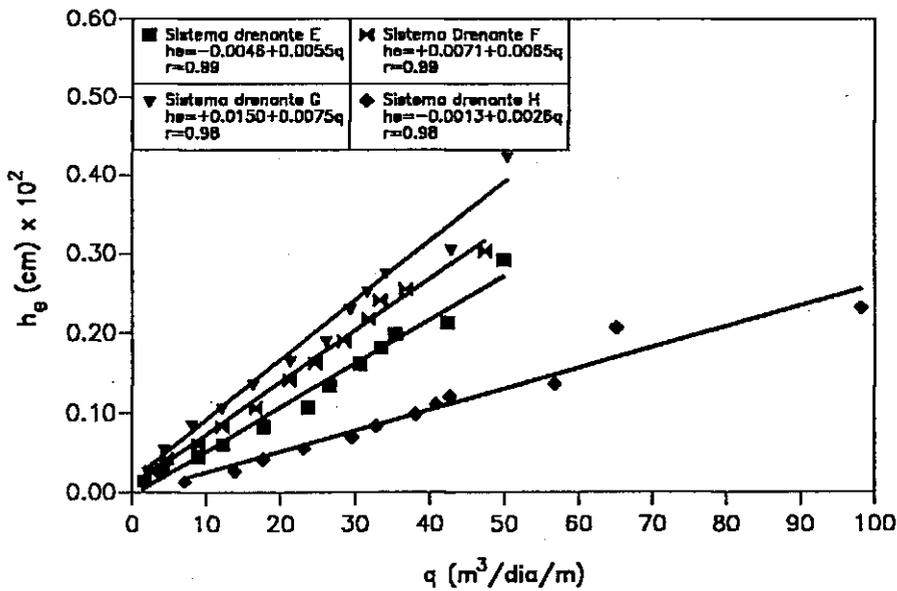


Figura 6- Relacao entre cargas hidraulicas de entradas e taxas de descargas unitarias dos sistemas drenantes (E, F, G e H).

concorda com os resultados de experimentos similares desenvolvidos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972), DIELEMAN & TRAFFORD (1976), KNOPS &

DIERICKX (1978), NIEUWENHUIS & WESSELING (1979), DIERICKX & VAN DER MOLEN (1981) e TILIGADAS (1988).

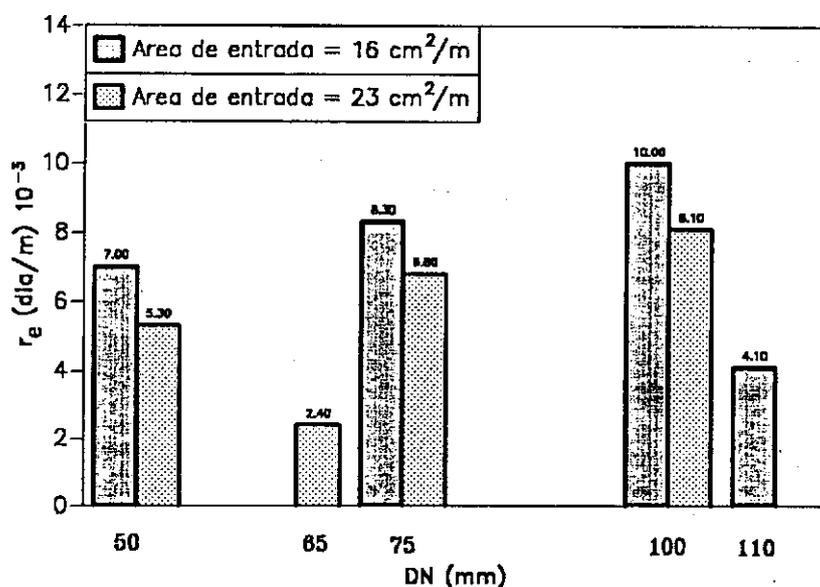


Figura 7 - Relação entre resistências de entrada médias a 50% de probabilidade e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A, B, C, D, E, F, G e H)

O aumento das resistências de entrada ( $r_e$ ) constatado nos sistemas drenantes formados por tubos não convencionais de maiores diâmetros, parece, estar relacionado com as áreas impermeáveis ( $A_i$ ) circundantes, e de influência nas fronteiras de domínio das perfurações dos tubos, as quais podem ser definidas como superfícies de impedimento do fluxo para o interior do dreno. Pela Tabela 9, pode-se observar que as maiores resistências de entrada foram reveladas pelos sistemas drenantes C, B e G, que possuem maiores áreas de impedimento.

Segundo os critérios propostos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972) e DIELEMAN & TRAFFORD (1976), para avaliar o rendimento de linhas de drens entubados em função da resistência de entrada ( $r_e$ ), todos os sistemas drenantes apresentaram bons rendimentos, conforme pode-se observar pelos valores médios obtidos (Tabela 9). O teste  $t$  aplicado aos contrastes de médias das resistências (Tabela 10) revelou que o sistema drenante A não diferiu estatisticamente ao nível de 5% de

TABELA 9 - Áreas impermeáveis ( $A_i$ ), diâmetro nominais (DN), áreas de entrada ( $A_e$ ), e resistências de entrada ( $r_e$ ).

