

PROPAGAÇÃO TRI-DIMENSIONAL DA FRENTE
ÚMIDA POR CÁPSULAS POROSAS.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

PROPAGAÇÃO TRI-DIMENSIONAL DA FRENTE
ÚMIDA POR CÁPSULAS POROSAS

Por

Hélio Santa Cruz Almeida Junior
(Engenheiro Agrônomo)

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JUNHO - 1985

HÉLIO SANTA CRUZ ALMEIDA JUNIOR

PROPAGAÇÃO TRI-DIMENSIONAL DA FRENTE
ÚMIDA POR CÁPSULAS POROSAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências - (M.Sc).

Área de Concentração : Recursos Hídricos

Orientador : Dr. SEEMANAPALLI VENKATA KAMESWARA SARMA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JUNHO - 1985



A447p

Almeida Junior, Hélio Santa Cruz.

Propagação tri-dimensional da frente úmida por cápsulas porosas / Hélio Santa Cruz Almeida Júnior. - Campina Grande, 1985.

136 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1985.

"Orientação : Prof. Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma".

Referências.

1. Água - Engenharia Civil. 2. Irrigação. 3. Recursos Hídricos. 4. Dissertação - Ciências. I. Sarma, Seemanapalli Venkata Kameswara. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

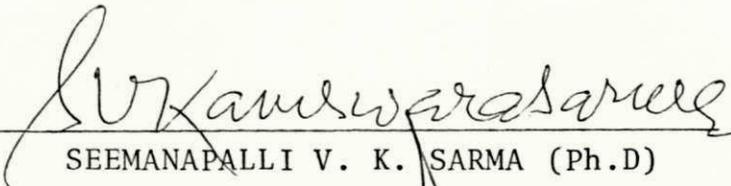
CDU 628.1(043)

PROPAGAÇÃO TRI-DIMENSIONAL DA FRENTE
ÚMIDA POR CÁPSULAS POROSAS.

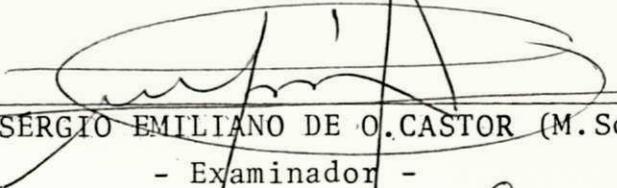
Por

HÉLIO SANTA CRUZ ALMEIDA JUNIOR

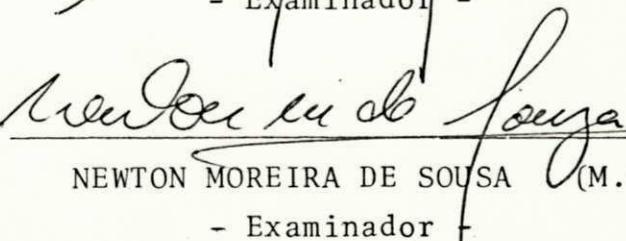
Dissertação Aprovada em 07/06/1985


SEEMANAPALLI V. K. SARMA (Ph.D)

- Orientador -


SÉRGIO EMILIANO DE O. CASTOR (M.Sc)

- Examinador -


NEWTON MOREIRA DE SOUSA (M.Sc)

- Examinador -

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JUNHO - 1985

À minha esposa JOSINEIDE,
e aos meus filhos HELANE
e BRUNO, dedico este traba
balho.

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

A DEUS, por compensar o meu esforço e trabalho, sempre com bons frutos.

Ao professor, Dr. SEEMANAPALLI VENKATA KAMESWARA SARMA (Ph.D) pela presteza e empenho na orientação em todas as etapas desta Tese de Mestrado.

Aos meus pais HÉLIO SANTA CRUZ ALMEIDA e MARIA SALETE FONSECA ALMEIDA, que na sua humildade e honestidade, se sacrificaram para educar-me condignamente, e aos meus irmãos pelo interesse demonstrado.

À minha esposa, JOSINEIDE MEDEIROS ALMEIDA por sua ajuda, apoio e compreensão durante todas as fases do curso e deste trabalho, e aos meus filhos HELANE e BRUNO MEDEIROS ALMEIDA, pela privação de suas merecidas horas de lazer.

Ao Laboratório de Energia e Biomassa do Campus III da Universidade Federal da Paraíba, nas pessoas dos professores AMÉRICO PERAZZO NETO e KUSHIPARAMBIL PRAKASAN, pela oportunidade concedida.

À Chefia do Departamento de Solos e Engenharia Rural do Campus III da Universidade Federal da Paraíba, na pessoa do professor JOSÉ FERREIRA DA COSTA, pela minha liberação para cursar o Mestrado no Campus II da mesma Universidade.

Ao técnico ISMAEL JOSÉ PEREIRA, pela dedicada colaboração e habilidade na realização dos ensaios.

A RAULINO FARIAS DE BRITO e DEMOSTHENES CARDOSO T. NETO, pela solicitude na execução dos trabalhos de datilografia e normografia.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

À Coordenação, Professores e colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, pela contribuição científica.

R E S U M O

Este trabalho consistiu no estudo tri-dimensional da propagação da frente úmida, sob condições não permanentes, através do uso de cápsulas porosas como método de irrigação. Este estudo torna possível definir o espaçamento entre as cápsulas porosas e entre as plantas, além de fornecer a quantidade de água liberada para as plantas.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil do CCT/UFPb, utilizando a cápsula porosa, sendo que o material usado para a propagação da frente úmida foi areia fina e um solo cujas características foram descritas no texto. Um sistema eletrônico de aquisição de dados foi usado com eficiência na coleta de dados sob condições transitórias sendo os experimentos conduzidos em um modelo reduzido de PVC, de forma cilíndrica. As características físicas, tais como sucção, condutividade hidráulica e difusibilidade como função única do teor de umidade das matrizes utilizadas, como areia fina e solo, foram determinadas no laboratório com equipamentos especialmente desenvolvidos para esta finalidade.

O estudo em 3 dimensões proporcionou uma melhor compreensão dos fenômenos que envolvem os complexos processos da propagação da frente úmida, o que foi útil para o desenvolvimento de um método prático de irrigação, usando economicamente os recursos hídricos das regiões semi-áridas que estão diminuindo

rapidamente, devido as altas taxas de evapotranspiração e má utilização dos recursos disponíveis. A medição das quantidades de água liberada sob diferentes pressões, dos volumes molhados da matriz, espalhamentos máximos radiais e as correspondentes infiltrações e suas respectivas taxas de avanço, e área do bulbo molhado como função do tempo e interpretação destes resultou na caracterização da formação do bulbo, para uso subsequente na determinação do número de covas e espaçamento de plantas, sob dada aplicação de pressão para o tipo de solo desejado. Foram feitos testes de uniformidade, análise de regressão e correlação para provar a validade dos resultados obtidos nas experiências do laboratório.

O trabalho então, apresenta relevante importância para as necessidades do nordeste do Brasil em geral, e da Paraíba em particular, apresentando ótima utilização da água no sertão semi-árido, notadamente na exploração de hortaliças e outros cultivos de subsistência de pequenos e médios produtores.

A B S T R A C T

This work involved in the study of the propagation of the wetting front in three dimensions under unsteady state conditions by the use of porous cups with the object of using the same as a method of irrigation. This study makes it possible to define the spacing between porous cups and that between the plants and the water requirements of crops.

The tests were conducted in the Hydraulic Laboratory of the Department of Civil Engineering of the CCT-UFPb, utilizing the porous cups, the materials used for the propagation of wetting front being fine type sand and a soil whose characteristics were described in the text. An electronic data acquisition system was used for rapid collection of data under transient conditions, the experiments having been conducted in a PVC model of cylindrical form to reduced scale. The flow characteristics of the materials used, such as the moisture suction, hydraulic conductivity and diffusivity as single valued functions of moisture content were determined in the laboratory by apparatus specially developed for this purpose.

The 3-dimensional study helped in the better understanding of the the phenomena involving complex processes of wetting front propagation, which served in the development of a practical method for irrigation, using economically the rapidly-diminuing quantities of water resources in semi-arid regions, due to high evaporation rates and mal utilization of the

available resources. By way of measurement of quantities of water liberated under different pressures and the volumes of wetted matrix, maximum radial spreadings and corresponding infiltrations and their respective rates of advance and areas of the wetted bulb as function of time and interpretation of these, it resulted in characterising the formation of the bulb, for subsequent use in the determination of the number of beds and spacing of plants for the given application of pressure for the soil type desired. Tests of uniformity and analysis of regression and correlation were done to prove the validity of the results obtained through laboratory experiments.

The work thus represents relevant importance to the needs of the northeast Brazil in general and to Paraíba in particular so far as the optimum utilization of water in the semi-arid sertão is concerned, notably in the exploration of vegetables and others of subsistence crops, for small and medium producers.

Í N D I C E

	Página
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO II	
REVISÃO DE LITERATURA.....	04
1 - IRRIGAÇÃO POR CÂPSULAS POROSAS.....	04
2 - MOVIMENTO DA ÁGUA EM MEIOS POROSOS.....	06
CAPÍTULO III	
MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
1 - LOCALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	15
2.1 - Cápsulas Porosas.....	15
2.2 - Areia.....	16
2.3 - Solo.....	18
2.4 - Sistema de Aquisição de Dados.....	18
3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 - Sucção.....	23
3.2 - Difusibilidade.....	25
3.3 - Propagação da Frente Úmida.....	28
3.4 - Distribuição da Umidade com o Tempo.....	31
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
1 - EFEITO DA SUCÇÃO NA UMIDADE.....	33

1.1 - Areia.....	33
1.2 - Solo.....	35
1.3 - Comparação entre a Areia e o Solo.....	39
2 - EFEITO DA UMIDADE SOBRE A DIFUSIBILIDADE.....	41
2.1 - Areia.....	42
2.2 - Solo.....	46
2.3 - Comparação da Difusibilidade e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo.....	47
2.4 - Estabelecimento das Equações Adequadas para a Difusibilidade e Condutividade Hidráulica, na Areia e no Solo, em função do Teor de Umidade.	48
3 - PROPAGAÇÃO DA FRENTE ÚMIDA.....	52
3.1 - Liberação de Água pela Cápsula Porosa.....	52
3.1.1 - Areia.....	54
3.1.2 - Solo.....	55
3.1.3 - Comparação entre a Areia e o Solo...	57
3.1.4 - Escolha de Cargas Hidrostáticas em função do Volume de Água Desejado, na Areia e no Solo.....	58
3.2 - Volume Molhado.....	60
3.2.1 - Areia.....	61
3.2.2 - Solo.....	68
3.2.3 - Comparação entre a Areia e o Solo...	71
3.3 - Espalhamentos Máximos Radiais e Suas Corres- pondentes Taxas.....	74
3.3.1 - Areia.....	74
3.3.2 - Solo.....	77
3.3.3 - Comparação entre a Areia e o Solo...	78

3.4 - Infiltrações Verticais e suas Corresponden	
tes Taxas.....	79
3.4.1 - Areia.....	79
3.4.2 - Solo.....	81
3.4.3 - Comparação entre a Areia e o Solo.....	81
3.5 - Prognóstico dos Espalhamentos e Infiltrações	
na Areia e no Solo.....	82
3.5.1 - Espalhamentos.....	82
3.5.1.1 - Areia.....	84
3.5.1.2 - Solo.....	85
3.5.2 - Infiltrações.....	86
3.5.2.1 - Areia.....	86
3.5.2.2 - Solo.....	88
3.5.3 - Área de Influência do Bulbo Molhado.	89
4 - DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE COM O TEMPO.....	91
4.1 - Percentagem dos Volumes Ocupados pelas Fai	
xas de Umidade.....	91
4.1.1 - Areia.....	92
4.1.2 - Solo.....	95
4.2 - Espalhamentos Máximos Radiais.....	99
4.2.1 - Areia.....	99
4.2.2 - Solo.....	100
4.3 - Infiltração Vertical.....	100
4.3.1 - Areia.....	101
4.3.2 - Solo.....	101
5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	103
5.1 - Considerações Gerais.....	103
5.2 - Análise de Regressão.....	105

5.2.1 - Volumes Liberados X Volumes Molhados	106
5.2.2 - Volumes Liberados X Cargas Aplicadas	107
5.2.3 - Espalhamentos Radiais na Areia e no Solo para as Diferentes Cargas.....	108
5.2.4 - Infiltrações Verticais na Areia e no Solo para as Diferentes Cargas.....	110
5.3 - Testes de Uniformidade na Liberação D'água por Cápsulas Porosas.....	111
6 - APLICAÇÃO PRÁTICA DO USO DA CÁPSULA POROSA NUMA CONDIÇÃO HIPOTÉTICA DE CAMPO.....	115
6.1 - Preparo do Solo e Montagem do Sistema.....	115
6.2 - Determinação do Número de Covas e Espaçamento entre Elas no Lote Experimental.....	116
6.3 - Liberação D'água pela Cápsula Porosa Durante o Ciclo do Cultivo.....	119
CAPÍTULO V	
CONCLUSÕES.....	121
PROGRAMAÇÃO FUTURA.....	125
NOMENCLATURA.....	128
BIBLIOGRAFIA.....	130

L I S T A D E T A B E L A S

	Página
TABELA 1 - Características da Areia Padrão.....	17
TABELA 2 - Características Físicas e Químicas do Solo (0 - 15cm) do Perímetro Irrigado de Sumé-Pb	19
TABELA 3 - Valores de Sucção e Percentagens de Umidade na Areia e no Solo.....	40
TABELA 4 - Valores de Percentagem de Umidade, Difusibilidade, Gradiente de Sucção e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo.....	45
TABELA 5 - Valores Médios da Difusibilidade e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo.....	50
TABELA 6 - Taxas dos Volumes de Água Liberados pela Cápsula Porosa, na Areia e no Solo, para as Cargas Aplicadas.....	56
TABELA 7 - Volumes de Água Liberados em Função de Diferentes Pressões Hidrostáticas.....	59
TABELA 8 - Taxas dos Volumes Molhados na Areia e no Solo, expressas em cm^3/dia , para as Cargas Aplicadas.....	62
TABELA 9 - Percentagens de Umidade (g/g) na Areia e no Solo.....	73
TABELA 10 - Espalhamentos Máximos Radiais e as Correspondentes Taxas, na Areia e no Solo.....	75

TABELA 11 - Infiltrações Verticais e as Correspondentes Taxas, na Areia e no Solo.....	80
TABELA 12 - Extrapolação dos Espalhamentos, na Areia e no Solo para Maiores Períodos de Tempo....	83
TABELA 13 - Extrapolação das Infiltrações na Areia e no Solo para Maiores Períodos de Tempo....	83
TABELA 14 - Razões dos Espalhamentos, na Areia e no Solo.....	87
TABELA 15 - Razões entre as Infiltrações na Areia e no Solo.....	87
TABELA 16 - Valores dos Parâmetros Estudados, na Distribuição de Umidade na Areia, nos tempos de 15.000 e 22.000 s, para a Pressão Hidrostática Positiva de 75 cm.....	98
TABELA 17 - Valores dos Parâmetros Estudados, na Distribuição de Umidade no Solo, nos tempos de 100.000 e 123.000 s, para a Pressão Hidrostática Negativa de -25 cm.....	98
TABELA 18 - Grupos das Liberações D'água e Frequência de Ocorrência das Mesmas.....	114

L I S T A D E F I G U R A S

	Página
FIGURA 1 - Cápsula Porosa Utilizada.....	16
FIGURA 2 - Diagrama em Blocos do Sistema de Aquisição de Dados Utilizado.....	20
FIGURA 3 - Equipamento Utilizado nos Testes de Sucção.	24
FIGURA 4 - Modelo Utilizado nos Testes de Difusibilidade.....	26
FIGURA 5 - Modelo Reduzido e Reservatório de Abastecimento, Utilizados na Propagação da Frente Úmida na Areia e no Solo.....	29
FIGURA 6 - Efeito da Sucção na Umidade, na Areia e no Solo.....	34
FIGURA 7 - Relação entre Distâncias Horizontais e Percentagens de Umidade, para a Areia e o Solo	43
FIGURA 8 - Curvas de Difusibilidade na Areia e no Solo.....	44
FIGURA 9 - Relação entre Volumes D'água Liberados (ml) e Tempo (s).....	53
FIGURA 10 - Relação entre Volumes D'água Liberados e Cargas Aplicadas.....	58
FIGURA 11 - Propagação da Frente Úmida na Areia para o caso da Sucção ($\Delta h = -25\text{cm}$).....	63
FIGURA 12 - Propagação da Frente Úmida na Areia para a Pressão Positiva de 50 cm.....	64

FIGURA 13 - Propagação da Frente Úmida na Areia para a Pressão Positiva de 75 cm.....	65
FIGURA 14 - Propagação da Frente Úmida na Areia para a Pressão Positiva de 100 cm.....	66
FIGURA 15 - Propagação da Frente Úmida no Solo, para o caso da Sucção ($\Delta h = -25$ cm).....	69
FIGURA 16 - Propagação da Frente Úmida no Solo, para a Pressão Positiva de 75 cm.....	70
FIGURA 17 - Distribuição da Umidade na Areia a 15.000 s, para a Pressão Positiva de 75 cm.....	93
FIGURA 18 - Distribuição da Umidade na Areia a 22.000 s, para a Pressão Positiva de 75 cm.....	94
FIGURA 19 - Distribuição da Umidade no Solo a 100.000 s, para a Pressão Hidrostática Negativa de -25 cm (sucção).....	96
FIGURA 20 - Distribuição da Umidade no Solo a 123.000 s, para a Pressão Hidrostática Negativa de -25 cm (sucção).....	97
FIGURA 21 - Diagrama de Dispersão para as Variáveis X e Y (hipotético).....	104
FIGURA 22 - Croquí da Área Experimental Hipotética de 240 m ² Irrigada por Cápsulas Porosas.....	117

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

Desde épocas muito remotas, tem-se debatido constante e incansavelmente o problema da falta de água nas regiões áridas e semi-áridas do Nordeste. Este tem sido o alvo de diversos e frequentes planos e projetos governamentais, que se empenham em adquirir e repassar sempre técnicas cujas finalidades sejam a economia e a melhor maneira de aproveitamento da água disponível destas áreas.

Levando-se em conta que a grande extensão territorial do Nordeste iria requerer um potencial bastante elevado de disponibilidade de água para que se aplicassem os métodos convencionais de irrigação, e que os longos períodos de estiagem e a intermitência das chuvas nestas regiões dificultariam o uso de tais métodos, necessário se faz que sejam pesquisados e testados novos métodos de utilização dos recursos físico-hídricos disponíveis, de forma econômica, prática e eficaz. Deste modo, é que se apresenta o método de irrigação por cápsulas porosas como um método adequado para ser pesquisado, analisado e aplicado nas regiões áridas e semi-áridas, mesmo porque, requer matéria prima básica e mão-de-obra regional, de fácil manejo, satisfazendo altos índices de economia no uso de água e se mostrando ideal para estabilização das culturas agrícolas, notadamente aquelas de subsistência. Este método foi inicialmente desenvolvido por OLGUIN (1975) no México, e é particularmente

aplicável em todas as áreas da chamada região da sêca.

Desenvolvendo trabalhos com o método de irrigação por cápsulas porosas sob sucção, na cultura do milho, OLGUIN et alii (1976), constataram que o referido método atende as exigências hídricas da cultura, sendo que a quantidade d'água consumida nestas condições para este método, foi inferior à utilizada por outros métodos, inclusive o de gotejamento.

No Brasil, os trabalhos iniciais com o método de irrigação por cápsulas porosas foram conduzidos no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CPATSA/EMBRAPA) por SILVA et alii (1978a e b), que deram início à adaptação do método às condições sócio-econômicas e naturais do trópico semi-árido nordestino e concluíram que o método de irrigação por cápsulas porosas fornece melhores níveis de umidade na zona radicular das plantas, em relação aos métodos tais como gotejo e pote, devido ao fato de as cápsulas estarem em contato íntimo com as raízes das plantas, além de serem auto-reguláveis.

Os estudos de SILVA (1980) mostraram que o método de irrigação por cápsulas porosas era um método localizado no qual os teores de umidade cresciam de 0 a 30 cm de profundidade, aí atingindo seu nível máximo. A partir dessa faixa, este teor de umidade decresce para camadas inferiores, não ocorrendo perda de água por percolação. Entretanto, para este método, não se tem ainda informações suficientes e definitivas sobre a formação do bulbo molhado, indispensáveis para o espaçamento das plantas e das cápsulas.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo, caracteri

zar a formação do bulbo molhado por este método de irrigação em um solo de textura franco e uma areia fina, sob diferentes pressões hidrostáticas.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

1 - IRRIGAÇÃO POR CÁPSULAS POROSAS

Os primeiros estudos em condições de campo, do método de irrigação por cápsulas porosas sob sucção, foram realizados por OLGUIN (1975). Este método compreende um sistema onde uma série de cápsulas porosas de argila pura ou misturada, interconectadas por tubulações são ligadas a uma fonte de abastecimento. Nos citados estudos foram utilizadas cápsulas porosas que apresentavam a maior condutividade hidráulica possível na cultura do feijão, durante 70 dias, onde a água era auto-regulada pelas plantas propiciando elevada eficiência em seu uso.

SANTOS (1977) com o objetivo de determinar a água consumida ao longo do ciclo vegetativo do trigo, e compará-la com a consumida no método de irrigação por cápsulas porosas sob sucção, utilizou um lisímetro de pesagem e observou que o desenvolvimento radicular e vegetativo da cultura era afetada pela distribuição de umidade em quase todos os tratamentos com exceção de um deles, que comparado ao lisímetro apresentou um coeficiente de correlação (r) igual a 0,85.

VALE (1977) utilizando cápsulas porosas confeccionadas com material da região de Chapingo (México), a diversas tensões, constatou que após 38 dias de instaladas apresentaram um bulbo molhado de diâmetro igual a 45 cm.

SAUCEDO (1979) desenvolveu estudos submetendo cápsulas porosas a cargas negativas e positivas, sendo que a aplicação de carga positiva por longo tempo, reduzia as liberações de água. No que diz respeito à demanda de água pelo sistema solo-água-clima, os resultados mostraram a necessidade de combinação dos elementos responsáveis pela variação do potencial de água como: altura de sucção, condutividade hidráulica das cápsulas porosas, e superfície específica das mesmas.

SILVA et alii (1981) desenvolveram estudos que caracterizaram o método sob diferentes pressões hidrostáticas, em escala operacional, constatando-se alta uniformidade na liberação de água das cápsulas porosas, o que viabiliza seu emprego nas mais diversas aplicações que exijam precisão, notadamente nos sistemas água-solo-planta.

PIRES et alii (1982) desenvolveu estudos sobre a influência do tipo de água e interrupção no funcionamento do sistema sobre a liberação de água por cápsulas porosas novas e entre os vários resultados obtidos, observaram que estas cápsulas, em condições saturadas sob pressão hidrostática de 50 cm, apresentaram uniformidades na liberação de água, com vazão média diária de 15,71 l/dia e que a interrupção no funcionamento do sistema associada à qualidade de água usada na irrigação, com alto teor de argila em suspensão (1,6 g/l), ocasionaram reduções na liberação de água pelas cápsulas porosas em condições de campo.

2 - MOVIMENTO DA ÁGUA EM MEIOS POROSOS

No solo não saturado, os parâmetros de sucção (potencial capilar), condutividade capilar e difusibilidade estão intimamente ligados entre si.

DARCY (1856) desenvolvendo estudos ligados com a filtração de água para fins de abastecimento público, derivou uma equação, baseado em observações do movimento da água através de camadas de areia, encontrando que a velocidade do fluxo é proporcional a uma força condutora (gradiente) e à condutividade do meio poroso.

BOLTZMAN (1894) apresentou o conceito de difusão (η) variável nos solos como função da umidade (θ) e obteve a equação:

$$\eta(\theta) = xt^{-1/2} \quad \dots(1)$$

onde x é a distância horizontal alcançada pela fronteira úmida em um determinado tempo (t).

BUCKINGHAM (1907) desenvolveu os dois princípios básicos sobre as idéias modernas do movimento da água no solo, que foram o potencial capilar e a condutividade hidráulica.

GARDNER & WIDTSOE (1921) e RICHARDS (1931) estudaram as hipóteses de difusibilidade constante na condução capilar dos líquidos através dos meios porosos.

RICHARDS (1931) baseado na lei de Darcy, desenvolveu a teoria do fluxo não saturado, considerando o espaço vazio entre os grãos, cheio de ar, como sendo sólido, o que facilita o tratamento da equação do fluxo.

CHILDS (1940) utilizou-se dos artifícios de GARDNER & WIDTSOE (1921) e RICHARDS (1931), no estudo do transporte de água em solos pesados e argilosos. Como a difusibilidade varia muito com o teor de umidade, a aproximação de CHILDS pode ser considerada apenas como uma primeira tentativa de pouca precisão.

TERZAGHI (1943) mostrou pela primeira vez a evidência do movimento de água na franja capilar, assim mostrando o dinamismo da zona úmida que está no estado de saturação parcial.

BODMAN & COLMAN (1944) foram pioneiros na realização de experiências sobre infiltração nos solos, cujos dados são considerados como padrões por centenas de outros pesquisadores da área de infiltração e percolação dos solos.

CHILDS & COLLIS-GEORGE (1950) desenvolveram uma aproximação para a difusibilidade, a qual depende da concentração do teor de umidade, aplicando a lei de Darcy (1856), e estudaram o movimento da água com gradientes de potencial criados pelos gradientes do teor de umidade. Nesta tentativa, os autores consideraram o potencial de pressão como função única do teor de umidade.

KLUTE (1952) seguindo a aproximação de RICHARDS (1931) aplicou a teoria para meios homogêneos e usou a equação da continuidade para a forma vetor da lei de Darcy. A equação de KLUTE, expressa em termos volumétricos (assumindo a densidade do líquido constante) diz que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K\nabla\phi) \quad \dots (2)$$

onde: $\partial\theta$ - variação do teor de umidade (%)

∂t - variação do tempo em segundos

∇ - é o operador diferencial vetorial

K - condutividade hidráulica usada para a situação de meios hidráulicos não saturados (cm/s)

ϕ - potencial total (cm).

Quando o potencial total (ϕ) consiste unicamente dos componentes gravitacionais (z) e de pressões negativas ou capilares (Ψ), a forma muda para:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(K\nabla\Psi) + g \frac{\partial K}{\partial z} \quad \dots(3)$$

onde: Ψ - é o potencial de pressão negativa (cm)

z - é uma ordenada vertical, considerada positiva por estar acima do eixo (cm).

Quando (Ψ) e (K) são funções únicas do teor de umidade, a equação passa a ser:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad \dots(4)$$

onde a difusibilidade: (D):

$$D = K \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \quad \dots(5)$$

Mais recentemente, o mesmo autor desenvolveu o princípio de superposição na análise da difusão, e nesta tentativa, (D) foi expressa como função polinomial da umidade.

PHILIP (1957) utilizou a mesma técnica para ampliar o estudo explicando a teoria da infiltração, onde foram desenvolvidas todas as etapas desde o estágio primário de infiltração e absorção até o uso bi e tri-dimensional das equações no campo.

KLUTE (1957) utilizou o artifício de BOLTZMAN (1894) para obter diferentes valores de difusibilidade a vários teores de umidade, conduzindo um teste de difusão horizontal, em que a componente da gravidade não age e obteve a seguinte equação:

$$D_{\theta} = - \frac{1}{2t} \int_0^{\theta} x d\theta \left(\frac{\partial x}{\partial \theta} \right) \dots (6)$$

onde: $\int_0^{\theta} x d\theta$ - dá as áreas consideradas da curva, com (x) sendo as diferentes distâncias horizontais atingidas pela frente úmida.

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$ - os diferentes gradientes da curva.

t - o tempo gasto, em segundos, para a frente úmida atingir uma determinada secção.

O uso do conceito de semelhança foi adotado por MILLER & MILLER (1957); STALLMAN (1967) e COREY et alii (1965) em sistemas mais complexos, em meios cujas propriedades hidráulicas são não uniformes, e obtiveram curvas adimensionais entre várias propriedades da água e do solo.

BIOT (1957) identificou as propriedades físicas envolvidas no fluxo de calor com o fluxo de água no solo e resolveu as equações não lineares usando o termo de gravidade que não

interfere no fluxo de calor.

GARDNER & HILLEL (1962) analisaram as mudanças no conteúdo do teor de umidade nas colunas do solo durante o secamento, em função do tempo e posição, mantendo-se uma sucção constante na fronteira úmida.

HANKS & BOWERS (1962) e WHISLER & KLUTE (1966) utilizaram procedimentos numéricos para analisar a infiltração observada experimentalmente em solos estratificados, constatando que quando a água infiltra-se em meios porosos sofre um retardamento ao passar de texturas finas para texturas grossas.

RIJTEMA (1965) através da lei de Darcy e do conceito de variação da permeabilidade entre camadas não saturadas, apresentou uma equação exponencial que auxilia na determinação dos valores de velocidade de entrada e saída do fluxo vertical no processo de infiltração.

PHILIP (1966) desenvolveu trabalhos de pesquisas em meios heterogêneos não saturados sob condições não permanentes, cujos problemas são matematicamente muito complicados, tendo sido estudada a condutividade hidráulica que varia no espaço em função do potencial capilar.

SMITH (1967) esclareceu a relação entre a infiltração em areias de diferentes granulometrias e a recarga de água subterrânea, que tem aplicações para bacias hidrográficas não consolidadas. Os fenômenos da infiltração da chuva em vários sistemas homogêneos do solo, com contornos variáveis foram analisados e explicados, o que ajuda no entendimento do processo de drenagem.

Devido à complexidade das funções de permeabilidade e difusibilidade, GARDNER (1969) usou valores médios de difusibi

lidade para obter a entrada e saída do fluxo nas colunas do solo.

PHILIP (1969) desenvolveu uma análise da equação do fluxo com uma aproximação semi-analítica, para os meios semi-infinitos, com as condições iniciais e de contorno sendo constantes, sem considerar os efeitos das forças gravitacionais. Com o uso da substituição ou transformação de BOLTZMAN (1894), a equação não linear de difusão diferencial reduzir-se-á a uma equação simples em que o teor de umidade é uma função variável da distância e do tempo, como dado pela equação (1).

JACKSON & WHISLER (1970) consideraram a linearidade da condutividade hidráulica e a relacionaram com o valor médio do teor de umidade, conduzindo em seguida experiências entre solos drenados e não drenados.

HILLEL (1971) cita que a energia potencial da água no solo varia no espaço e no tempo, e que as diferenças na energia potencial entre um ponto e outro tendem a equilibrar-se movendo-se do ponto maior para o ponto de menor energia potencial. De acordo com o autor, quando o conteúdo de água no solo for igual ou inferior à sua capacidade de retenção, não haverá perdas de água por percolação profunda.

SARMA & PRADHAN (1971) estudaram o problema de drenagem por gravidade em aquíferos profundos e rasos, utilizando a técnica variacional de BIOT (1957), o que foi aplicável para análise do fluxo de calor em estruturas aeronáuticas, onde não é considerado o efeito da gravidade. Esta análise utiliza equações Lagrangianas e o princípio de HAMILTON (1834) onde o espalhamento em cada direção x , y e z , é considerado como coordena

das generalizadas nestas direções, como função da umidade e tempo.

JACKSON et alii (1973) analisaram a natureza do fluxo de água no solo após a irrigação, e concluíram que o fluxo de água na camada superficial é dominante logo após a irrigação e daí por diante nas camadas que mais sucessivamente se aprofundam.

KLUTE & HEERMAN (1974) usaram a técnica moderna para a solução da equação de RICHARDS (1931) e obtiveram a relação entre umidade e carga de pressão. O fenômeno de histerese foi observado para as condições periódicas de contato mantida na parte superior da curva.

MARINO (1974/75) analisou a equação não linear, parcial, diferencial e aplicou o tratamento para aquíferos não confinados (livres) que recebem recarga uniforme vertical da bacia através da fonte do espalhamento de forma circular ou retangular e analisou para os casos em que a taxa de recarga é muito menor que a condutividade hidráulica do meio. A condição de formação do chapéu da superfície freática foi analisada pelas equações correspondentes.

Segundo REICHARDT (1975) a drenagem interna ou redistribuição da água começa depois da infiltração desta no solo, e é devida ao efeito da gravidade e gradiente de sucção, sendo que parte dessa água se move para as camadas inferiores. Segundo o autor, este processo é contínuo, porém, tende a diminuir ou até a estabilizar-se, a menos que haja perdas de água por evaporação, ou que a água seja absorvida pelas plantas.

De acordo com CATÃO (1975), o processo de redistribui

ção da água no perfil do solo é uma função da quantidade aplicada, o que faz com que a frente úmida atinja as camadas mais profundas do terreno.

KHAN et alii (1976) consideraram a infiltração sob condições permanentes para fins de recarga dos aquíferos, sob situações complexas de condutividade variável e bacias de formas irregulares. Os resultados destes estudos ajudaram a calcular a forma do chapéu na proximidade da superfície, e são úteis nos problemas de drenagem dos solos com o uso de valetas.

COLLIS-GEORGE (1977) comparou dados experimentais com equações teóricas desenvolvidas em sistemas simples de solo. A infiltração acumulativa é considerada como proporcional ao quadrado do tempo, e foi expressa em função da absorvidade ($-\frac{\partial \theta}{\partial \Psi}$) e da taxa de infiltração ($-\frac{\partial z}{\partial t}$).

POULOVASSALIS (1977) estudou a forma dos perfis saturados e não saturados durante o estado permanente do fluxo, considerando o fenômeno de histerese. Verificou que após o molhamento, a água do solo atinge valores mínimos de cargas de pressão, condutividade hidráulica e teores de umidade.

VAUCLIN & KHANGI (1979) através dos métodos empíricos, estudaram os fenômenos transitórios bidimensionais em aquíferos parcialmente saturados pelo processo de recarga.

BABU (1979) sugeriu soluções para fronteiras de perfis não saturados durante o processo de infiltração em meios porosos e comparou com a teoria do potencial do fluxo.

CUSHMAN et alii (1979) analisaram o problema de drenagem bidimensional em meios porosos usando a técnica de elementos finitos, e para simplificar o problema, consideraram o meio

como homogêneo, isotrópico e isoterma, desprezando o efeito da histerese e elasticidade nos solos.

SAGAR & PSINGH (1980) estudaram a parte superior do solo e o teor de umidade na mesma, para fins de utilização pelas raízes das plantas, e consideraram as variáveis como precipitação natural, excesso de água de irrigação, e perdas das áreas nas proximidades, como fontes de recarga, uma vez que a drenagem sub-superficial baixa o nível freático e conseqüentemente reduz o teor de umidade na parte superficial do solo.

CASTOR & SARMA (1983) realizaram estudos uni e bi-dimensionais em modelo reduzido, com areias de granulometrias fina, média e grossa, e estabeleceram razões de escala entre estas areias. Verificaram que enquanto a relação linear é válida para as razões de comprimento e tempo no regime saturado, a lei que governa o regime não saturado (parcialmente saturado) é parabólica. Para previsão das fronteiras úmidas e saturadas sob condições transitórias nos aquíferos rasos e profundos, foram propostas equações do tipo logarítmica e exponencial aplicáveis para recarga dos aquíferos pelo sistema dos sulcos.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

1 - LOCALIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPb) situado na cidade de Campina Grande (Pb), durante o período de 30 de maio de 1983 a 06 de novembro de 1984.

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

2.1 - Cápsulas Porosas

Foram utilizadas cápsulas porosas oriundas do Campo Experimental do Bebedouro em Petrolina-Pe, confeccionadas pela equipe técnica da EMBRAPA, utilizando a metodologia descrita por SILVA (1980) com temperatura de cozedura de 1050°C. A referida cápsula é constituída de uma peça oca em forma de um tronco de cone, com dois orifícios em forma de bico conector, situados na parte superior, como mostra a fig.1. A cápsula em sua forma final apresenta as seguintes dimensões:

Diâmetro Superior : 8,0 cm

Diâmetro Inferior : 12,0 cm

Altura	:	15,0 cm
Volume Externo	:	1.025 mL
Volume útil	:	776 mL ³
Espessura das Paredes	:	0,5 cm.

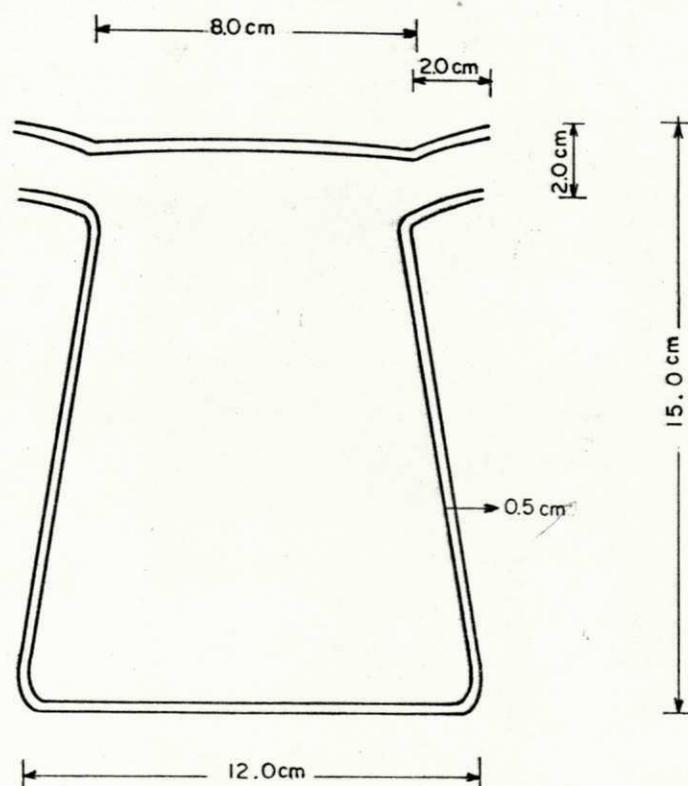


FIG. 1 - Cápsula porosa utilizada.