Sistemas drenantes								
	A	B	C	D	E	F	G	H
$A_i(\text{cm}^2)$	31	46	61	12	22	32	43	4
DN (mm)	50	75	100	110	50	75	100	65
$A_e(\text{cm}^2)$	16	16	16	16	23	23	23	23
$r_e(\text{dia/m}) \times 10^{-3}$	7,00	8,30	10,00	4,10	5,30	6,80	8,10	2,40

probabilidade do sistema F. Não diferiu, também, o sistema B do sistema G. O fato destes sistemas não diferirem estatisticamente, do ponto de vista da resistência de entrada, pode estar relacionado com as pequenas diferenças das áreas impermeáveis ( $A_i$ ) apresentadas por estes sistemas drenantes, conforme Tabela 9. Estas áreas impermeáveis têm influencia direta nas resistências, contribuindo de forma efetiva na diferença entre dreno ideal e real, como têm observado também DIELEMAN & TRAFFORD (1976), KNOPS & DIERICKX (1978), NIEUWENHUIS & WESSELING (1979), PARFFIT & CRUCIANI (1988) e DIERICKX (1986, 87). Com relação aos demais sistemas, todos diferiram estatisticamente, talvez por razões inversas às discutidas com relação aos sistemas (A,B,F e G), destacando-se o sistema drenante (H) com o melhor desempenho, dada a sua menor resistência de entrada, bem como o sistema (D)- ambos formados por tubos corrugados padrões.

Entre os sistemas drenantes formados por tubos não convencionais destacou-se o sistema E (DN-50,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ) com o melhor rendimento, enquanto os sistemas A (DN-50,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ) e F (DN-75,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ) apresentaram rendimentos semelhantes entre si. O pior rendimento resultou do sistema C (DN-100,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ), indicando que, de fato, a área de influência da superfície de impedimento concorreu para isto.

TABELA 10 - Contrastes entre as médias das resistências de entrada em (dia/m)  $\times 10^{-3}$  dos sistemas drenantes

Médias das Resistências de Entrada $r_e$	$\hat{M}(A)$ 7,00	$\hat{M}(B)$ 8,30	$\hat{M}(C)$ 10,00	$\hat{M}(D)$ 4,10	$\hat{M}(E)$ 5,30	$\hat{M}(F)$ 6,80	$\hat{M}(G)$ 8,10	$\hat{M}(H)$ 2,40
$\hat{M}(A)$ 7,0	-	1,30*	3,00*	2,90*	1,70*	0,20 <sup>ns</sup>	1,10*	4,60*
$\hat{M}(B)$ 8,30		-	1,70*	4,20*	3,00*	1,50*	0,20 <sup>ns</sup>	5,90*
$\hat{M}(C)$ 10,00			-	5,90*	4,70*	3,70*	1,90*	7,60*
$\hat{M}(D)$ 4,10				-	1,20*	2,70*	4,00*	1,70*
$\hat{M}(E)$ 5,30					-	1,50*	2,80*	2,90*
$\hat{M}(F)$ 6,80						-	1,30*	4,40*
$\hat{M}(G)$ 8,10							-	5,70*
$\hat{M}(H)$ 2,40								-

$t(5\%) = 2,10$

ns = não significativo ao nível de 5% pelo teste (t)

\* = significativo ao nível de 5% pelo teste (t)

$\hat{M}$  = médias tomadas a partir de uma distribuição de frequência a 50% de probabilidade.

Nas Tabelas A-1 a A-8 (Apêndice A) estão presentes os fatores de resistência ( $\alpha$ ) encontrados a partir de cálculos pela Equação 10. Na Tabela 11, encontram-se resumidos os valores médios das resistências de entrada, dos fatores de resistências e dos diâmetros efetivos dos diversos sistemas estudados. Observa-se pelos valores médios que houve pouca variação destes sistemas drenantes formados a partir de tubos não convencionais e de mesma área de entrada. Nota-se também que os maiores valores foram revelados nos sistemas drenantes formados pelos tubos não convencionais de maiores diâmetros. O fato das pequenas variações de  $\alpha$  apresentados por estes sistemas, pode ser explicado pela pouca diferença entre as resistências de entrada que os mesmos apresentaram, uma vez que a condutividade hidráulica do meio poroso drenável ( $K = 30,81$  m/dia) foi considerada constante. Além disso, o material envoltório (BIDIM OP-30) foi o mesmo para todos os sistemas testados. Estudos conduzidos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972) e DIERICKX (1978) produziram resultados concordantes com os da presente investigação. Por outro lado, os menores valores do

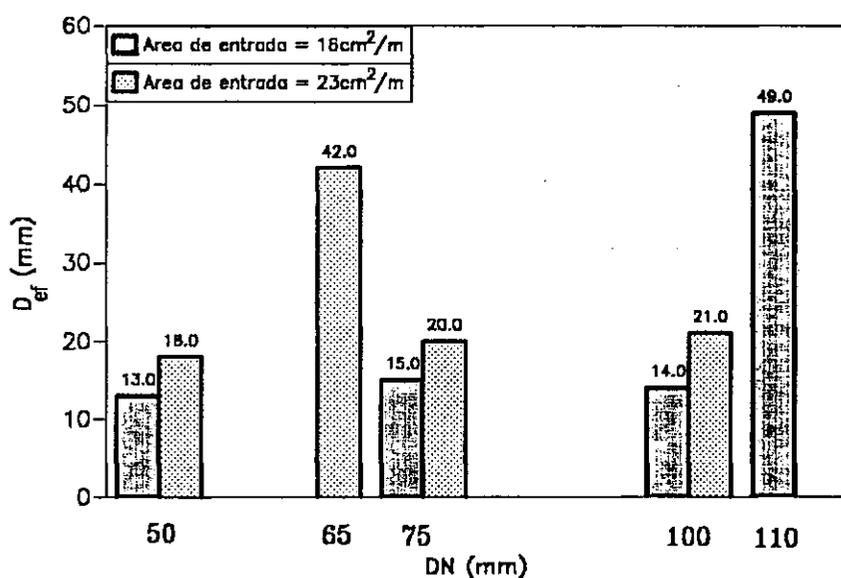
fator  $\alpha$  dos sistemas drenantes formados pelos tubos corrugados padrões podem ser decorrentes do maior número de filas perfuradas contidas nestes tubos, ou mesmo das diferentes geometrias das aberturas, também concordando com resultados apresentados por WESSELING & VAN SOMEREN (1972).