2.2 - Areia

Durante a realização dos ensaios foi utilizada areia fi na padrão, seca ao ar, cujas características foram determina das no Laboratório de Solos do CCT/UFPB e encontram-se na tabe

la 1.

As densidades aparente e real e as análises granulométricas foram determinadas segundo as normas do DNER-ME 93-64 e ME 80-64 respectivamente, enquanto que a razão de vazios máximo e mínimo seguiu a metodologia descrita por CAPUTO (1966). Os teores de umidade à capacidade de campo (cc) e ao ponto de murcha seguiram a metodologia descrita por RICHARDS (1954).

Para a determinação da altura capilar utilizou-se um tubo de PVC de diâmetro 5 cm e altura 83 cm, tendo uma secção transparente, e em sua extremidade inferior uma tampa plástica com furos. Inicialmente encheu-se o tubo com a amostra (areia ou solo), mantendo-se a densidade aparente, e em seguida o mesmo foi colocado na posição vertical imerso em um recipiente com água a nível constante. A ascensão capilar foi medida após 24 h vista na secção transparente.

Tabela 1 - Características da Areia Padrão

Densidade - (g/cm ³)	
- Aparente	1,36
- Real	2,76
Granulometria	
- Peneira nº (ASTM/ASA/USS)	16 - 30 - 40 - 50 - 100 - 200
- Diâmetro - mm	1,2 - 0,6 - 0,42 - 0,30 - 0,15 - 0,074
- Percentagem que passou	100 - 99,1 - 86,0 - 56,3 - 11,3 - 2,0
d ₁₀ - mm	0,115
Altura Capilar - cm	25,70
Porosidade - %	50,72
Razão de Vazios Máximo	0,890
Razão de Vazios Mínimo	0,730
Umidade - % (g/g)	
- Capacidade de campo - (cc)	7,09
- Ponto de Murcha - (pm)	3,01

2.3 - Solo

Também foi utilizado no decorrer dos ensaios um solo superficial (0 - 15 cm) de textura franco, seco ao ar, proveniente do perímetro irrigado de Sumé-Pb, cujas características físicas e químicas foram determinadas nos Laboratórios de Irrigação e Salinidade e no de Solos do CCT/UFPb, e encontram-se na tabela 2.

A classe textural foi identificada através de análise granulométrica, seguindo metodologia proposta por DAY (1965), enquanto que o d_{50} (mm) foi determinado pela análise granulométrica que seguiu as normas do DNER-ME 51-64. As densidades aparente e real foram determinadas seguindo-se a metodologia descrita pela EMBRAPA (1979), e os cátions trocáveis, a porosidade, os teores de umidade à capacidade de campo e ao ponto de murcha, o pH, e a condutividade elétrica (CE) foram determinadas de acordo com a metodologia proposta por RICHARDS (1954). A altura capilar foi determinada utilizando-se a metodologia descrita anteriormente para a areia.

2.4 - Sistema de Aquisição de Dados

Para identificação da frente úmida foi utilizado um sistema de aquisição de dados desenvolvido pela equipe do Laboratório de Instrumentação Eletrônica do CCT/UFPb, para uso no Laboratório de Recursos Hídricos, cujo diagrama de blocos está mostrado na figura 2.

Tabela 2 - Características Físicas e Químicas do Solo (0-15 cm) do Perímetro Irrigado de Sumé - Pb.

A - FÍSICAS	
Granulometria - %	
- Areia	46,3
- Limo	38,5
- Argila	15,2
- Classe Textural	Franco
Densidade - g/cm ³	
- Aparente	1,47
- Real	2,70
Granulometria	
- Peneira nº (ASTM/ASA/USS)	16 - 30 - 40 - 50 - 100 - 200
- Diâmetro - mm	1,2 - 0,6 - 0,42 - 0,30 - 0,15 - 0,074
- Percentagem que passou	98,3 - 92,6 - 89,7 - 80,0 - 56,5 - 45,73
d ₅₀ - mm	0,085
Altura Capilar - cm	34,82
Porosidade - %	45,55
Umidade - % (g/g)	
Capacidade Campo (cc)	18,61
Ponto de Murcha (pm)	5,60
B - QUÍMICAS	
Cátions Trocáveis	Meq/100 g
- Ca	6,98
- Mg	5,41
- Na	0,34
- K	0,29
Soma	13,02
Percentagem de Sódio Trocável	2,61
pH	7,30
Condutividade Elétrica do Extrato de Saturação (CE - mmhos/cm)	0,46
Relação de Adsorção do Sódio do Extrato de Saturação	0,51

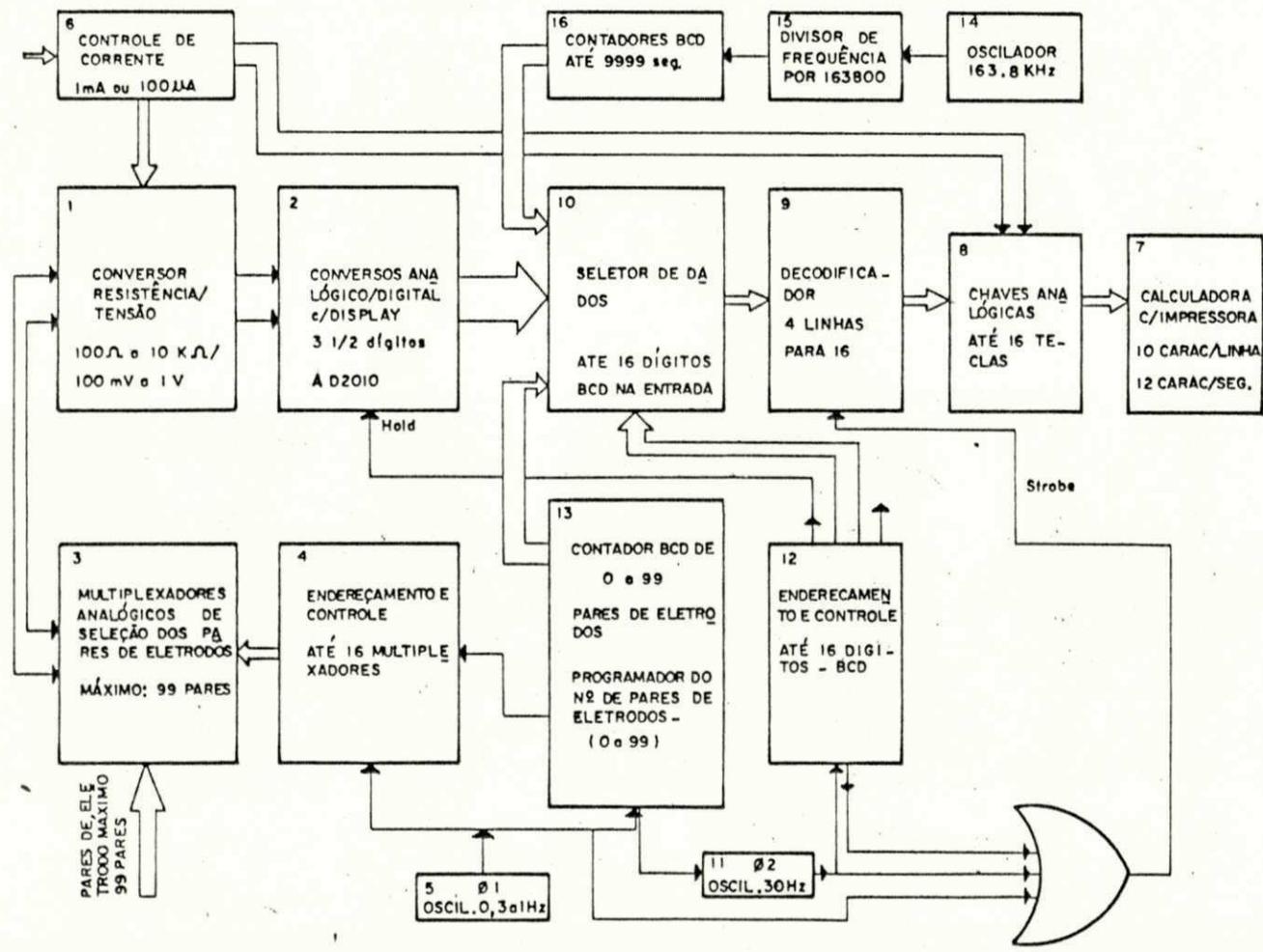


FIG. 2 - Diagrama em blocos do sistema de aquisição de dados utilizado.

FONTE: DEEP et alli (1981).

Neste sistema, o conversor de resistência para tensão (bloco 1) utiliza passagem de corrente alternada de onda quadrada através do meio de maneira que quanto menor o teor de umidade da amostra, maior resistência esta oferece à passagem de corrente elétrica e conseqüentemente menor será a condutividade (DEEP et alii, 1981). Quanto ao solo, uma maior salinidade acarretará uma maior condutividade. Este conversor amplifica e retifica a tensão sobre a amostra.

O conversor analógico-digital (bloco 2) empregado é o medidor de painel digital de 3,5 dígitos e a seleção automática dos pares dos eletrodos, como a ligação deles com os eletrodos, é feita através de multiplexadores analógicos (bloco 3) e outros blocos associados de controle e endereçamento (blocos 4 e 5). O Chaveamento automático da faixa do valor da resistência é feita por variação da corrente através da amostra e a informação da faixa é registrada pela mudança na cor da impressão (bloco 6). Para impressão dos resultados é utilizada uma calculadora comercial com impressora, e em paralelo com as teclas mecânicas da mesma, estão ligadas chaves eletrônicas. O comando para imprimir qualquer dígito é enviado por decodificador (bloco 9) para as chaves eletrônicas, e na entrada deste decodificador estão apresentados os algarismos em código, sequencialmente, por seletor de dados (bloco 10). Este controle é feito por oscilador (bloco 11) e outros circuitos de endereçamento e controle (bloco 12). O sistema fornece um registro permanente em fita de papel, com informações sobre a medida da resistência da amostra, número do par de eletrodos correspondente (bloco 13) e tempo decorrido (em segundos) desde o início

cio do experimento (blocos 14, 15 e 16).

O sistema possui a flexibilidade de programação do número de pares de eletrodos a ser pesquisado na experiência (bloco 13), até um número máximo de 99 pares, através de chaves. A velocidade máxima de impressão é em torno de duas linhas por segundo.

A corrente alternada do bloco flui pelo primeiro par de eletrodos, as conversões são efetuadas e o valor da resistência ôhmica (Ω), da massa do solo entre esse par de eletrodos, com sua marcação numérica e o tempo estão presentes às entradas do seletor de dados, contudo, não há impressão. Nesta ocasião, o número de pares de eletrodos deve ser programado. No instante em que o interruptor é liberado, contadores, osciladores e decodificadores são também liberados.

Os dados presente às entradas do seletor são transmitidos sequencialmente ao decodificador, que aciona chaves analógicas armazenando os resultados de medição e outros dados. Ao término da transferências de dados, o bloco 6 envia o comando de impressão ao bloco 9.

Os pares de eletrodos foram feitos de aço inox de 2 mm de diâmetro, e confeccionados no próprio Laboratório de Hidráulica, com diferentes comprimentos variáveis entre 5 e 20 cm, com a finalidade de cobrir os vários pontos pré-determinados, obtendo-se informações em espaço tri-dimensional. Assim os pares de eletrodos ficaram com diferentes afastamentos e foram introduzidos a profundidades variáveis de 5 a 35 cm da superfície da amostra (areia ou solo). Cada par é formado por dois eletrodos distantes de 1 cm um do outro.

3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram utilizados um solo de textura franco e areia fina padrão para desenvolvimento do trabalho em etapas como: Efeito da Sucção na Umidade; Efeito da Umidade na Difusibilidade; Propagação da Frente Úmida e Distribuição da Umidade ao Longo do Tempo.

3.1 - Sucção

A tensão capilar (sucção) para diferentes níveis de umidade foi determinada através da adaptação de um funil sinterizado tipo 17 G5M, fabricado em Mainz, Alemanha Ocidental, confeccionado em vidro especial aquecido, capaz de fornecer a porosidade de 8 - 14 μm , como mostra a figura 3. O funil possui um orifício na extremidade inferior, onde é conectada uma mangueira plástica, a qual possui um dispositivo que controla a água e serve para dar o abaixamento necessário do nível sem retirar a água contida no lado esquerdo do equipamento de sucção, não havendo portanto, entrada de ar através do dispositivo, pois qualquer formação de bolhas de ar no lado esquerdo, logo abaixo da placa porosa, causará a descontinuidade do fluxo podendo alterar os resultados.

Cuidadosamente, encheu-se o manômetro de água, virando-se o funil tendo o cuidado de evitar a formação de bolhas de ar, permitindo-se a saturação da amostra apenas sob contato com água. Em seguida foram aplicadas as sucções de 15,0; 23,4; 35,7; 41,2; 48,0; 64,5; 93,0; 125,0; 160,0 e 187,8 cm para a areia padrão, e 25,0; 45,5; 87,0; 124,0; 172,0 e

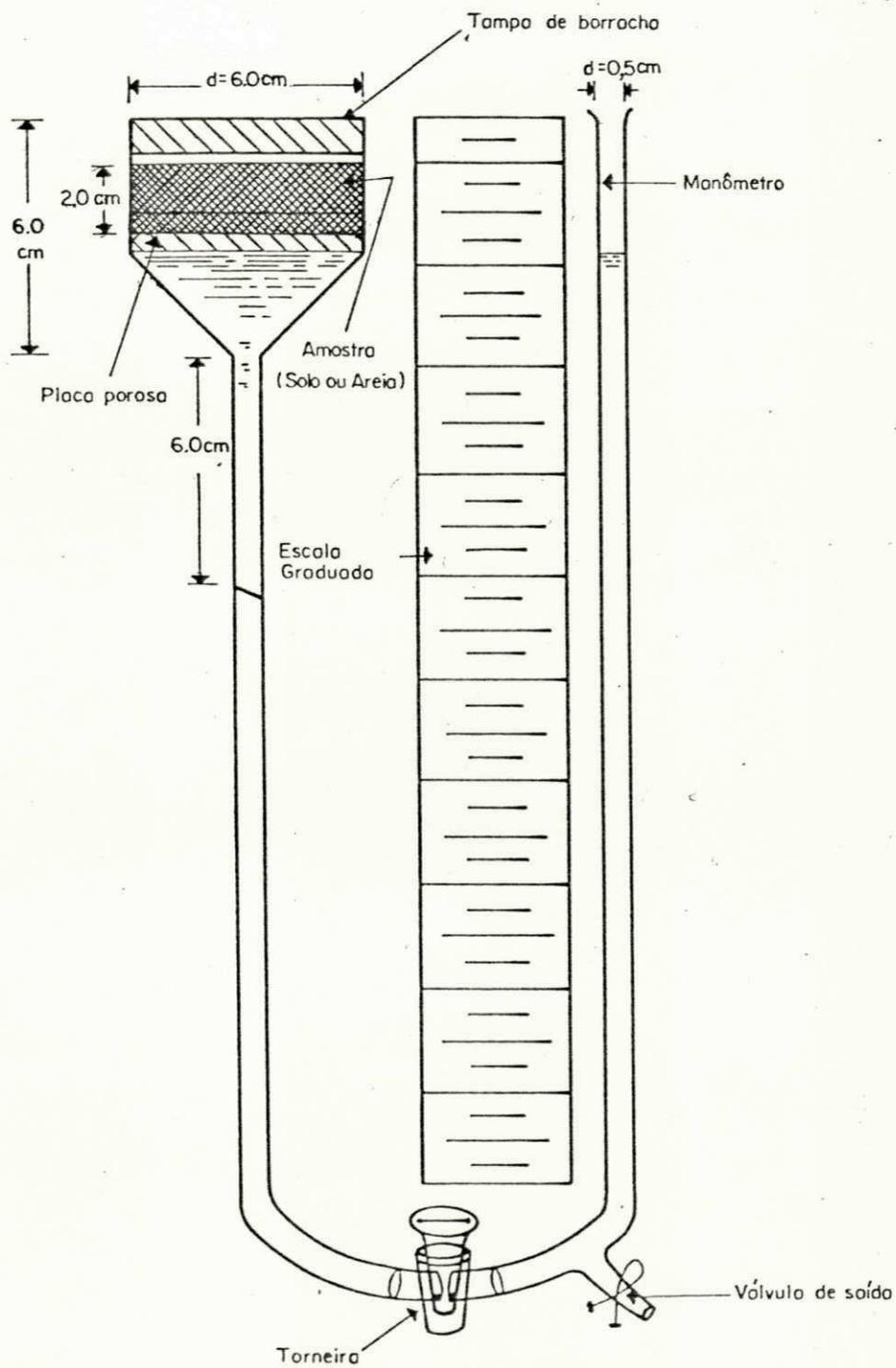


FIG.3 - Equipamento utilizado nos testes de sucção.

186,8 cm para o solo.

Cada teste teve seu final quando foi estabilizada a elevação da coluna de água existente na mangueira, sendo então medida essa elevação e, imediatamente foi retirada uma amostra existente na cápsula, sendo levada à estufa para que fosse determinada a percentagem de umidade. Tanto para a areia como para o solo, os testes foram realizados com 2 repetições.

A altura de sucção para cada caso, corresponde ao valor médio entre a sucção inicialmente aplicada e a elevação do nível da água até a estabilização.

Foram plôtados gráficos com as alturas de sucções e as respectivas percentagens de umidade, tanto para a areia como para o solo.

3.2 - Difusibilidade

Para a determinação da difusibilidade horizontal, foi utilizado um tubo de PVC de 3,5 cm de diâmetro e comprimento de 40,0 cm, mostrado na figura 4. Foram instalados 8 pares de eletrodos, no caso da areia, com 3,0 cm de comprimento, sendo o primeiro colocado a 2,5 cm do início e os outros espaçados de 5,0 cm entre si, na mesma linha, enquanto que para os testes com solo foram instalados apenas os primeiros 7 pares de eletrodos.

Para que fosse determinada a percentagem de umidade foram abertas janelas com a finalidade de retiradas de amostras.

O molhamento foi feito através de uma mangueira, com um tipo de chuveiro na sua extremidade e foi mantida uma condição

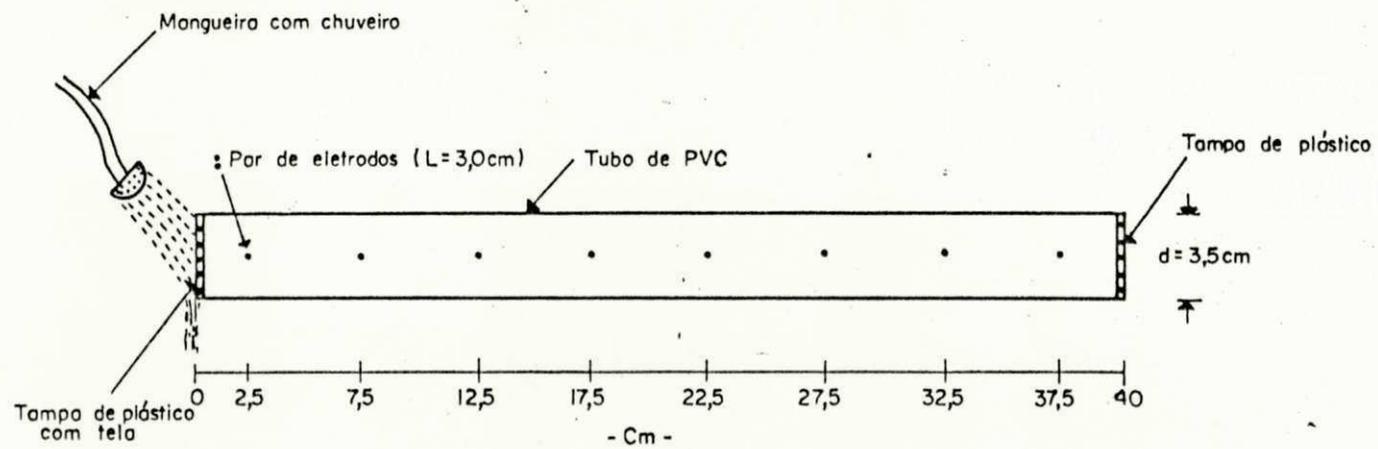


FIG. 4 - Modelo utilizado nos testes de difusibilidade.

saturada permanente, no início do tubo horizontal para os testes conduzidos. Durante este molhamento, a água caía no sentido vertical, sem pressão, tendo sido assegurado um contato suave com a parte inicial da amostra. A água entrava no início do tubo através de uma tampa plástica com furos e uma tela de arame que assegurava a amostra na posição. Da mesma forma foi colocada na outra extremidade do tubo, uma tampa semelhante, com a finalidade de permitir o escapamento de ar, não havendo portanto, o aprisionamento do mesmo.

Para a realização de cada teste, primeiro enchia-se o modelo com a amostra mantendo-se a densidade aparente e introduzindo-se em seguida os pares de eletrodos, em seus devidos lugares, os quais estavam conectados com o aparelho de aquisição de dados. Em seguida ligava-se a torneira, acionando-se também o aparelho eletrônico de aquisição de dados, e nesse momento começava o registro de dados com a marcação do tempo inicial. À medida que cada par de eletrodos acusava valor no sistema, era anotado o tempo decorrido. O final de cada ensaio deu-se quando a umidade atingia o último par de eletrodos e aí rapidamente as amostras foram retiradas de todas as janelas e conduzidas à estufa para determinação das percentagens de umidade. Tanto para a areia como para o solo, os testes foram realizados com 2 repetições para se ter confiança nos resultados.

Foram obtidas curvas na areia e no solo a partir da relação entre as percentagens de umidade determinadas - $(g/g\%)$ e as distâncias dos pares de eletrodos (cm). Os valores de difusibilidade foram determinados em função de teores de umidade con

siderados pela integração dessas curvas, conforme equação 6.

3.3 - Propagação da Frente Úmida

Para o estudo da propagação da frente úmida, foi utilizado um sistema de aquisição de dados no qual foram conectados os pares de eletrodos saindo de um modelo reduzido, ligado a um reservatório de abastecimento de aproximadamente 25 ℓ (figura 5). Este modelo reduzido consiste de um depósito cilíndrico de PVC com as seguintes dimensões:

Diâmetro interno : 39,0 cm

Altura : 52,5 cm

Profundidade útil : 43,5 cm

Volume : 50,0 ℓ

Diâmetro externo : 40,0 cm

Durante o decorrer dos ensaios a cápsula foi mantida em condições de saturação, submersa em um tanque, a fim de que não ocorresse diminuição na liberação de água com o tempo. Antes de cada ensaio foi determinada a vazão da cápsula porosa sob a mesma pressão hidrostática do estudo. As pressões hidrostáticas aplicadas no caso da areia foram: -25 cm (sucção), +50, +75 e +100 cm, enquanto que no solo foram -25 cm (sucção) e +75cm. Também foi coletada antes de cada ensaio uma amostra representativa de solo ou areia para determinação da percentagem de umidade.

Em seguida, encheu-se o depósito cilíndrico com a amostra até uma altura de 20 cm da borda, mantendo-se a densidade aparente através de compactações adequadas. A cápsula porosa,

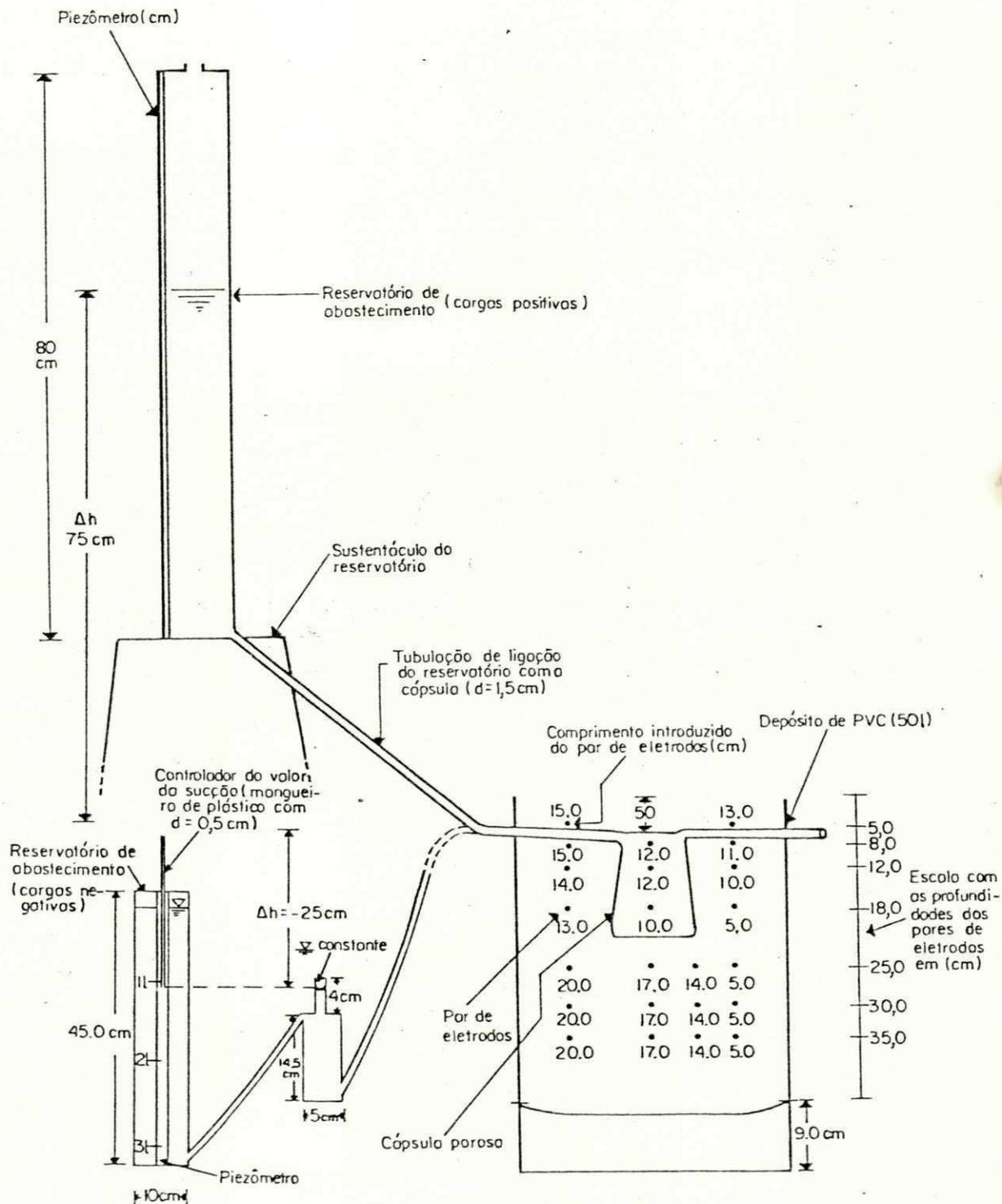


FIG. 5 - Modelo reduzido, e reservatórios de abastecimento, utilizados na propagação da frente úmida na areia e no solo.

cheia com água, foi ligada ao reservatório de abastecimento através de uma mangueira plástica ($d = 1,5$ cm) sendo, em seguida, retiradas as bolhas de ar existentes e mantida a carga constante.

Em seguida, a cápsula foi instalada e instantaneamente o sistema de aquisição de dados foi ligado, marcando-se então o tempo inicial. Imediatamente continuou-se o enchimento total do modelo com a amostra. Em seguida todos os dados registrados pelo aparelho bem como o tempo gasto para tais registros foram anotados. Cada ensaio teve seu término 2 horas após o sistema ter acusado um dos eletrodos de maior profundidade (35 cm).

Com o objetivo de manter a carga (pressão hidrostática) constante foram feitas reposições de volumes de água. Para pressões positivas, estas reposições foram de 250 ml (equivalente à queda de 1 cm no nível do piezômetro) enquanto no caso da sucção o volume repostado foi a cada 1.000 ml. Através destes volumes repostos para manter a carga constante e dos tempos gastos para tais reposições, obteve-se a liberação da água em função do tempo, parâmetro que será estudado com mais detalhe no capítulo IV.

Ao final de cada ensaio a amostra utilizada foi retirada e posta para secar e foi determinada a vazão da cápsula porosa, após a lavagem, sob a pressão hidrostática correspondente.

O sistema de aquisição de dados forneceu informações sobre a acusação de cada par de eletrodos e foram plotados gráficos com a profundidade desses eletrodos versus afastamento lateral. Mediante inter e extrapolações foram obtidas curvas para

tempos padronizados com diferentes intervalos para cada caso específico. Os tempos padrões para a areia e o solo nas pressões hidrostáticas estudadas serão mencionados no capítulo IV.

A partir das curvas realizadas foram estudados, na areia e no solo, os seguintes parâmetros: Volumes Molhados, Espalhamentos Máximos Radiais e Infiltrações Verticais, os quais serão descritos com melhores detalhes no capítulo IV.

3.4 - Distribuição da Umidade com o Tempo

Para determinação da distribuição da umidade com o decorrer do tempo, foi empregada a mesma metodologia utilizada para a propagação da frente úmida e o mesmo reservatório de abastecimento e modelo reduzido.

As pressões hidrostáticas aplicadas na areia e no solo foram +75 e -25 cm (sucção) respectivamente. No caso da areia foram realizados dois ensaios, a 15.000 e 22.000 segundos, enquanto que no solo os dois ensaios foram realizados a 100.000 e 123.000 segundos respectivamente.

Após o final de cada ensaio, marcado pelo desligamento da cápsula porosa, determinou-se empiricamente a formação do bulbo molhado nos tempos considerados. Inicialmente observou-se a que profundidade da superfície registrava-se a primeira parte molhada da amostra, anotando-se o diâmetro desta área e das demais, molhadas a cada 5 cm de profundidade até a última área considerada úmida.

Para a determinação dos teores de umidade foram coletadas amostras a diferentes distâncias do centro da cápsula, nas profundidades consideradas, e depois conduzidas à estufa. Foram plotadas curvas em função destes teores, e interpoladas, quando necessário, para os teores de umidades padrões. No caso da areia estes teores foram: 0, 5 e 10 %, enquanto no solo foram

0, 5, 10, 15 e 20 %.

Determinadas faixas de teores de umidade, como 0 - 5 ; 5 - 10 e maior que 10 % para a areia, e 0 - 5; 5 - 10; 10 - 15; 15 - 20 e maior que 20 % no caso do solo, foram consideradas para efeito de comparação entre os dois casos estudados.

A partir de perfis realizados para cada percentagem de teor de umidade, foram calculados os valores dos seguintes parâmetros: percentagem dos volumes ocupados pelas faixas de umidade na areia e no solo; espalhamentos máximos radiais destas faixas; e infiltrações verticais das faixas de umidade da amostra, os quais serão descritos com maiores detalhes no capítulo IV.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidas as etapas desenvolvidas na areia e no solo durante o decorrer do trabalho, tais como : Efeito da Sucção na Umidade; Efeito da Umidade na Difusibilidade; Propagação da Frente Úmida e Distribuição da Umidade ao Longo do Tempo.

1 - EFEITO DA SUCÇÃO NA UMIDADE

Na figura 6, estão apresentados os valores de sucção obtidos para diferentes teores de umidade na areia e no solo.

1.1 - Areia

Inicialmente, a sucção aplicada para a areia saturada (34 % g/g) é evidentemente zero. A partir daí, a sucção foi aumentada com a finalidade de se retirar quantidades de umidade.

Observa-se na figura 6 que com a aplicação de sucção até 15 cm, quase nenhuma quantidade de água foi retirada da areia. Com a aplicação de 18 cm de sucção, houve uma pequena retirada de água e entre 20 e 42 cm de sucção, foi rápida a extração da umidade, e isto pode-se atribuir à ação da gravidade, especialmente no caso de matrizes mais grossas. A partir daí, a retirada de água não foi tão fácil, observando-se que para teores menores que 18 % de umidade as variações de sucção

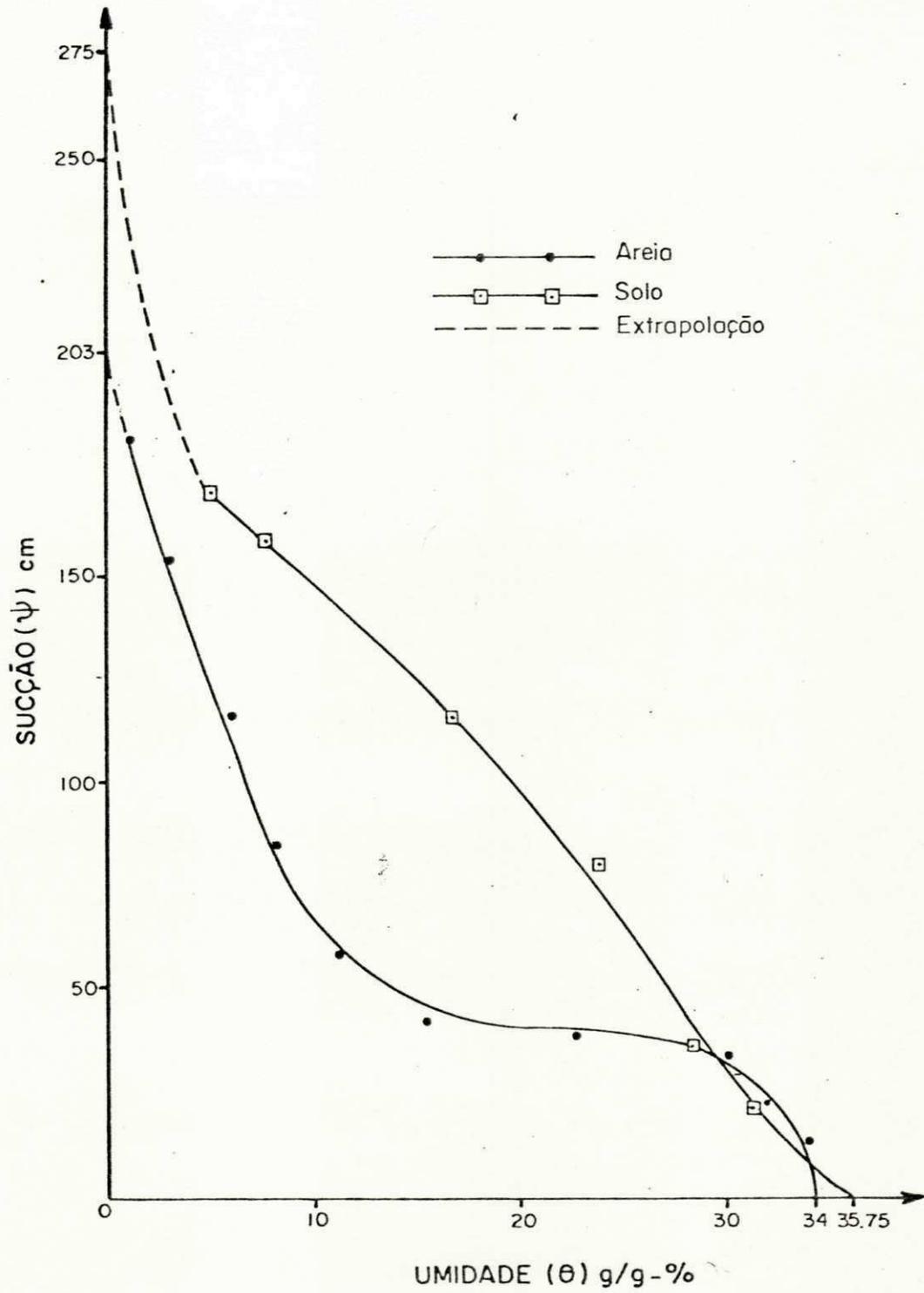


FIG. 6 - Efeito da sucção na umidade, na areia e no solo.

foram muito acentuadas, havendo então, a necessidade de se aplicar maiores sucções para retirar os mesmos teores de umidade. Isto se deve ao fato de que à menores teores de umidade, a amostra retém água com maior firmeza, com a tensão dos filmes de água aumentando cada vez mais (SARMA et alii, 1965). Segundo GAVANDE (1979) quando o componente de gravidade for menor que o de sucção, a água pode mover-se verticalmente para cima e para baixo, e permanecer sem movimento quando o gradiente de sucção se equilibra com a força da gravidade.

1.2 - Solo

Da mesma forma que na areia, a sucção foi aplicada inicialmente para o solo saturado (35,75 % g/g) onde seu valor foi evidentemente zero. A partir daí, tornou-se necessária a aplicação de uma sucção cada vez maior para a retirada de umidade.

Observa-se na figura 6 que para uma aplicação de 5 cm de sucção, já houve uma certa retirada de água, e com o aumento das sucções aplicadas foram mais rápidas até a sucção de 170,5 cm. A partir daí a retirada de umidade foi dificultada.

Devido à presença de argila no solo não foi possível obter-se experimentalmente os valores dos teores de umidade nas proximidades de zero. Para tais estimações, utilizou-se a fórmula de tensão superficial, como mostrado a seguir:

$$h_c = \frac{2T}{r\gamma} \quad \dots(7)$$

h_c - altura capilar, em cm

T - tensão superficial, em g/cm

r - raio do poro, em cm

γ - densidade de água, em g/cm³

Sendo T e γ constantes, tem-se que:

$$h_c(s) \cdot r_s = h_c(a) \cdot r_a \quad \dots(8)$$

ou:

$$d_{50}(s) \cdot h_c(s) = d_{50}(a) \cdot h_c(a) \quad \dots(9)$$

onde:

$h_c(s)$ e $h_c(a)$ = alturas capilares do solo e da areia respectivamente, em cm;

r_s e $d_{50}(s)$ e r_a e $d_{50}(a)$ = raios e diâmetros das partículas do solo e da areia respectivamente. O valor de d_{50} indica que o material tem 50% em peso de partículas menores que esse diâmetro.