TABELA 11 - Diâmetros Nominiais (DN), resistência de entrada ( $r_e$ ), fatores de resistência ( $\alpha$ ) e diâmetros efetivos ( $D_{ef}$ ) dos sistemas drenantes.

Sistemas drenantes	A	B	C	D	E/	F	G	H
DN (mm)	50	75	100	110	50	75	100	65
$r_e(\text{dia}/\text{m}) \times 10^{-3}$	7,0	8,3	10,0	4,1	5,3	6,8	8,1	2,4
$\alpha$	0,22	0,26	0,31	0,13	0,16	0,21	0,25	0,07
$D_{ef}$ (mm)	13	15	14	49	18	20	21	42
$D_{ef}/DN$ (mm)	0,26	0,20	0,14	0,44	0,36	0,27	0,21	0,64

Os diâmetros efetivos, obtidos através da Equação 8, variaram de 13 a 21 mm nos sistemas não convencionais, enquanto nos sistemas padrões a variação foi de 42 a 49 mm. Em princípio, observa-se melhores rendimentos dos tubos padrões sobre os não convencionais. Em termos quantitativos há, na prática, um desempenho quase 3 vezes melhor do ponto de vista dos diâmetros efetivos, conforme pode ser observado na Figura 8, indicando que a geometria das aberturas e o maior adensamento dos furos, realmente pode ter influenciado sobre o rendimento dos sistemas drenantes. Das razões entre os diâmetros efetivos e os diâmetros nominiais (Tabela 11) e Figura 8, observa-se que o sistema H (DN-65,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ) apresentou o melhor desempenho de todos, seguido do sistema D (DN-110,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ). O sistema E (DN-50,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ) também apresentou um excelente rendimento, com um "fator efetivo"  $D_{ef}/DN = 0,36$ . Um estudo conduzido por WESSELING & VAN SOMEREN (1972), usando tanques de areia sob variadas condutividades hidráulicas, mostrou que para um meio poroso com  $K = 2$  m/dia, um valor satisfatório para o fator de resistência de entrada deveria se limitar a um  $\alpha_{\max} = 0,96$ . Considerando que o meio poroso do presente estudo foi bastante superior ( $K = 30,81$  m/dia) admite-se que mesmo o sistema de pior desempenho estaria

funcionando dentro desse limite (ver Tabela 11, onde  $\alpha_c = 0,31$ ). Nota-se ainda pela Figura 8 que o aumento dos diâmetros nominais nos sistemas não convencionais tiveram pouca influência nos diâmetros efetivos, o que está de acordo com os resultados apresentados por DIERICKX (1987), onde se constata que o aumento dos diâmetros nominais dos tubos influenciam os diâmetros efetivos apenas em condições de reduzidos fatores de resistência. Por outro lado, observa-se que o aumento da área de entrada nestes sistemas tem contribuído para aumentar os diâmetros efetivos.



**Figura 8- Relacao entre diâmetros efetivos e diâmetros nominais dos sistemas drenantes (A, B, C, D, E, F, G e H)**

Há evidências, portanto, de que os sistemas não convencionais testados têm apresentado resultados satisfatórios, não obstante seus desempenhos tenham sido inferiores aos dos padrões.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, permite-se concluir:

- 1 - As cargas hidráulicas de entrada dos sistemas formados por tubos não convencionais variaram de 8,41 a 23,70 cm, indicando rendimentos regulares a bons, segundo critérios propostos por DIELEMAN & TRAFFORD (1976). Em termos de cargas hidráulicas de entrada o sistema drenante A (DN-50,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ) apresentou rendimento semelhante aos sistemas B (DN-75,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ), F (DN-75,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ) e G (DN-100,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ). Similar conclusão se observou entre (B) e (G) e entre D (DN-110,  $A_e = 16\text{cm}^2/\text{m}$ ) e E (DN-50,  $A_e = 23\text{cm}^2/\text{m}$ ). As Resistências médias de entrada obtidas indicaram bons rendimentos para todos sistemas drenantes testados, segundo os critérios propostos por WESSELING & VAN SOMEREN (1972) e DIELEMAN & TRAFFORD (1976). Em termos de resistência de entrada o desempenho do sistema drenante (A) apresentou rendimento similar ao sistema (F) enquanto que o do sistema (B) foi semelhante ao do sistema (G).
- 2 - Os diâmetros efetivos resultantes dos tubos padrões foram praticamente o triplo dos obtidos pelos tubos não convencionais, demonstrando melhores rendimentos destes sistemas possivelmente devido ao maior número de filas perfuradas e maior adensamento dos furos, ou melhor geometria das aberturas.
- 3 - O uso efetivo dos tubos de PVC lisos, próprios para esgoto, como materiais drenantes não convencionais, tem-se mostrado viável. Sugere-se, no entanto, que outros testes sejam realizados, considerando maior número de filas de

perfurações (ou maior adensamento dos furos) e diferentes geometrias das aberturas de entrada, tanto em condições de laboratório como em condições de campo. Assim, seria interessante realizar outras experiências, tanto a nível de laboratório como também de campo, visando melhorar o desempenho, em especial estudos sobre o rendimento destes materiais drenantes, considerando diferentes envoltórios (cascalho, fibras sintéticas e orgânicas) e diferentes geometrias e adensamento das aberturas para entrada d'água.