Os trabalhos realizados por HENDERSON (1966) evidenciam que o d_{10} diâmetro representativo em mm de ALLEN HAZEN (1893) é válido para amostras com partículas mais uniformes e que a escolha do diâmetro da partícula de uma amostra (d_{10} , d_{50} , d_{75} , d_{90} e outros) depende das várias aplicações que a mesma poderá ter, tais como: fenômenos de transporte de sedimentos nos rios, construção de rodovias, filtração de esgotos no saneamento público, engenharia química, para fins agrícolas, e outros. Para o solo não uniforme utilizado neste estudo, o d_{50} parece ter sido o mais adequado, enquanto que para a areia foi o d_{10} conforme a análise a seguir:

$$\frac{h_c(s)}{h_c(a)} = \frac{d_{10}(a)}{d_{50}(s)} \quad \text{Logo:}$$

$$\frac{h_c(s)}{h_c(a)} = \frac{34,82 \text{ cm}}{25,70 \text{ cm}} = 1,3568 \quad ; \quad e$$

$$\frac{d_{10}(a)}{d_{50}(s)} = \frac{0,0115 \text{ cm}}{0,0085 \text{ cm}} = 1,3529$$

Uma vez que a verificação feita acima mostra a validade da aplicação da lei entre os limites de erro permitidos, pode-se estender a mesma lei entre h_c e sucção (Ψ) a 0 % de umidade.

Como já se sabe existem muitas forças agindo na água do solo (KIRKHAM, 1972). As pressões e tensões (sucções) são causadas devido às curvaturas dos filmes d'água. As várias forças que agem na água do solo podem armazenar energia potencial no sistema solo-água. Esta energia assim armazenada, expressa em g.m/s, será igual à taxa de trabalho realizado, se o sistema solo-água for um sistema conservador mecânico. Um sistema de conservação mecânica é aquele onde o trabalho realizado é conservado, não desaparecendo devido às forças de atrito. Um sistema solo-água não é um sistema conservador, uma vez que o solo se comporta diferentemente durante o ciclo de histerese. Apesar deste sistema não ser conservador, uma série de potenciais é definida por eles. CHILDS e COLLIS-GEORGE (1948) consideram quatro tipos de potenciais: a) potencial gravitacional ; b) potencial de pressão hidrostática; c) potencial osmótico e

d) potencial de adesão. CHILDS e COLLIS-GEORGE, juntaram b), c) e d) e chamaram potencial capilar, um termo idealizado inicialmente por BUCKINGHAM (1907). Mais recentemente o potencial de capilaridade foi chamado de potencial mátrico.

O símbolo geralmente utilizado para o potencial de capilaridade é Ψ que pode ser definido como o trabalho ou energia requerida para extrair uma unidade de massa (1 g ou 1 mg) da água do solo não saturado. A medida em que tal definição inclui o gasto da energia necessária para superar as forças de sucção, o potencial de capilaridade é negativo. Para ser mais específico na definição de Ψ , pode-se dizer que é o trabalho necessário para extrair uma grama de água do solo abaixo da superfície freática de certo local A para outro local B, desprezando-se os efeitos do campo gravitacional. Assim, o potencial negativo de tensão capilar é diretamente proporcional à altura capilar:

$$\frac{h_c(s)}{\Psi_s} = \frac{h_c(a)}{\Psi_a} = \text{constante} \quad \dots(10)$$

ou:

$$\frac{h_c(s)}{h_c(a)} = \frac{\Psi_s}{\Psi_a}$$

onde:

Ψ_s , Ψ_a = sucção no solo e na areia respectivamente.

Como o valor extrapolado da sucção na areia a 0 % de

umidade foi 203 cm, tem-se que:

$$\Psi_s \text{ (a 0 \% de umidade)} = \frac{203 \text{ cm} \cdot 34,82 \text{ cm}}{25,7 \text{ cm}} \cong 275 \text{ cm}$$

Assim, o valor de sucção no solo para 0 % de umidade será aproximadamente 275 cm.

1.3 - Comparação entre a Areia e o Solo

A tabela 3 apresenta os valores dos teores de umidade obtidos para as sucções aplicadas na areia e no solo.

A figura 6 mostra que na faixa de 0 a 30 % de umidade os valores de sucção no solo são elevados em relação à areia.

O fato da sucção ser maior nos solos argilosos se deve a que, quando o conteúdo de água diminui, esvaziam-se primeiro os poros grandes, e a água é retida firmemente nos poros pequenos (BAVER, 1972). Segundo HILLEL (1971), a curva característica da umidade no solo é sensivelmente afetada pela textura do mesmo. Quanto maior o teor de argila, tanto maior será, em geral, o conteúdo de água sob dada sucção e tanto mais suave será a inclinação da curva.

Observa-se ainda na figura 6, que de 0 a 40 cm de sucção, a variação da umidade entre o solo e a areia é pequena. Entretanto, com uma sucção de 50 cm, a percentagem de umidade na areia decresceu para 13,90 % enquanto que no solo o valor correspondente de umidade permaneceu ainda alto, em torno de 27%. Verifica-se, portanto, que o solo apresenta maior retenção de água que a areia, pois de acordo com GAVANDE (1979), a classe e a quantidade das partículas finas influem na retenção de

água, de modo que os solos finos retêm mais água que os arenosos.

Tabela 3 - Valores de Sucção e Percentagens de Umidade na Areia e no Solo

A - AREIA	
Umidade θ g/g (%)	Sucção ψ (- cm)
1.21	181.0
3.05	153.5
6.00	116.0
7.97	84.5
11.05	58.0
15.26	43.0
22.60	38.0
29.55	33.5
31.25	22.0
33.80	13.5
B - SOLO	
4.60	170.50
7.48	159.00
16.70	116.00
23.60	82.00
28.32	42.75
31.42	21.60

2 - EFEITO DA UMIDADE SOBRE A DIFUSIBILIDADE

A difusibilidade (D) pode ser expressa em cm^2/s , m^2/s e m^2/dia , ou seja, em unidade de comprimento ao quadrado por unidades de tempo (L^2/T), enquanto que a condutividade hidráulica (K) é expressa em L/T , e o gradiente de sucção versus umidade ($\partial\Psi/\partial\theta$) em L.

Assim, a difusibilidade significa a razão entre a área de espalhamento numa dada secção e o tempo. Este valor difere de solo para solo e de areia para areia. As amostras com texturas grossas apresentam altas taxas de difusibilidade, como é o caso de areias grossas, médias e finas, enquanto que as amostras com partículas finas, possuem baixos valores de difusibilidade, como é o caso de siltes e argilas.

O valor da difusibilidade depende de K e de $\partial\Psi/\partial\theta$. É interessante notar que quando a amostra está completamente saturada, o valor de D é mínimo ou quase desprezível. Isto ocorre devido a que, quando o meio está saturado, o valor de $\partial\Psi/\partial\theta$ tende a ser zero, enquanto que K assume valores máximos.

Entretanto, as curvas de difusibilidade versus umidade mostram valores máximos de D, para altos valores de θ . Isto significa que a difusibilidade é máxima quando uma secção da amostra é mantida ao nível de saturação e o restante é seco. Neste caso a água tende a avançar rapidamente do ponto saturado para o seco. Esta tendência diminui com o decorrer do tempo, com D assumindo menores valores devido a saturação progressiva de toda a secção da amostra. Neste caso D é zero, uma vez que ambos os lados estão com os mesmos teores de umidade.

2.1 - Areia

A figura 7a mostra a relação entre as distâncias horizontais (cm) e as correspondentes percentagens de umidade determinadas (g/g, %) para o tempo de 875 segundos, quando foi atingido o último par de eletrodos (8).

Observa-se que a curva desta relação apresenta um ponto de inflexão a 18,94 cm de distância e 12,89 % de umidade.

A figura 8 mostra a relação entre D (cm^2/s) e percentagem de umidades consideradas (g/g), sendo estas variáveis de 5 a 34 %. Observa-se que esta curva apresenta uma grande variação de forma exponencial, de modo que elevados teores de umidade correspondem a altos valores de D , pois de acordo com o que já foi explicado anteriormente, a difusibilidade é máxima quando uma secção da amostra está saturada e o restante seca. Aí a água tende a avançar rapidamente do lado de saturação para o lado seco.

Observa-se que a difusibilidade é uma função do conteúdo de umidade e que em ambos os casos estudados, a difusibilidade aumentou com o conteúdo de umidade.

A tabela 4 mostra que quando a umidade reduz-se de 34 para 15 %, a difusibilidade diminui de 2,69 para $0,35 \text{ cm}^2/\text{s}$ e reduzindo-se ainda mais para $0,0112 \text{ cm}^2/\text{s}$ quando a umidade diminui para 5 %. Verifica-se então, que enquanto a umidade diminui respectivamente 2,27 e 6,8 vezes, a difusibilidade diminui 7,69 e 240 vezes à umidade de 34 %, mostrando assim grandes variações.

A tabela 4 mostra também os valores dos gradientes de

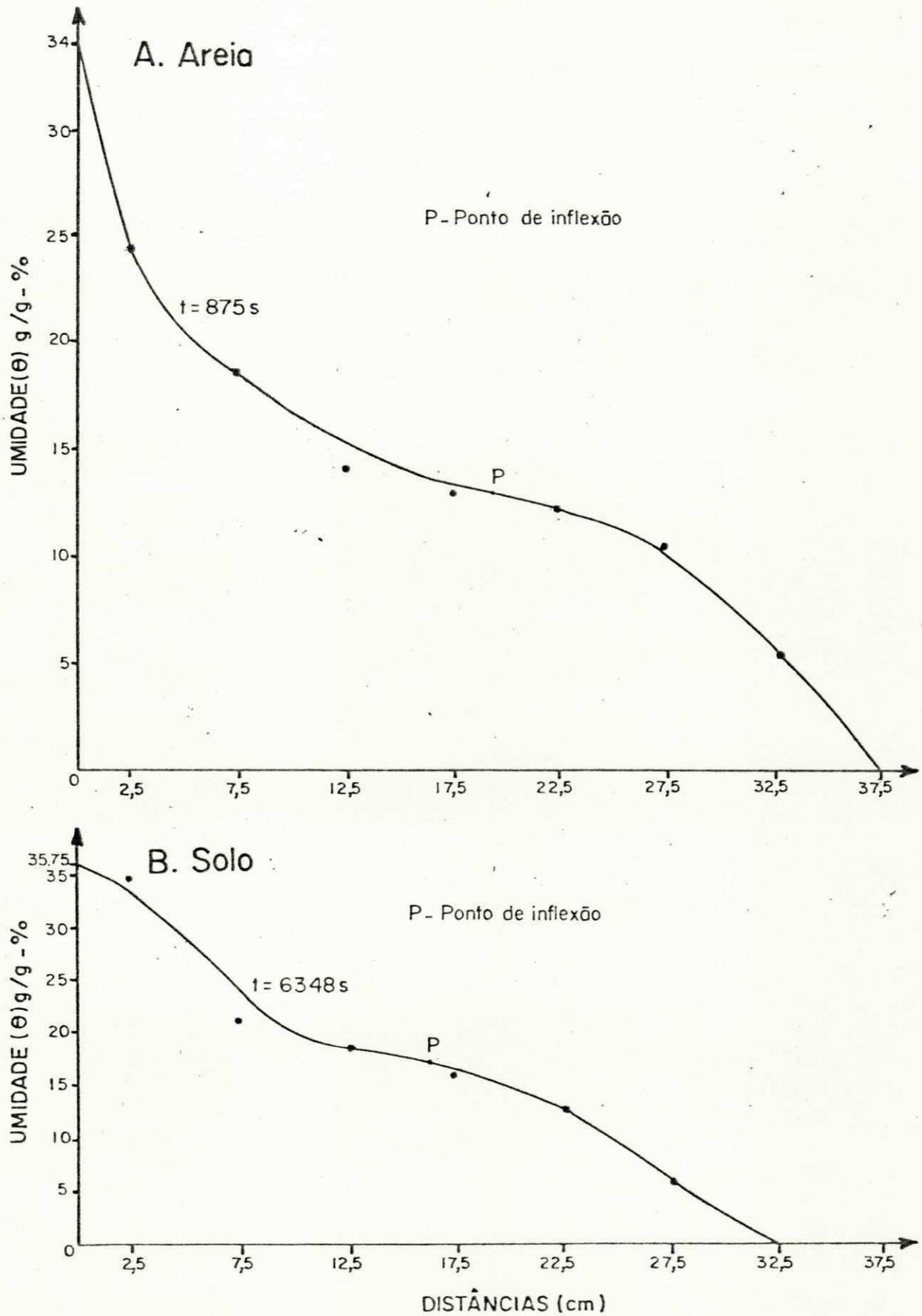


FIG. 7 - Relação entre distâncias horizontais e percentagens de umidade na areia e no solo.

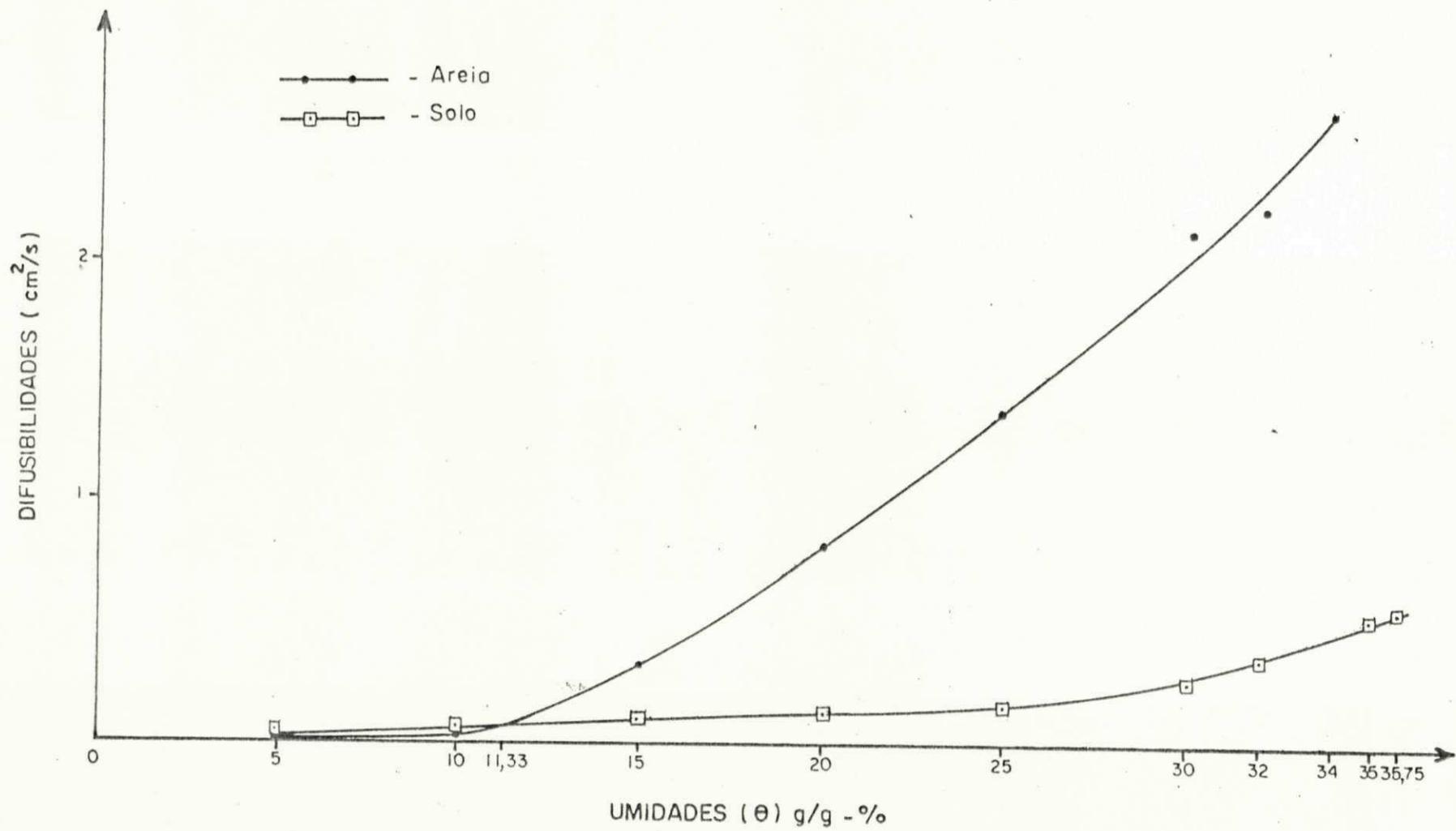


FIG. 8 - Curvas de difusibilidade na areia e no solo.

Tabela 4 - Valores de Percentagens de Umidade, Difusibilidade, Gradiente de Sucção e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo

A - AREIA					B - SOLO			
Umidade (θ) g/g	Umidade (θ) Vol/Vol	Difusibilidade (D) cm^2/s	Gradiente de sucção $\partial\psi/\partial\theta$ cm	Condutividade Hidráulica K cm/s	Umidade (θ) Vol/Vol	Difusibilidade (D) cm^2/s	Gradiente de sucção $\partial\psi/\partial\theta$ cm	Condutividade Hidráulica K cm/s
5,00	15,45	0,0112	2,925	$3,83 \times 10^{-6}$	16,08	0,0208	933,74	$2,23 \times 10^{-5}$
10,00	30,90	0,0600	594	$1,01 \times 10^{-4}$	32,15	0,0608	933,33	$6,51 \times 10^{-5}$
11,33	35,01	0,0820	625	$1,31 \times 10^{-4}$	36,43	0,0820	933,00	$8,79 \times 10^{-5}$
15,00	46,35	0,3500	440	$7,95 \times 10^{-4}$	48,23	0,1220	933,43	$1,30 \times 10^{-4}$
20,00	61,80	0,8350	62,5	$1,33 \times 10^{-2}$	64,30	0,1370	902,80	$1,51 \times 10^{-4}$
25,00	77,25	1,4200	133,3	$1,06 \times 10^{-2}$	80,38	0,1450	833,24	$1,75 \times 10^{-4}$
30,00	92,71	2,1500	425	$5,06 \times 10^{-3}$	96,46	0,2665	1158,69	$2,30 \times 10^{-4}$
32,00	98,90	2,2500	243	$9,25 \times 10^{-3}$	97,18	0,3785	1143,75	$3,30 \times 10^{-4}$
34,00	100,00	2,6900	150	$1,79 \times 10^{-2}$	-	-	-	-
35,00	-	-	-	-	97,90	0,5490	940,20	$5,83 \times 10^{-4}$
35,75	-	-	-	-	100,00	0,5750	1090,78	$5,27 \times 10^{-4}$

sucção ($\partial\Psi/\partial\theta$) na areia obtidos mediante a curva da relação entre sucção e umidade (figura 6). A tabela mostra ainda os valores da condutividade hidráulica (K) obtidos a partir da equação 5, os quais também variam muito. Observa-se que quando a umidade passa de 34 para 15 e 34 para 5%, a condutividade diminui de 22,51 e 4673 vezes respectivamente, enquanto que quando a umidade passa de 34 para 10 %, o decréscimo da condutividade hidráulica é de apenas 177,2 vezes e isto ocorre devido a que quando a areia está saturada, todos os poros estão cheios e conduzindo a água de maneira que a condutividade é máxima.

2.2 - Solo

A figura 7b mostra a relação entre as distâncias horizontais e as respectivas percentagens de umidade determinadas (g/g), para o tempo de 6.348 segundos, quando foi alcançado o último par de eletrodos (7). O ponto de inflexão da curva desta relação ocorre a 16,31 cm de distância e 17,50 % de umidade.

A figura 8 mostra também a relação entre as difusibilidades (cm^2/s) e os teores de umidade considerados (g/g) que variam de 5 a 35,75 %. Observa-se que esta relação apresenta grande variação sendo, porém, bem menos acentuada do que a ocorrida na areia. Assim como na areia, os maiores valores de difusibilidade no solo foram registrados em maiores valores de umidade, devido às mesmas causas anteriormente citadas. Verifica-se na tabela 4 que quando a umidade passa de 35,75 para 15 e 5 %, a difusibilidade diminui de 4,7 e 27,6 vezes respectivamente.

A tabela 4 mostra os valores da condutividade hidráulica

ca e dos gradientes de sucção no solo, onde observa-se que quando a umidade passa de 35,75 para 15, 10 e 5 %, a condutividade diminui 4,05; 8,09 e 23,63 vezes respectivamente, sendo estas variações causadas pelos mesmos fatores que explicam as ocorridas na areia.

2.3 - Comparação da Difusibilidade e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo

Comparando-se as variações da difusibilidade e condutividade hidráulica na areia e no solo, verifica-se que estas foram mais acentuadas na areia do que no solo. Isto ocorre devido a que quando o conteúdo de água diminui, se esvaziam primeiro os poros grandes, e a água é fortemente retida nos poros pequenos. Como já foi explicado anteriormente, os maiores valores de D são registrados a altos teores de umidade.

A figura 8 mostra que as curvas de difusibilidade na areia e no solo cruzam-se a 11,33 % de umidade. Observa-se que os valores de difusibilidade na areia são maiores do que no solo para teores de umidade maiores que 11,33 %, enquanto que para teores de umidade menores que esse valor, as difusibilidades são menores na areia. Esta observação está de acordo com HILLEL (1971) quando afirma que no ponto de saturação os solos que têm capacidade de conduzir mais facilmente a água são aqueles em que a maior parte do volume de poros é constituído por poros grandes e contínuos, ao passo que os de menor condutividade são os solos nos quais numerosos microporos constituem a quase totalidade do volume de poros.

Observa-se na tabela 4 que nos teores de umidade de 10 a 32 % a condutividade hidráulica é maior na areia do que no solo, pois a condutividade é obtida pelo produto entre a difusibilidade e o inverso do gradiente de sucção ($\partial\theta/\partial\Psi$).

O brusco aumento do gradiente ($\partial\Psi/\partial\theta$) para 2.925 cm/g/g na areia faz com que a condutividade passe a ser maior no solo no teor de 5 % de umidade.

2.4 - Estabelecimento das Equações Adequadas para a Difusibilidade e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo, em Função do Teor de umidade

Como foi dito no capítulo II a Lei de Darcy modificada para meio não saturado muda de:

$$V = \nabla(K \nabla \phi)$$

para:

$$V = \nabla [K \nabla (\psi - gz)]$$

onde K para meio não saturado é uma função do teor de umidade, ϕ é a soma dos potenciais de capilaridade e de gravidade, com os correspondentes sinais.

Pelo fato dos poros não estarem completamente ocupados com água e o ar efetivamente preso não permitir fluxo através do meio, a equação da continuidade pode ser expressa:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_S \theta) = - \nabla \cdot M \quad \dots (11)$$

onde ρ_S é a massa específica bruta do material relativa a amostra seca (g/cm^3) e θ umidade com base no peso (g/cm^3) e $M = \rho V$ é a massa de fluido escoando através da secção unitária, onde ρ é a massa específica da água e V é o volume do fluxo.

Das equações 10 e 11 a equação que governa a distribuição da umidade é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_S \theta) = \{ \nabla \cdot [\rho K (\theta) (\nabla (\psi - gz))] \} \quad \dots(12)$$

que pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [D(\theta) \nabla \theta] - \frac{\rho}{\rho_S} g \frac{\partial K}{\partial z} \quad \dots(13)$$

onde:

$$D(\theta) = \frac{\rho}{\rho_S} K (\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \dots(14)$$

onde K é comprimento/tempo.

A difusibilidade, como já foi dito, é uma medida de distribuição da umidade no meio poroso, e pode ser expressa como a dispersão da umidade com o tempo e no espaço bi-dimensional, seja na direção horizontal quando a gravidade não tem influência, seja na direção vertical para baixo e para cima, e nestes casos a gravidade diminuirá ou aumentará o efeito da difusibilidade.

Os valores médios para a difusibilidade foram obtidos a partir da figura 8 e os valores da condutividade hidráulica através da tabela 4, os quais estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Valores Médios da Difusibilidade e Condutividade Hidráulica na Areia e no Solo

A - AREIA	
Difusibilidade Média (cm^2/s)	Condutividade Hidráulica média (cm/s)
0,60588	$2,205 \times 10^{-3}$
B - SOLO	
0,13956	$1,282 \times 10^{-4}$

Entretanto, esses valores perdem seu significado, uma vez que a difusibilidade varia muito (de $0,0112$ até $2,69 \text{ cm}^2/\text{s}$ e de $0,0208$ até $0,575 \text{ cm}^2/\text{s}$ para areia e solo respectivamente, mostrados na tabela 4). A variação dos valores da condutividade é ainda mais acentuada, sendo de $3,83 \times 10^{-6}$ até $1,79 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$ e de $2,23 \times 10^{-5}$ até $5,83 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$ na areia e no solo respectivamente (tabela 4).

No uso da equação diferencial parcial do fluxo uni-dimensional (equação 13) para os casos da infiltração vertical e de drenagem, observa-se que ambos os parâmetros (D e K) são funções únicas do teor de umidade e, assim, os valores médios não servem para a resolução da umidade (θ) em função do tempo (t) e da distância (z).

A forma geral usada pelos pesquisadores WIND (1955) , GARDNER (1958) e RIJTEMA (1965) para a difusibilidade e condutividade hidráulica é do tipo $D = c.e^{-d\theta}$ e $K = a.\theta^b$ respectivamente, onde a, b, c, e d são constantes, enquanto que no presente estudo as equações obtidas para a areia e o solo foram:

Areia:

$$D(\theta) = e^{11,56 + 0,509.\theta - 0,0082.\theta^2} \quad \dots(15)$$

$$K(\theta) = 10^{-0,535 + 4,6(\log\theta) - 0,125(\log\theta)^2} \quad \dots(16)$$

Solo:

$$D(\theta) = e^{13,38 + 0,245.\theta - 3,385.10^{-3}.\theta^2} \quad \dots(17)$$

$$K(\theta) = 10^{2,304 + 1,5(\log\theta) + 0,34 (\log\theta)^2} \quad \dots(18)$$

A necessidade de introduzir uma função logarítmica, na equação exponencial para condutividade hidráulica é devido às grandes variações da condutividade com o teor de umidade.

Através das funções $D(\theta)$ e $K(\theta)$ podem ser feitas tentativas para a solução da equação 13, dependendo das condições do problema em estudo, seja de infiltração ou drenagem.

3 - PROPAGAÇÃO DA FRENTE ÚMIDA

Neste ítem, serão discutidos os parâmetros que foram observados nesta etapa do trabalho, na areia e no solo, para as pressões hidrostáticas estudadas e tempos tomados como padrões. Estes parâmetros são: Liberação da Água pela Cápsula Porosa; Volume Molhado; Espalhamento Máximo Radial e Infiltração Vertical.

No caso da areia, com cargas positivas, foram considerados como padrões os tempos de 6 a 22 mil segundos, com intervalos de 2.000 segundos, enquanto que para a pressão hidrostática negativa de -25 cm, estes tempos considerados foram de 120 a 200 mil segundos com intervalos de 20.000 segundos.

Para o solo, à pressão hidrostática de +75 cm, os tempos padrões foram de 4 a 36 mil segundos, com intervalos de 4.000 segundos, enquanto que para a carga negativa de -25 cm, os tempos considerados foram: 10.000 segundos e de 20 a 160 mil segundos com intervalos de 20.000 segundos.

3.1 - Liberação de Água pela Cápsula Porosa

Como dito anteriormente, foram construídos gráficos de liberação de água (ml) em função do tempo, s, (figura 9), para a areia e para o solo nas cargas estudadas, através dos volumes de água repostos (250 ml) para manter a carga constante, e dos tempos gastos para tais reposições. A partir de interpolações foram determinados os volumes liberados (ml) nos tempos padronizados (s) na areia e no solo, para as diferentes pres

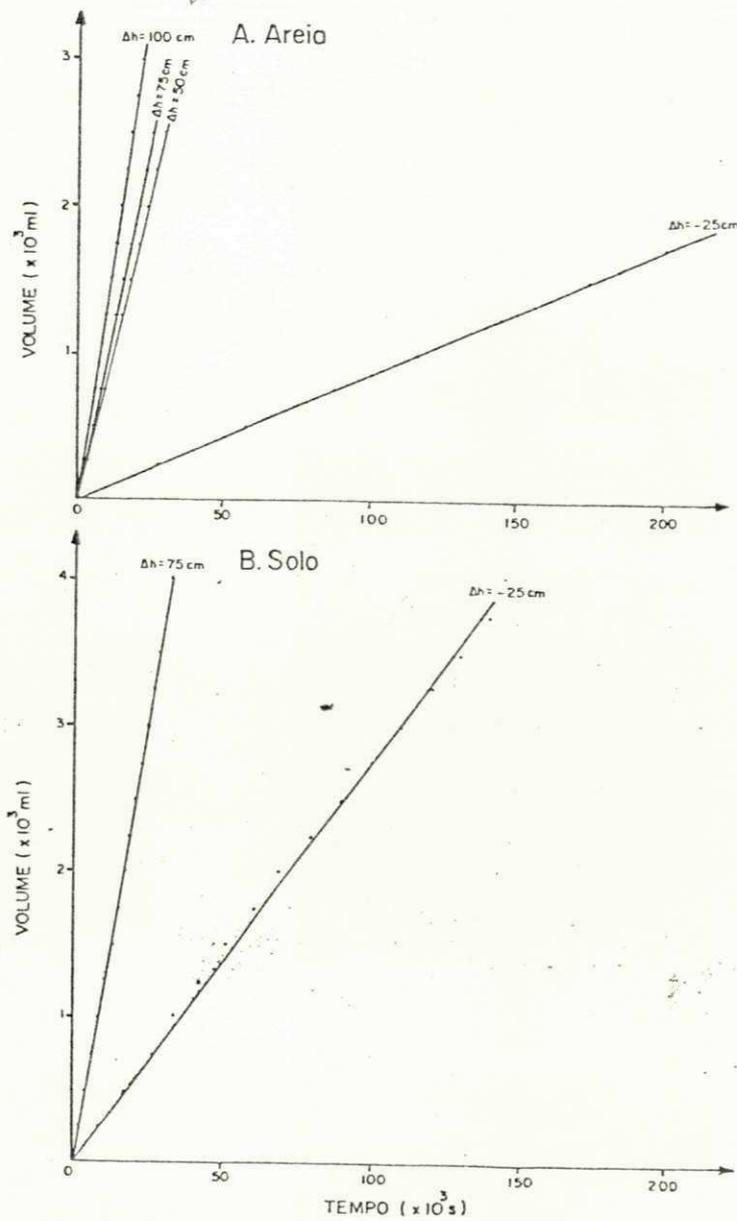


FIG. 9 - Relação entre volumes d'água liberados (ml) e tempo (s).

sões hidrostáticas estudadas os quais foram transformados em ℓ /dia e seus valores estão na tabela 6.

3.1.1 - Areia

As liberações de água pela cápsula porosa para as diferentes cargas estão apresentadas na tabela 6, onde observa-se que permaneceram praticamente constantes durante o período de ensaio sendo as taxas médias 0,718; 6,83; 7,73 e 11,10 ℓ /dia para as pressões hidrostáticas de -25, +50, +75 e +100 cm respectivamente. Verifica-se então, que estas taxas aumentam com a carga aplicada, o que pode também ser visto na figura 10. As taxas médias de liberação de água nas pressões positivas de 50 75 e 100 cm foram maiores do que na carga negativa de -25 cm, sendo 9,51; 10,76 e 15,45 vezes respectivamente.

O menor valor de 0,603 ℓ /dia a 120.000 s, à pressão de -25 cm (tabela 6) talvez tenha sido uma consequência do contato inadequado da parede molhada da cápsula com as partículas da areia que são grandes, pois a comunicação da água por falta de desenvolvimento de pressões adequadas entre as partículas finas da cápsula e as partículas grossas, provavelmente foi dificultada. Um melhor fluxo entre camadas estratificadas ocorre quando a camada mais grossa se sobrepõe à mais fina, como ocorre no caso da recarga artificial estudada por CASTOR & SARMA (1983). Estudos realizados por estes autores mostram que para os casos de areias grossas sobrepostas às finas e médias, e de médias sobrepostas às finas (que contribuem para recarga mais eficiente dos aquíferos livres) as camadas inferiores afe

tam muito pouco as velocidades de infiltração, assegurando assim, uma continuidade no processo de recarga, havendo apenas um pequeno retardamento do processo num espaço de tempo muito curto. Entretanto, quando as camadas finas se sobrepoem às grossas, como é o caso da areia no presente estudo, observa-se uma desaceleração significativa, a qual é chamada "efeito de retardamento" (holding-down-effect) que continua até o desenvolvimento das cargas suficientemente altas no intermeio das camadas. Quando este efeito é acentuado, pode haver acumulação de água no nível de separação das superfícies, em forma de lente; o que denomina-se de aquíferos falsos ou suspensos, sem que seja possível o aproveitamento dessa água por muito tempo.

3.1.2 - Solo

No caso do solo, as cargas consideradas foram -25 e 75 cm. Para a pressão de -25 cm, os volumes de água liberados durante o decorrer do experimento foram praticamente constantes, apresentando um valor médio de 2,37 l/dia como mostra a tabela 6. Para a pressão de 75 cm, as taxas também se mantiveram praticamente constantes com exceção da primeira taxa que mostrou um valor maior em relação aos demais (11,05 l/dia) sendo a taxa média 10,68 l/dia. Esta maior taxa se deve ao fato de que no início, a cápsula é quase saturada e o material que a engloba (solo) é seco. Com o decorrer do tempo, o material absorve cada vez mais água, tornando-se então mais úmido e ocasionando assim, a redução da taxa de liberação de água, pois segundo GAVANDE (1979), o total de água que entra em um solo é

maior quando este está seco. Comparando-se as taxas médias de liberação de água obtidas nas pressões estudadas, observa-se que a da pressão de 75 cm é 4,5 vezes maior que a da pressão negativa de -25 cm.

Tabela 6 - Taxas dos Volumes de Água Liberados pela Cápsula Porosa, na Areia e no Solo, para as Cargas Aplicadas.

TEMPO $\times 10^3$ s	AREIA				SOLO	
	Volumes D'água Liberados(ℓ /dia)				Volumes D'água Liberados(ℓ /dia)	
	Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm	
	-25	50	75	100	-25	75
4						11,05
6		7,19	7,91	11,15		
8		7,02	7,83	11,19		10,32
10		6,91	7,77	11,23	2,47	
12		6,83	7,73	11,24		10,77
14		6,78	7,71	11,10		
16		6,75	7,69	11,13		10,79
18		6,71	7,67	10,99		
20		6,69	7,66	10,95	2,53	10,61
22		6,67	7,65	10,94		
24						10,76
28						10,62
32						10,71
36						10,54
40					2,21	
60					2,55	
80					2,40	
100					2,35	
120	0.603				2,32	
140	0.744				2,29	
160	0.742				2,24	
180	0.743					
200	0.756					
Média	0.718	6,83	7,73	11,10	2,37	10,68

3.1.3 - Comparação entre a Areia e o Solo

Comparando-se os valores das taxas de volume de água liberado pela cápsula porosa, na areia e no solo, verifica-se que sob a pressão de -25 cm, foram obtidas maiores taxas no caso do solo e a taxa média verificada foi 3,3 vezes maior no solo do que na areia. Para esta carga, os valores dos teores de umidade obtidos foram 31,6 e 30,4 % (figura 6) para a areia e solo respectivamente, enquanto que para estes teores obtivemos valores de difusibilidade 2,3 e 0,4 cm²/s (figura 8) na areia e no solo respectivamente. Nota-se que o valor de D na areia foi cerca de 6 vezes maior do que no solo, porém, a comunicação de água entre a cápsula e o meio foi mais fácil no solo, pois neste caso o primeiro tempo tomado para a construção da 1.^a curva foi 10.000 s, enquanto no caso da areia a 1.^a curva foi traçada somente a partir de 120.000 s, como mostra a tabela 6. A dificuldade de comunicação de água entre a cápsula porosa e a areia é devida à superposição de partículas finas às grossas como já foi explicado anteriormente.

Para o caso da pressão de 75 cm, foram obtidas maiores taxas de volume de água liberado no solo do que na areia. Para esta carga, a liberação de água através da parede da cápsula foi mais fácil do que na sucção, pois as partículas grossas da areia têm a capacidade de se encherem com maior facilidade do que a -25 cm, porém, a capacidade de absorver água pela areia não é tão grande como no solo, o que concorreu para verificação de maiores valores no solo, apesar da difusibilidade na areia ser maior.

3.1.4 - Escolha de Cargas Hidrostáticas em Função do Volume de Água Desejado, na Areia e no Solo

Foram plotadas curvas para a areia e o solo, com as pressões hidrostáticas estudadas em função das taxas médias de água liberada (l/dia) apresentadas na figura 10, com a finalidade de se obter um estudo comparativo em relação a pesquisas anteriores, bem como para a escolha de cargas hidrostáticas em função dos volumes de água desejados, cujos valores estão apresentados na tabela 7.