## LITERATURA CITADA

BATISTA, M. J. Condutividade hidráulica In: 4º Curso internacional de drenagem de terras agrícolas. C. Grande: SAIA-PB/UFPA/ILRI, 1992. (Datilografado). 16 p.

\_\_\_\_\_ Gradiente hidráulico de falha em relação a outros parâmetros do solo e sua influência na determinação do diâmetro efetivo dos drênos. In: 4º CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO e DRENAGEM, 1980, S. Paulo. Anais. Brasília, ABID, 1980. v. 2, p. 16-47.

\_\_\_\_\_ Envelopes para drenos subterrâneos. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, nº 12, p. 26-29, 1983.

BATISTA, M. J.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, J. D. Análise técnica econômica do comportamento de drenos entubados empregando envelope somente de cascalho e de cascalho com monta sintética. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, nº 19, p. 14-22, 1984.

BAVER, L. D; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Física de suelos. Mexico: Editorial hispano-americana, 1973. 530 p.

BELTRAME, L. F. S.; FIETZ, C. R. Análise de modelos empregados para estimativa da porosidade drenável. In: 8º CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO e DRENAGEM, 1988, Florianópolis. Anais. Brasília: ABID, 1988. v. 2, p. 815-829.

BENATTI, Jr. R.; CRUCIANI, E.D.; ABRAÃO, J. T. M. Durabilidade de fibras vegetais usadas como envoltório de drenos subterrâneos. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, nº 39, p. 35-37, 1983.

✓ BELTRAN, J. M. Drenaje agrícola In: *Series de ingeniería rural y desarrollo agrário*. Madrid: Ministério de Agricultura, Pesca y Alimentacione/IRYDA, 1986. 239 p. (Manual Técnico, 5).

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N.C. Natureza e propriedades dos solos. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1986. 594 p.

✓ CAVELAARS, J. C. Sistemas subsuperficiales de drenaje agrícola. In: *Principios y aplicaciones del drenaje*. Wageningen: ILRI, 1977. v. 4, p. 1-7. (Publication, 16).

✓ CRUCIANI, D. E. A drenagem na agricultura. São Paulo: Nobel, 1980. 333 p.

✓ DIELEMAN, P. J.; RIDDER, N. A. Hidráulica elemental del agua en la zona saturada, In: *Principios y aplicaciones del drenaje*. Wageningen: ILRI, 1977. v. 1, p. 168-216. (Publicacion, 16).

✓ DIELEMAN, P. J.; TRAFFORD, B. D. *Ensayos de drenaje*. Rome: FAO, 1976. 140 p. (Estudios FAO: Riego y Drenaje, 28).

DIERICKX, W. Choice of subsurface drainage material. **Journal of American Society of Agriculture Engineers.**, St. Joseph, v. 87, n° 2580, p. 2-9, 1987.

\_\_\_\_\_ Field experience and laboratory research on drainage envelopes In: **Proceedings of International Seminar on Land Drainage.** Otonicmi: University of Technology, Department of Civil Engineering Water, 1986. 10 p.

\_\_\_\_\_ Soil invasion into drain pipes In: VAN WILJK, A. L. M; WESSELING, J. (ed). **Proceedings of the Symposium on Agricultural Water Management.** Wageningen: Institute for Land and Water Management Research, 1986. p. 151-161.

DIERICKX, W.; VAN DER MOLEN, W. H: Effect of perforation shape and pattern on the performance of drain pipes. **Agricultural Water Management.** Amsterdam: n° 4, p. 429-443, 1981.

DIERICKX, W.; YÜNCUOGLU, H. Factors affecting the performance of drainage envelope material in structurally unstable soils. **Agricultural Water Management.** Amsterdam, n° 13, p. 225-233, 1988.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia.** MACEIÓ: EDUFAL, 1991. 440 p.

FOUSS, J. L. Drain tube materials and installation In: VAN SCHILFGAARDE, J. (ed). **Drainage for agricultural.** Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 147-177. (Agronomy, 17).

GROENEVELT, P. H.; KUNE, J. W. Física de la humedad del suelo In: **Principios y aplicacione del drenajes.** Wageningen: ILRI, 1977. v. 1, p. 136-165. (Publication, 16).

GUITJENS, J. C. Hydraulic models In: VAN SCHILFGAARDE, J. (ed). **Drenaje for agricultural.** Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 537-555. (Agronomy, 17).

IRWIN, R. W.; HORE, F. R. Drain envelope materials in Canada, In: WESSELING, J. (ed). **Proceedings of the international drainage workshop.** Wageningen: ILRI, 1978. p. 283-295. (Publication, 25).

c IRWIN, R. W.; MOTYCKA, J. Friction factors for corrugats plastic drainage pipe, **Journal of the irrigation and drainage division.** American Society of Civil Engineers, p. 29-35, 1979.

JOHNSTON, W. R. Drainage installation problems in the San Joaquiom Valley California, US. In: WESSELING, J. (ed). **Proceedings of the international drainage workshop.** Wageningen: ILRI, 1978. p. 603-619. (Publication, 25).

KIRKHAM, D. Steady-state theories for drainage **Journal of the irrigation and drainage division,** American Society of Civil Engineers, n° 1, p. 19-39, 1966.