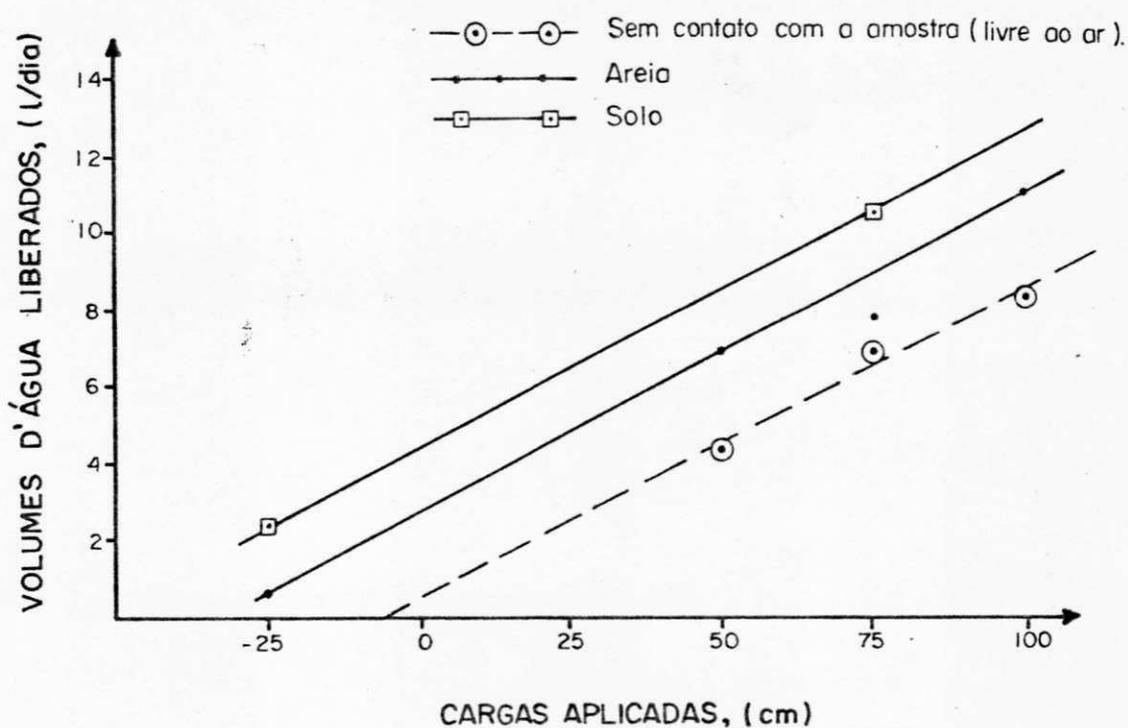


FIG. 10 - Relação entre volumes d'água liberados e cargas aplicadas.

A tabela 7 mostra que para a pressão atmosférica, a cápsula libera no solo 4,7 l/dia, cujo valor está próximo da taxa média encontrada por SILVA (1980) de 4,8 l/dia na produção do milho sob pressões hidrostáticas de 35, 50 e 75 cm.

Isto significa portanto, que não é necessário aplicar cargas hidrostáticas, tornando-se então o sistema mais prático, desde a instalação até o manejo, evitando assim o uso de reservatório e energia no bombeamento, para se manter a carga desejada. Para a mesma condição de pressão atmosférica, a taxa liberada na areia é 2,7 l/dia, o que pode ser suficiente para culturas menos exigentes que o milho, tais como: feijão, sorgo.

Tabela 7 - Volumes de Água Liberados em Função de Diferentes Pressões Hidrostáticas

Cargas Aplicadas (cm)	AREIA	SOLO
	Volumes D'água Liberados (l/dia)	Volumes D'água Liberados (l/dia)
-25,00*	0,72*	2,37*
-17,50	1,20	3,00
-6,25	2,20	4,00
0,00	2,70	4,70
3,75	3,00	4,85
6,25	3,20	5,00
16,25	4,00	5,60
28,25	5,00	6,60
35,00	5,60	7,60
50,00*	6,83*	8,60
75,00*	7,73*	10,68*
100,00*	11,10*	12,95

(*) - Valores Experimentais.

A fim de que sejam liberados 3,0 ℓ /dia na areia e no solo, são necessárias as aplicações das pressões de 3,75 cm e -17,5 cm (sucção) respectivamente, enquanto para a liberação de 4,0 ℓ /dia se faz necessária a utilização das cargas de 16,25 cm e -6,25 cm (sucção) respectivamente, mostrados na tabela 7. Verifica-se que para o solo, os volumes de água são liberados com aplicação de sucção, o que implica em um uso mais racional e eficiente.

Como mostra a tabela 7, os volumes máximos de água liberados que podem ser aproveitados são 11,10 ℓ /dia e 12,95 ℓ /dia para areia e solo respectivamente, na pressão positiva de 100 cm.

Com a pressão negativa máxima de -25 cm, as taxas de liberação de água foram 0,718 ℓ /dia e 2,37 ℓ /dia na areia e solo respectivamente, as quais podem ser suficientes para culturas pouco exigentes nas regiões áridas e semi-áridas.

Assim, o manejo de água para determinada situação pode ser feito pelo volume d'água adequado a ser liberado para as culturas.

3.2 - Volume Molhado

Os volumes molhados na areia e no solo, foram determinados a partir das curvas traçadas com os valores fornecidos pelo sistema de aquisição de dados usado para atender as necessidades das medições tridimensionais efetuadas de acordo com o descrito no Capítulo III. Inicialmente calculou-se as áreas abrangidas por cada curva dos casos estudados, a cada 5 cm de profundidade a partir do nível superior da cápsula, calculando-se

em seguida o volume para cada uma dessas áreas. Finalmente, foram somados os volumes de cada área, subtraindo-se destes, o volume externo da cápsula obtendo-se assim, o volume total de cada curva, que corresponde aos tempos padrões, transformando-o em cm^3/dia .

Os teores de umidade para as curvas, foram obtidos a partir da relação entre o volume de água liberado (ml/dia) e o volume molhado da amostra (cm^3/dia) transformando-o em porcentagem (g/g). Apesar das unidades ml/dia e cm^3/dia serem idênticas, é feita a distinção para diferenciar os volumes de água liberados dos volumes molhados da matriz. A relação entre os teores de umidade em g/g e vol/vol é dada na tabela 4.

3.2.1 - Areia

A tabela 8 apresenta os valores das taxas dos volumes molhados, e as figuras 11 a 14 os volumes molhados os quais aumentam com os tempos correspondentes. Observa-se nessas figuras que as primeiras curvas poderiam ter sido traçadas a menores tempos, ou seja, iniciando-se bem próximo ao topo da cápsula e terminando-se rente à extremidade inferior da cápsula, como mostram as curvas tracejadas. Entretanto os primeiros tempos padrões foram maiores, ou seja, 120.000 e 6.000 s para o caso da sucção (-25 cm) e pressões positivas respectivamente, mostrados nas referidas figuras, porém, isto não afeta os resultados uma vez que os volumes molhados, como também os demais parâmetros, foram calculados levando-se em consideração toda a área entre a cápsula porosa e a 1.^a curva.

Tabela 8 - Taxas dos Volumes Molhados na Areia e no Solo, expressas em cm^3/dia , para as Cargas Aplicadas

TEMPO $\times 10^3$ s	AREIA				SOLO	
	Volumes Molhados cm^3/dia				Volumes Molhados cm^3/dia	
	Cargas Aplicadas-cm				Cargas Aplicadas-cm	
	-25	50	75	100	-25	75
4						9720
6		5000	12960	18700		
8		9000	13500	19300		15120
10		10300	17200	19700	8640	
12		12400	23300	42800		17820
14		12200	29000	51190		
16		11500	26700	44740		17990
18		12400	26100	45100		
20		12400	25700	44880	8200	18140
22		14200	25600	46310		
24						17630
28						16850
32						17920
36						26180
40					6150	
60					6480	
80					6620	
100					6870	
120	756				7520	
140	1203				7830	
160	1755				8490	
180	3340					
200	4820					
Média	2375	11044	22228	36968	7422	17485

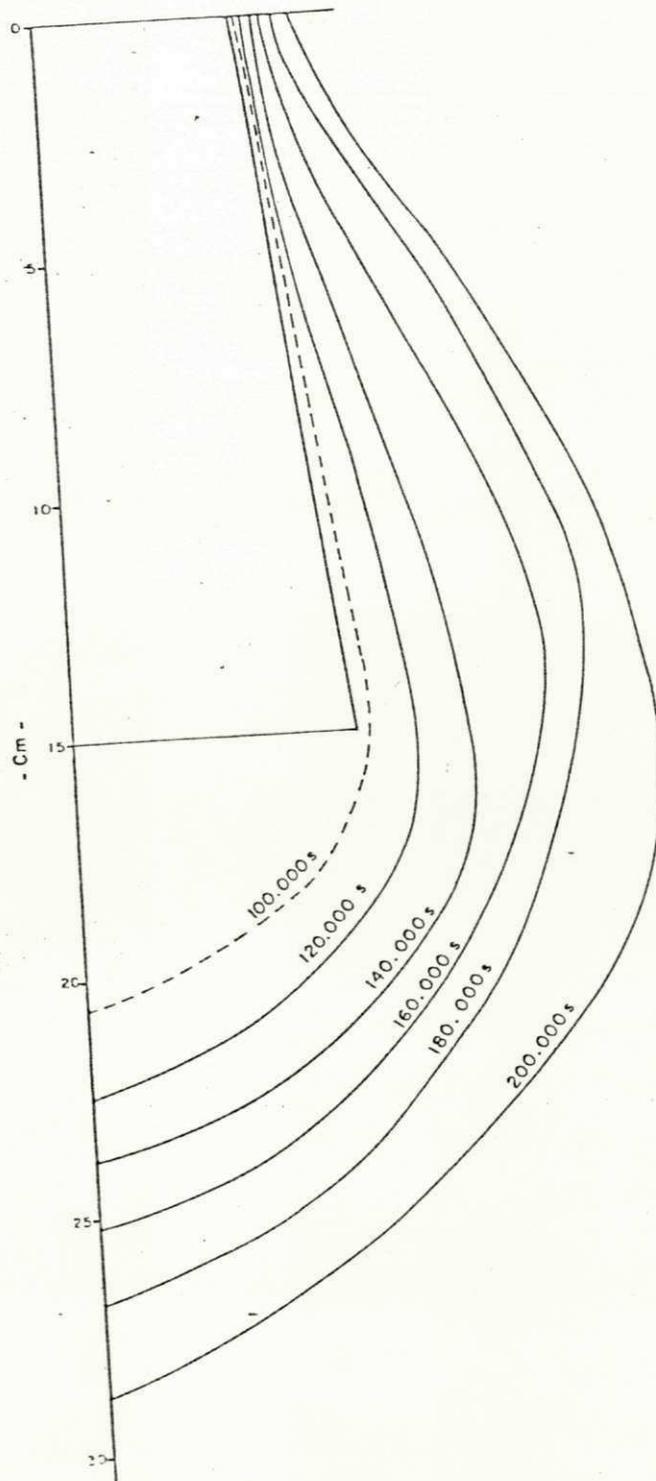
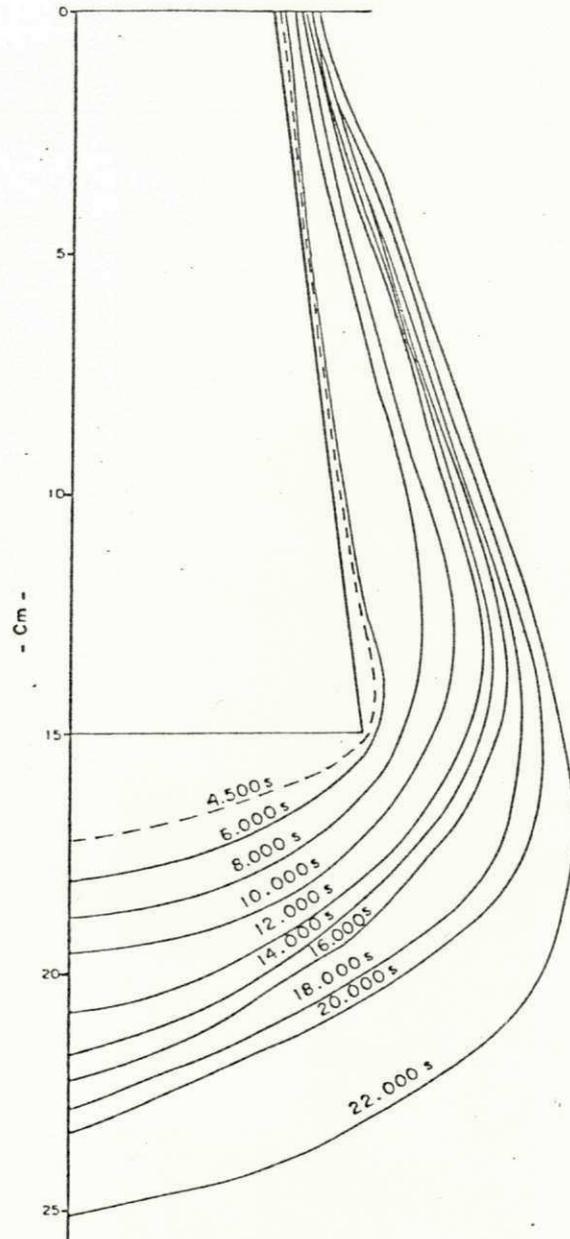


FIG. II - Propagação do frente úmido no areio para o caso da sucção ($\Delta h = -25$ cm).



·FIG.12- Propogção do frente úmido no areio poro o pressão positivo de 50 cm.

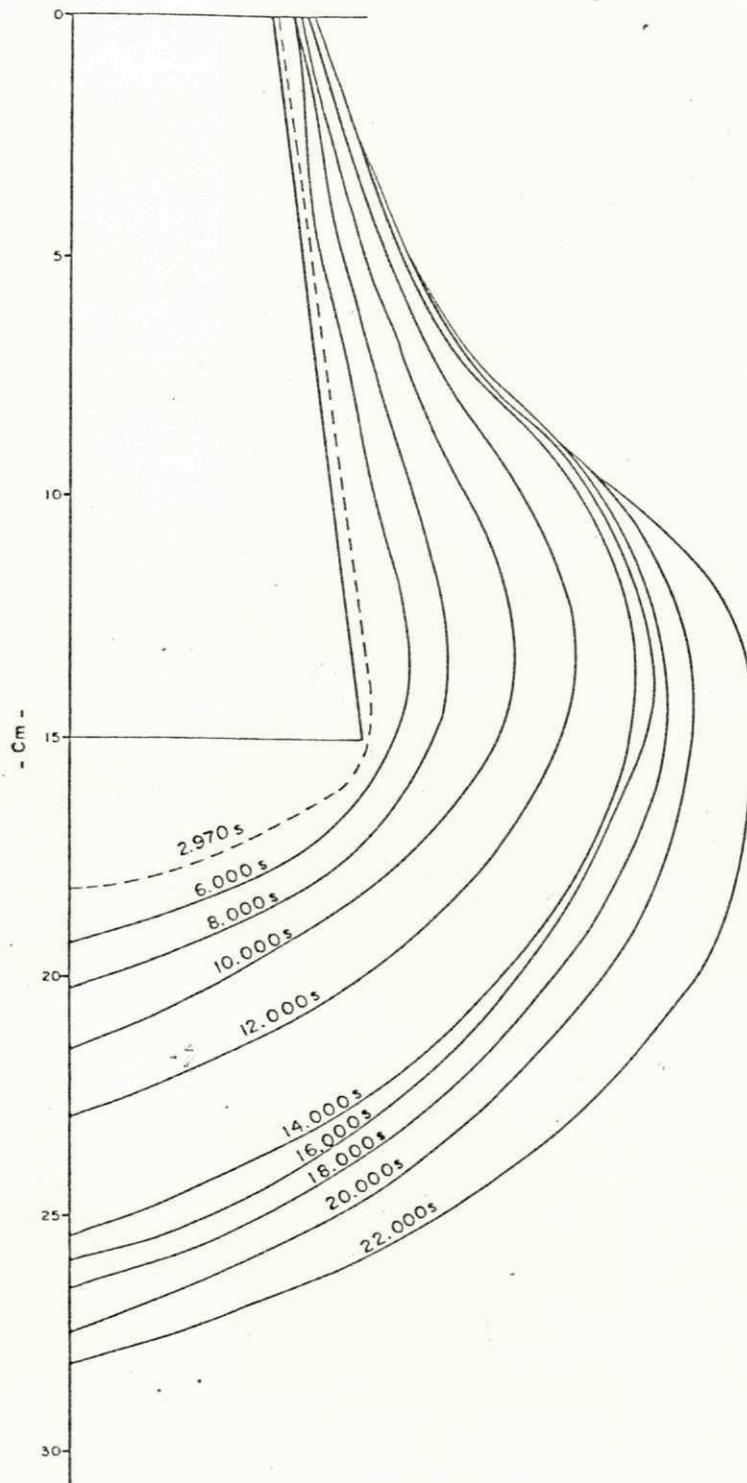


FIG.13 - Propagação da frente úmida no ar para a pressão de 75 cm, positiva.

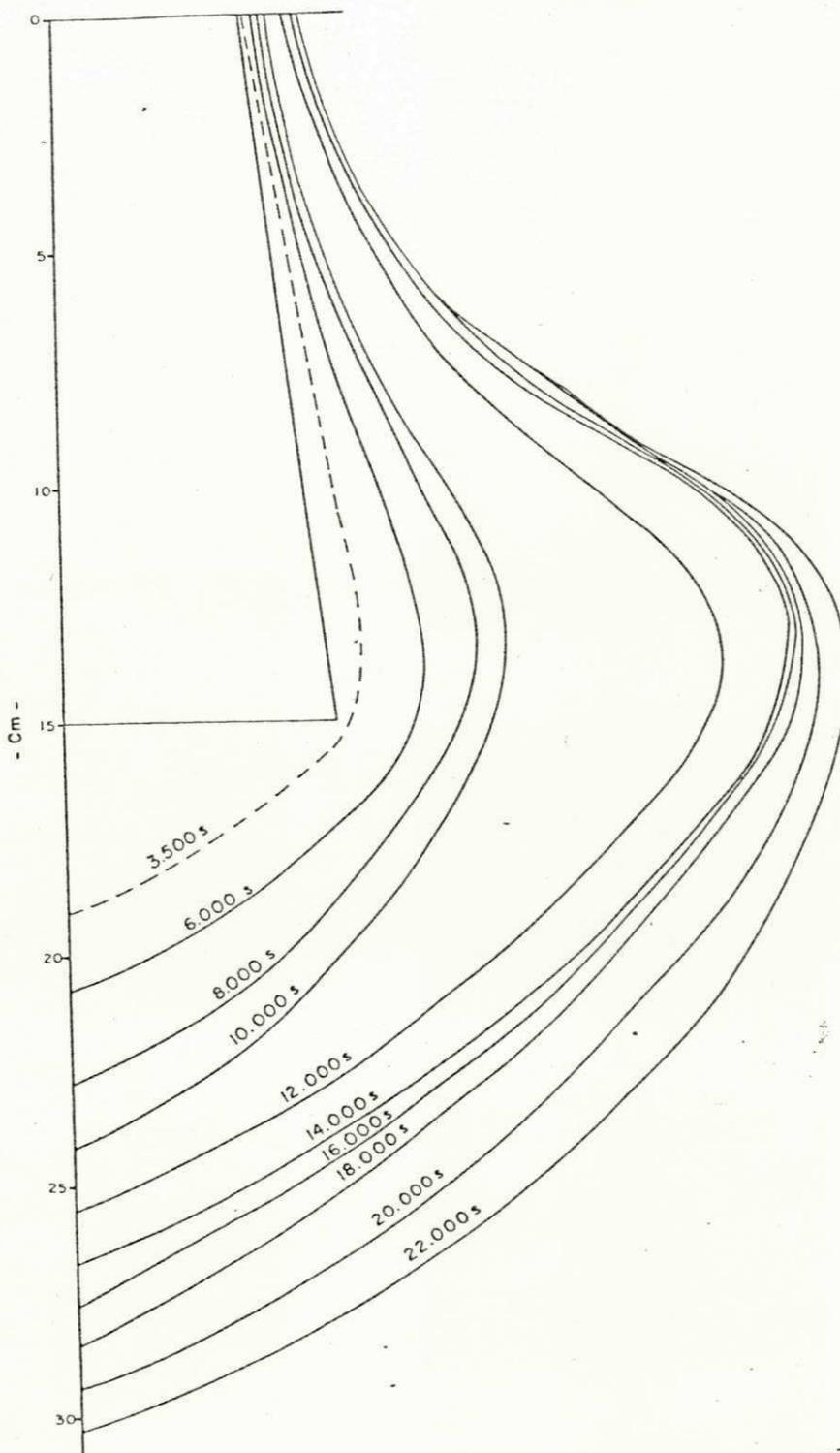


FIG.14- Propagação da frente úmida no ar para a pressão positiva de 100 cm.