- KNOPS, J. A. C. Research on envelope materials for subsurface drains. In: WESSELING, J. (ed). *Proceedings of the international drainage workshop*. Wageningen: ILRI, 1978. p. 368-392. (Publication, 25).
- KNOPS, J. A. C; DIERICKX, W. Drainage materials. In: WESSELING, J. (ed). *Proceedings of the international drainage workshop*. Wageningen: ILRI, 1978. p. 14-36. (Publication, 25).
- KNOPS, J. A. C; ZUIDEMA, F. C.; SOMEREN, C. L. VAN; SCHOLTON, J. Guideline for the selection of envelope material for subsurface drains In: WESSELING, J. (ed). *Proceedings of the international drainage workshop*. Wageningen: ILRI, 1978. p. 439-451. (Publication, 25).
- LAMSTER, E. C. Programa nacional de aproveitamento de várzeas. **MINISTERIO DA AGRICULTURA**, Brasília, 1983. p. 7-11. (Informação Técnica, 1)
- LUTHIN, J. N. *Drenaje de tierras agrícolas*. Mexico: Editorial Limosa, 1974. 684 p.
- LUTHIN, J. N. Drainage analogues. In: VAN SCHILFGAARDE, J. (ed). *Drainage for Agricultural*, Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 517-536. (Agronomy, 17).
- MILLAR, A. A. *Drenagem na Agricultura*. S. Paulo: Nobel, 1987. 306 p.
- NIEUWENHUIS, G. J. A.; WESSELING, J. Effecto of perfuration and filter material on entrance resistance and effective diameter of plastic drain pipes. *Agricultural Water management*. nº 13, p. 225-233, 1978.
- OOSTERBAAN, R. J. Teoria de fluxo subterrâneo. In: 4º Curso internacional de drenagem de terras agrícolas. C. Grande: SAIA-PB/UFPB/ILRI, 1992, p. 225-233. (Apostila, 8)
- PARFITT, E. B.; CRUCIANI, D. E. Geometria de perfurações em drenos tubulares e sua descarga subterrânea. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1988, Florianópolis. *Anais*. Brasília: ABID, 1988. v. 2, p. 677-770.
- PIRES, E. T.; FERREIRA, P. A.; BERNARDO, S.; CHAVES, R. N. M. Redes de fluxo de água em condições de laboratório, meio saturado e regime de escoamento permanente. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, nº 13, p. 12-15, 1983.
- PIZARRO, F. *Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos*. Madrid: Agricola Espanhola, 1978. 521 p.
- QUEIROZ, J. E. Avaliação do desempenho hidráulico de dois sistemas pilotos de drenagem subterrânea usando manilhas de barro, no perímetro irrigado de Sumé-PB. C. Grande: UFPB, 1987. 98 p. (Dissertação de Mestrado).

- QUEIROZ, J. E.; OLIVEIRA, G. R. Espaçamento entre linhas de drenos para diferentes critérios de drenagem no perímetro irrigado de Sumé-Pb. In: **8º CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, Florianópolis. Anais. Brasília: ABID, 1988. v. 2, p. 737-790.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. Piracicaba: McGraw-Hill, 1978. 111 p.
- REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-água-planta-atmosfera**. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP, 1975. 286 p.
- STUIJT, L. C. P. M. Drainage material. In: **Twenty-eighth international course on land drainage**. Wageningen: ILRI, 1989. 47 p. (Syllabus, 22).
- TILIGADAS, E. Effecto of differents parameters on entrance resistence of corrugated plastic drains. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, nº 13, p. 225-233, 1988.
- VAN BEERS, W. F. J. Suelos y propiedades del suelos. In: **Principios y aplicaciones del drenaje**, Wageningen: ILRI, 1977. v. 1, p. 39-79. (Publication, 16).
- VAN DER MOLEN, W. H. Balance de sales y necesidades de lavado. In: **Principios y aplicaciones del drenaje**. Wageningen: ILRI, 1977. v. 2, p. 65-103. (Publication, 16).
- VAN SCHILFGAARDE, J. **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. 700 p. (Agronomy, 17).
- VAN ZEIJTS, T. E. J. General information on subsurface drainage in the Netherlands. In: WESSELING, J. (ed). **Proceedings of the international drainage workshop**. Wageningen: ILRI, 1978. p. 481-507. (Publication, 25).
- WESSELING, J. Fluxe subsuperficial del água a los drenos. In: **Principios y aplicaciones del drenaje**. Wageningen: ILRI, 1977. v. 2, p. 3-62. (Publication, 16).
- \_\_\_\_\_ The entrance resistenc drains as a factor in design. In: WESSELING, J. (ed). **Proceedings of the international drainage workshop**. Wageningen: ILRI, 1978. p. 354-365. (Publication, 25).
- WESSELING, J.; HOMMA, F. Hidraulic resistence of drain pipes. **Institute for Land and Waterl Magenement Research**, Wageningen, nº 50, p. 183-197, 1967.
- WESSELING, J.; VAN SOMEREN, C. L. Materiales para aveniamientos. Informe provisional sobre la experiencia obtnida en los paises bajos. In: **Material del drenaje**. Rome: FAO/ONU, 1972. p. 59-88.
- WILLARDSON, L. S. Envelope Materials. In: VAN SCHILFGAARDE, J. **Drainage for agricultural**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 178-196. (Agronomy, 17).

WILLARDSON, L. S.; WALKER, R. F. Synthetic drain envelope – soil interactions.  
*Journal of the Irrigation and Drainage Division*, n° 15028, p. 367-373, 1979.

ZUIDEMA; F. C.; SCHOLTEN, J. Model tests on drainage material. In: WESSELING,  
J. (ed). *Proceedings of the international drainage workshop*. Wageningen: ILRI,  
1978. p. 393-401. (Publication, 25).

**APÊNDICE A**  
(Dados experimentais e calculados)

Tabela A-1 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante A

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q ( $m^3/dia/m$ )	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
34	49,25	59,00	0,83	50,82	0,0097	0,30
35	43,67	54,84	0,80	49,38	0,0092	0,28
42	32,69	40,32	0,81	41,21	0,0079	0,24
48	29,19	36,67	0,78	36,21	0,0078	0,24
57	25,37	32,67	0,77	32,95	0,0077	0,24
62	21,69	29,12	0,75	27,99	0,0070	0,24
66	18,31	24,43	0,75	26,13	0,0069	0,22
70	14,98	20,32	0,74	21,78	0,0069	0,21
92	13,31	16,63	0,80	18,89	0,0070	0,22
115	9,97	13,10	0,76	15,02	0,0066	0,20
141	7,17	9,59	0,75	10,82	0,0066	0,20
279	4,32	5,92	0,73	6,25	0,0074	0,23
567	2,48	2,78	0,89	3,20	0,0077	0,24
Médias	20,88	26,54	0,78	26,20	0,0076	0,23

Tabela A-2 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante B

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q ( $m^3/dia/m$ )	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
33	47,05	58,55	0,80	52,36	0,0089	0,27
38	45,76	56,68	0,81	45,47	0,0100	0,31
40	38,49	50,53	0,76	43,59	0,0089	0,27
47	27,48	35,90	0,76	36,87	0,0074	0,23
58	24,63	32,52	0,76	29,69	0,0083	0,23
66	22,09	28,68	0,77	26,02	0,0085	0,23
70	18,83	24,58	0,77	24,83	0,0076	0,23
85	15,54	20,74	0,75	20,42	0,0076	0,23
99	13,65	17,75	0,78	16,71	0,0082	0,25
127	11,10	14,54	0,76	13,62	0,0081	0,25
163	8,86	11,27	0,78	10,66	0,0083	0,23
278	6,26	7,67	0,82	6,28	0,0099	0,30
590	3,47	3,83	0,91	2,93	0,0115	0,35
Médias	21,78	27,94	0,79	25,34	0,0087	0,26

Tabela A-3 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante C

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q (m <sup>3</sup> /dia/m)	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
34	56,00	59,00	0,95	50,82	0,0110	0,33
36	55,96	57,45	0,97	48,00	0,0116	0,35
42	43,82	49,30	0,89	41,14	0,0106	0,32
50	32,56	38,31	0,85	34,56	0,0094	0,28
59	29,32	33,28	0,88	29,28	0,0094	0,29
68	26,30	29,72	0,88	25,41	0,0100	0,30
71	23,70	26,22	0,90	24,33	0,0097	0,29
83	20,61	22,70	0,91	20,81	0,0099	0,30
97	16,68	19,06	0,87	17,81	0,0093	0,28
126	13,27	15,14	0,87	13,71	0,0096	0,29
172	10,05	11,47	0,87	10,04	0,0100	0,30
305	7,18	7,89	0,91	5,66	0,0126	0,38
663	4,16	4,16	1,00	2,61	0,0159	0,47
Médias	26,12	28,75	0,90	24,94	0,0107	0,32

Tabela A-4 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante D

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q (m <sup>3</sup> /dia/m)	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
28	28,50	36,00	0,79	61,71	0,0046	0,14
29	26,45	33,95	0,78	59,58	0,0044	0,13
31	19,42	27,09	0,72	55,46	0,0035	0,11
39	17,04	24,83	0,69	44,68	0,0038	0,12
41	16,02	23,32	0,67	42,01	0,0038	0,12
46	14,34	21,22	0,67	37,52	0,0038	0,12
50	12,84	19,09	0,67	35,70	0,0034	0,10
62	11,24	16,57	0,68	28,35	0,0034	0,10
73	9,83	13,85	0,71	24,09	0,0041	0,13
97	8,04	11,82	0,68	18,01	0,0045	0,14
133	6,79	9,58	0,71	14,00	0,0045	0,14
238	4,79	6,86	0,70	7,06	0,0067	0,21
468	3,34	4,58	0,73	3,08	0,0108	0,33
Médias	13,74	19,13	0,71	33,17	0,0047	0,14

Tabela A-5 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante E

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q ( $m^3/dia/m$ )	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
30	35,46	45,12	0,78	58,20	0,0061	0,19
35	29,20	38,11	0,77	49,89	0,0058	0,18
41	21,29	29,84	0,71	42,37	0,0050	0,15
49	19,90	27,98	0,71	35,42	0,0056	0,17
52	18,21	25,37	0,72	33,47	0,0054	0,17
56	16,12	22,78	0,71	30,69	0,0053	0,16
65	13,41	19,37	0,69	26,58	0,0050	0,16
75	10,71	15,67	0,68	23,07	0,0048	0,15
99	8,34	11,89	0,70	17,74	0,0048	0,15
141	6,10	8,84	0,69	12,28	0,0050	0,15
194	4,54	6,33	0,72	8,93	0,0051	0,16
412	2,98	3,82	0,78	4,24	0,0071	0,22
1129	1,47	1,72	0,85	1,64	0,0090	0,28
Médias	14,44	19,76	0,73	26,50	0,0057	0,18

Tabela A-6 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante F

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q ( $m^3/dia/m$ )	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
22	40,33	49,04	0,82	64,88	0,0063	0,19
36	30,36	37,90	0,80	47,44	0,0064	0,20
40	25,50	32,97	0,77	36,79	0,0069	0,21
52	24,12	30,58	0,79	33,36	0,0072	0,22
54	21,78	27,78	0,78	31,81	0,0068	0,21
60	18,98	24,88	0,76	28,51	0,0066	0,20
70	16,21	21,04	0,77	24,70	0,0065	0,20
83	14,07	17,62	0,80	21,20	0,0066	0,20
104	10,62	13,87	0,76	16,66	0,0064	0,20
136	8,27	10,48	0,79	12,22	0,0068	0,21
195	6,09	7,63	0,80	8,95	0,0068	0,21
361	4,35	4,82	0,90	4,72	0,0092	0,28
701	2,80	2,80	1,00	2,49	0,0113	0,35
Médias	17,19	21,65	0,81	25,67	0,0072	0,22

Tabela A-7 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante G

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q (m <sup>3</sup> /dia/m)	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
23	45,16	53,28	0,85	73,65	0,0061	0,19
34	42,47	49,65	0,85	50,40	0,0084	0,26
41	30,64	38,02	0,80	42,90	0,0071	0,22
51	27,70	33,27	0,83	34,15	0,0081	0,25
55	25,37	30,27	0,84	31,65	0,0080	0,25
60	23,17	27,25	0,85	29,38	0,0079	0,24
70	19,13	23,70	0,81	26,16	0,0079	0,24
81	16,61	20,40	0,81	21,26	0,0078	0,24
106	13,72	16,52	0,83	16,32	0,0084	0,26
142	10,71	12,83	0,83	12,15	0,0088	0,26
205	8,67	9,38	0,92	8,11	0,0107	0,33
404	5,67	6,33	0,89	4,29	0,0132	0,41
849	2,84	2,92	0,97	2,08	0,0137	0,42
Médias	20,91	24,91	0,85	27,11	0,0089	0,27

Tabela A-8 - Parâmetros hidráulicos apresentados pelo sistema drenante H

$\Delta t$ (s)	$h_e$ (cm)	$h_{tot}$ (cm)	$\frac{h_e}{h_{tot}}$	q (m <sup>3</sup> /dia/m)	$r_e$ (dia/m)	$\alpha$
18	23,21	40,54	0,57	98,16	0,0024	0,07
27	20,70	36,38	0,57	65,16	0,0032	0,10
30	13,64	26,85	0,51	56,71	0,0024	0,07
40	12,07	24,24	0,50	42,69	0,0028	0,09
42	11,18	22,77	0,50	40,82	0,0027	0,08
45	9,92	20,26	0,49	38,07	0,0026	0,08
53	8,41	17,82	0,47	32,81	0,0025	0,08
58	7,04	14,54	0,48	29,61	0,0024	0,07
74	5,57	12,03	0,46	23,21	0,0024	0,07
98	4,23	8,77	0,48	17,68	0,0024	0,07
125	2,69	6,23	0,43	13,89	0,0019	0,06
246	1,37	2,87	0,48	7,12	0,0019	0,06
558	0,37	1,00	0,37	3,15	0,0014	0,04
Médias	9,26	18,02	0,48	36,08	0,0024	0,07

Tabela A-9 - Cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ) por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
A			B			C			D		
$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)
2,48	1	3,85	3,47	1	3,85	4,16	1	3,85	3,34	1	3,85
4,32	2	11,54	6,26	2	11,54	7,89	2	11,54	4,79	2	11,54
7,17	3	19,23	8,86	3	19,23	11,47	3	19,23	6,79	3	19,23
9,97	4	26,92	11,10	4	26,92	15,14	4	26,92	8,04	4	26,92
13,31	5	34,61	13,65	5	34,61	19,06	5	34,61	9,83	5	34,61
14,98	6	42,30	15,54	6	42,30	22,70	6	42,30	11,24	6	42,30
18,31	7	50,00	18,83	7	50,00	26,27	7	50,00	12,84	7	50,00
21,69	8	57,69	22,09	8	57,69	29,72	8	57,69	14,34	8	57,69
25,37	9	65,38	24,63	9	65,38	33,28	9	65,38	16,02	9	65,38
28,19	10	73,08	27,48	10	73,08	38,31	10	73,08	17,04	10	73,08
32,69	11	80,77	38,49	11	80,77	49,30	11	80,77	19,42	11	80,77
43,67	12	88,46	45,76	12	88,46	57,45	12	88,46	26,45	12	88,46
49,25	13	96,15	47,05	13	96,15	59,00	13	96,15	28,50	13	96,15

Tabela A-10 - Cargas hidráulicas de entrada ( $h_e$ ) por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
E			F			G			H		
$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)	$h_e$	Ord.	P (%)
1,47	1	3,85	2,80	1	3,85	2,84	1	3,85	0,37	1	3,85
2,98	2	11,54	4,35	2	11,54	5,67	2	11,54	1,37	2	11,54
4,54	3	19,23	6,09	3	19,23	8,67	3	19,23	2,69	3	19,23
6,10	4	26,92	8,27	4	26,92	10,71	4	26,92	4,23	4	26,92
8,34	5	34,61	10,62	5	34,61	13,72	5	34,61	5,57	5	34,61
10,71	6	42,30	14,07	6	42,30	16,61	6	42,30	7,84	6	42,30
13,41	7	50,00	16,21	7	50,00	19,13	7	50,00	8,41	7	50,00
16,12	8	57,69	18,98	8	57,69	23,17	8	57,69	9,92	8	57,69
18,21	9	65,38	21,78	9	65,38	25,37	9	65,38	11,18	9	65,38
19,90	10	73,08	24,12	10	73,08	27,70	10	73,08	12,07	10	73,08
21,29	11	80,77	25,50	11	80,77	30,64	11	80,77	13,64	11	80,77
29,20	12	88,46	30,36	12	88,46	42,47	12	88,46	20,70	12	88,46
35,46	13	96,15	40,33	13	96,15	45,15	13	96,15	23,21	13	96,15

Tabela A-11 - Razão entre cargas hidráulicas ( $h_e/h_{tot}$ ) por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
A			B			C			D		
$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)
0,73	1	3,85	0,75	1	3,85	0,87	1	3,85	0,67	1	3,85
0,74	2	11,54	0,76	2	11,54	0,87	2	11,54	0,67	2	11,54
0,75	3	19,23	0,76	3	19,23	0,87	3	19,23	0,67	3	19,23
0,75	4	26,92	0,76	4	26,92	0,88	4	26,92	0,68	4	26,92
0,75	5	34,61	0,76	5	34,61	0,88	5	34,61	0,68	5	34,61
0,76	6	42,30	0,77	6	42,30	0,89	6	42,30	0,69	6	42,30
0,77	7	50,00	0,77	7	50,00	0,89	7	50,00	0,70	7	50,00
0,78	8	57,69	0,78	8	57,69	0,90	8	57,69	0,71	8	57,69
0,80	9	65,38	0,79	9	65,38	0,91	9	65,38	0,71	9	65,38
0,80	10	73,08	0,80	10	73,08	0,91	10	73,08	0,72	10	73,08
0,81	11	80,77	0,81	11	80,77	0,95	11	80,77	0,73	11	80,77
0,83	12	88,46	0,82	12	88,46	0,97	12	88,46	0,78	12	88,46
0,89	13	96,15	0,91	13	96,15	1,00	13	96,15	0,79	13	96,15

Tabela A-12 - Razão entre cargas hidráulicas  $h_e/h_{tot}$  por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
E			F			G			H		
$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)	$h_e/h_{tot}$	Ord.	P (%)
0,68	1	3,85	0,76	1	3,85	0,80	1	3,85	0,37	1	3,85
0,69	2	11,54	0,76	2	11,54	0,81	2	11,54	0,43	2	11,54
0,69	3	19,23	0,77	3	19,23	0,81	3	19,23	0,46	3	19,23
0,70	4	26,92	0,77	4	26,92	0,83	4	26,92	0,47	4	26,92
0,71	5	34,61	0,78	5	34,61	0,83	5	34,61	0,48	5	34,61
0,71	6	42,30	0,79	6	42,30	0,83	6	42,30	0,48	6	42,30
0,71	7	50,00	0,79	7	50,00	0,84	7	50,00	0,49	7	50,00
0,72	8	57,69	0,80	8	57,69	0,85	8	57,69	0,49	8	57,69
0,72	9	65,38	0,80	9	65,38	0,85	9	65,38	0,50	9	65,38
0,77	10	73,08	0,80	10	73,08	0,85	10	73,08	0,50	10	73,08
0,78	11	80,77	0,82	11	80,77	0,89	11	80,77	0,51	11	80,77
0,78	12	88,46	0,90	12	88,46	0,92	12	88,46	0,57	12	88,46
0,85	13	96,15	1,00	13	96,15	0,97	13	96,15	0,57	13	96,15

Tabela A-13 - Resistência de entrada ( $r_e(\text{dia}/m)$ )  $\times 10^{-3}$  por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
A			B			C			D		
$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)
6,60	1	3,85	7,40	1	3,85	9,30	1	3,85	3,40	1	3,85
6,60	2	11,54	7,60	2	11,54	9,40	2	11,54	3,40	2	11,54
6,90	3	19,23	7,60	3	19,23	9,40	3	19,23	3,50	3	19,23
6,90	4	26,92	8,10	4	26,92	9,60	4	26,92	3,80	4	26,92
7,00	5	34,61	8,20	5	34,61	9,70	5	34,61	3,80	5	34,61
7,00	6	42,30	8,30	6	42,30	9,90	6	42,30	3,80	6	42,30
7,00	7	50,00	8,30	7	50,00	10,00	7	50,00	4,10	7	50,00
7,40	8	57,69	10,00	8	57,69	10,00	8	57,69	4,40	8	57,69
7,70	9	65,38	8,90	9	65,38	10,60	9	65,38	4,50	9	65,38
7,80	10	73,08	8,90	10	73,08	11,00	10	73,08	4,50	10	73,08
7,90	11	80,77	9,90	11	80,77	11,60	11	80,77	4,60	11	80,77
9,20	12	88,46	10,00	12	88,46	12,60	12	88,46	6,70	12	88,46
9,70	13	96,15	11,50	13	96,15	15,90	13	96,15	10,80	13	96,15

Tabela A-14 - Resistências de entrada  $r_e(\text{dia}/m) \times 10^{-3}$  por ordem de magnitude com respectivas probabilidades

Sistemas Drenantes											
E			F			G			H		
$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)	$r_e$	Ord.	P (%)
4,80	1	3,85	6,30	1	3,85	6,10	1	3,85	1,40	1	3,85
4,80	2	11,54	6,40	2	11,54	7,10	2	11,54	1,90	2	11,54
5,00	3	19,23	6,40	3	19,23	7,80	3	19,23	1,90	3	19,23
5,00	4	26,92	6,50	4	26,92	7,90	4	26,92	2,40	4	26,92
5,00	5	34,61	6,60	5	34,61	7,90	5	34,61	2,40	5	34,61
5,10	6	42,30	6,60	6	42,30	8,00	6	42,30	2,40	6	42,30
5,30	7	50,00	6,80	7	50,00	8,10	7	50,00	2,40	7	50,00
5,40	8	57,69	6,80	8	57,69	8,40	8	57,69	2,40	8	57,69
5,60	9	65,38	6,80	9	65,38	8,40	9	65,38	2,50	9	65,38
5,80	10	73,08	6,90	10	73,08	8,80	10	73,08	2,60	10	73,08
6,10	11	80,77	7,20	11	80,77	10,70	11	80,77	2,70	11	80,77
7,10	12	88,46	9,20	12	88,46	13,20	12	88,46	2,80	12	88,46
9,00	13	96,15	11,30	13	96,15	13,70	13	96,15	3,20	13	96,15