A tabela 8 mostra que as taxas médias de volumes de água aumentam com as cargas aplicadas, verificando-se que nas pressões positivas de 50, 75 e 100 cm as taxas são maiores que na carga negativa, 4,65; 9,34 e 15,59 vezes respectivamente.

Para o caso da aplicação de sucção, a água da cápsula está a uma pressão negativa de -25 cm (menor que a pressão atmosférica), enquanto que a areia que a engloba está sob pressão positiva devido ao contato direto com o ar, e isto dificulta a transferência de água, pois segundo SARMA *et alii* (1965) é difícil a comunicação entre água sob pressão negativa e o meio sob pressão atmosférica. Observa-se na tabela 8, que para essa carga, os volumes molhados aumentam de $756 \text{ cm}^3/\text{dia}$ até $4.820 \text{ cm}^3/\text{dia}$ nos tempos de 120.000 e 200.000 s respectivamente. Isto ocorre devido ao efeito da difusibilidade, porque as acumulações dos teores de umidade não são suficientes para permitir a atuação da gravidade. Durante o processo de espalhamento horizontal, o efeito da difusibilidade no início é máximo, enquanto o da gravidade é quase nulo. O processo de infiltração vertical no início é devido às ações da difusibilidade e gravidade. Com o decorrer do tempo, os grãos vazios do meio poroso enchem-se de água, o peso da água acumulada age, causando uma diminuição da difusibilidade e um aumento da gravidade, e aí a infiltração vertical aumenta rapidamente.

No caso da pressão hidrostática positiva de 50 cm, observa-se na tabela 8 que as taxas dos volumes molhados aumentam até o tempo de 12.000 s devido ao efeito predominante da difusibilidade. Com o passar do tempo, o efeito da gravidade aumenta devido às acumulações dos teores de umidade, havendo

então uma diminuição das taxas de 12.400 até 11.500 cm^3/dia a 12.000 e 16.000 s respectivamente. Depois disto, as taxas aumentam até o final para 14.200 cm^3/dia devido à maior acumulação de água na areia, e conseqüentemente uma ação predominante da gravidade.

Na pressão de 75 cm as taxas aumentam até o tempo de 14.000 s devido a um maior efeito da difusibilidade, diminuindo em seguida até 25.600 cm^3/dia a 22.000 s (tabela 8) devido a gravidade predominar à difusibilidade.

Para a carga hidrostática de 100 cm que foi a maior carga aplicada nas experiências, as taxas aumentam até 14.000 s como mostra a tabela 8, diminuindo em seguida no tempo de 16.000 s. Depois disto, as taxas crescem até 22.000 s para um maior valor de 46.310 cm^3/dia , e tudo isto ocorre devido a fatores já mencionados, nas pressões de 50 e 75 cm. O valor de 44.880 cm^3/dia a 20.000 s não obedece ao intervalo crescente das taxas dos volumes molhados nos tempos de 18.000 e 22.000 s, e deve-se talvez à ocorrência de algum erro experimental.

3.2.2 - Solo

A tabela 8 apresenta os valores das taxas de volumes molhados, e as figuras 15 e 16 a propagação da frente úmida para as pressões hidrostáticas de -25 cm e +75 cm respectivamente. Observa-se com evidência que nessas figuras, os volumes molhados aumentam cada vez mais com os tempos correspondentes.

A tabela 8 mostra que a taxa média do volume molhado para a pressão de 75 cm é 2,35 vezes maior que a de -25 cm.

Do mesmo modo que na areia, a comunicação entre a água

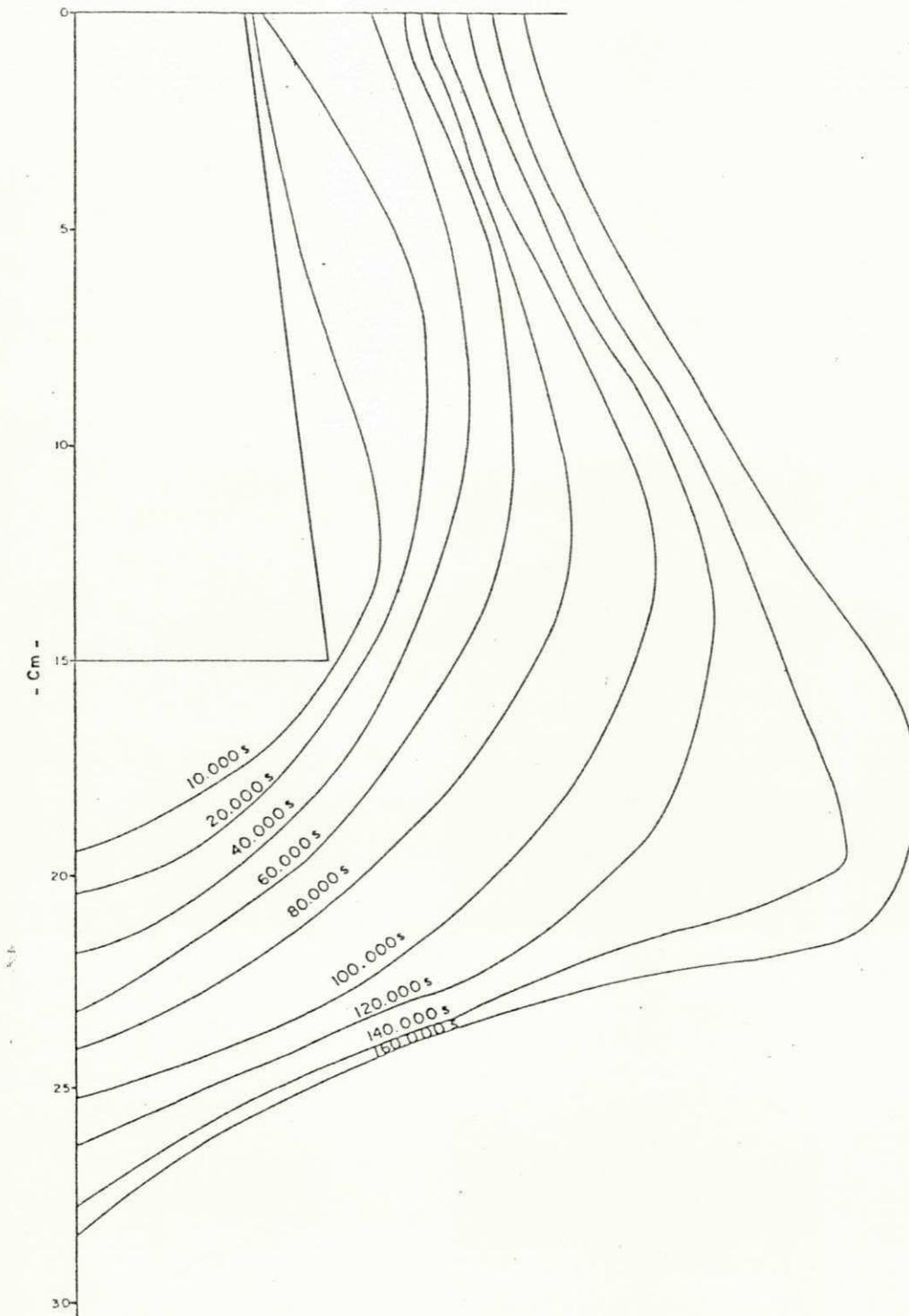


FIG. 15- Propagação da frente úmida no solo para o caso da sucção ($\Delta h = -25$ cm).

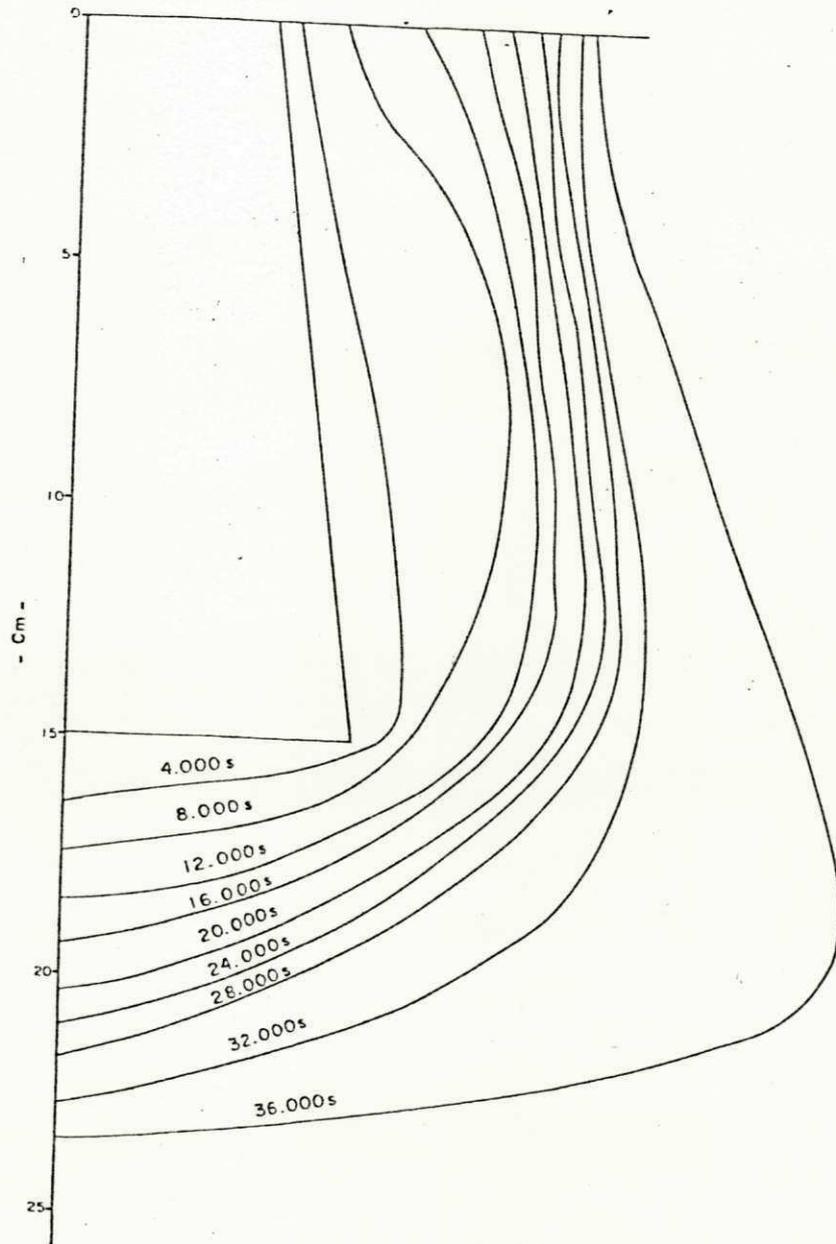


FIG.16 - Propagação do frente úmido no solo para o pressão positiva de 75 cm.

da cápsula e o solo para o caso da aplicação de sucção (-25 cm) foi dificultada sendo, porém, uma dificuldade menor que a apresentada no caso da areia, e os fatores que contribuíram para tal, já foram mencionados. Por isso a primeira curva do volume molhado só foi traçada a 10.000 s como mostra a figura 15.

Observa-se na tabela 8 que para o caso da aplicação da sucção (-25 cm), a taxa do volume molhado foi $8.640 \text{ cm}^3/\text{dia}$ a 10.000 s devido ao efeito da difusibilidade, diminuindo em seguida até $6.150 \text{ cm}^3/\text{dia}$ a 40.000s, devido à ação combinada da difusibilidade e gravidade, o que aumentou o volume molhado, e, conseqüentemente diminuiu a taxa do volume (volume/tempo). Depois disto, as taxas aumentaram até o final (160.000 s) para $8.490 \text{ cm}^3/\text{dia}$, devido ao efeito predominante da gravidade.

Para a pressão hidrostática de 75 cm, as taxas de volumes molhados aumentam de 9.720 para $18.140 \text{ cm}^3/\text{dia}$ nos tempos de 4.000 e 20.000 s respectivamente, diminuindo em seguida até $16.850 \text{ cm}^3/\text{dia}$ a 28.000 s, e finalmente as taxas sofrem novo acréscimo para $26.180 \text{ cm}^3/\text{dia}$ a 36.000 s. As causas dessas variações já foram explicadas nos casos anteriores.

3.2.3 Comparação entre a Areia e o Solo

A comparação das taxas de volumes molhados entre a areia e o solo só pode ser feita para as pressões de -25 e 75 cm por serem comuns em ambos os casos.

No caso da sucção (-25 cm) os tempos considerados para as devidas comparações foram: 120.000; 140.000 e 160.000s uma vez que na areia a 1.^a curva só foi traçada a 120.000 s. A tabela 8

mostra que nesta carga, as taxas dos volumes molhados de solo são muito altas da ordem de 6.150 a 8.490 cm^3/dia a 80.000 e 160.000 s, enquanto que na areia estas variam entre 756 e 4.820 cm^3/dia a 120.000 e 200.000 s respectivamente.

Esta grande variação das taxas de volumes molhados na areia e no solo, ocorre porque o d_{50} das partículas da areia (0,115 mm) é maior que o d_{50} das partículas do solo (0,085 mm) e assim as partículas do solo têm mais facilidade do que as da areia para comunicação e transmissão com as gotículas de água aderidas à parede externa da cápsula. Amostras com texturas mais finas apresentam maior facilidade de comunicação de água com a parede da cápsula do que aquelas com texturas grossas, especialmente no caso da aplicação de sucção.

Para o caso da pressão positiva de 75 cm, os tempos tomados para fins de comparação na areia e no solo foram: 4.000, 8.000, 12.000, 16.000 e 20.000 s.

A tabela 8 mostra que, no início, as taxas do volume molhado para a pressão de 75 cm são maiores no solo do que na areia até o tempo de 8.000 s, e menores de 12.000 s até o final. O fato destas taxas serem maiores, no início, no solo é devido ao solo possuir partículas finas, como já foi dito, as quais têm bom contato com a parede da cápsula, e os teores de umidade do solo são altos, inicialmente (25,27 % a 8.000 s, tabela 9) em relação aos da areia (21,01 % a 8.000 s, tabela 9), fazendo com que a comunicação de água entre a parede da cápsula e o solo seja bastante fácil, o que não ocorre com areia por possuir partículas grossas.

Entretanto, a dificuldade de comunicação de água entre

Tabela 9 - Percentagens de Umidade (g/g)
na Areia e no Solo.

TEMPO $\times 10^3$ s	AREIA				SOLO	
	Teores de Umidade (θ) g/g, %				Teores de Umidade (θ) g/g, %	
	Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm	
	-25	50	75	100	-25	75
4						
6			22,11	21,60		
8	28,26	21,01	18,34		25,27	
10	24,30	16,36	20,65		10,38	
12	19,95	12,02	9,51			22,38
14	20,13	9,63	7,85			
16	21,26	10,43	9,01			22,21
18	19,60	9,45	8,82			
20	19,54	10,79	8,85		11,42	21,66
22	17,01	10,82	8,55			
24						22,60
28						23,34
32						22,13
36						14,91
40					13,30	
60					14,57	
80					13,42	
100					12,66	
120	28,89				11,42	
140	22,40				10,83	
160	15,31				9,77	
180	8,05					
200	5,68					

a cápsula e a areia é apenas no início, pois com o decorrer do tempo, após o enchimento dos vazios, a ação da difusibilidade e da gravidade é maior na areia, apesar dos teores de umidade continuarem sendo maiores no solo como mostra a tabela 9, e aí as taxas dos volumes molhados passam a ser maiores na areia a partir de 12.000 até 20.000 s (tabela 8).

3.3 - Espalhamentos Máximos Radiais e suas Correspondentes Taxas

Da mesma forma que os volumes molhados, os espalhamentos máximos radiais ou laterais, na direção horizontal, foram obtidos através das curvas traçadas com os dados fornecidos pelo sistema de aquisição de dados. Estes espalhamentos foram considerados como sendo a distância entre a linha central da secção da cápsula e o ponto mais distante desta até a curva em estudo, expressa em cm. As taxas destes espalhamentos foram dadas pela relação entre os seus valores e os tempos correspondentes \dot{r} (cm/s).

3.3.1 - Areia

Os espalhamentos máximos radiais para a pressão hidrostática negativa de -25 cm e para as cargas positivas de 50, 75 e 100 cm estão apresentados na tabela 10, onde observa-se que aumentam com as cargas aplicadas e com o decorrer do tempo.

As figuras de 11 a 14 mostram que com o passar do tempo, as curvas tendem a se limitar na direção lateral, aproximando-se muito uma das outras, e a se infiltrarem cada vez mais, pelo aumento da gravidade, pois com o tempo os grãos de areia enchem-se

Tabela 10 - Espalhamentos Máximos Radiais e as Correspondentes Taxas, na Areia e no Solo

TEMPO $\times 10^3$ s	AREIA								SOLO			
	Espalhamentos Máximos Radiais - cm				Taxas dos Espalhamentos - cm/s				Espalhamentos Máximos Radiais - cm		Taxas dos Espalhamentos - cm/s	
	Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm		Cargas Aplicadas - cm	
	-25	50	75	100	-25	50	75	100	-25	75	-25	75
4									7,3			$1,82 \times 10^{-3}$
6	6,2	7,0	7,9		$1,03 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$					
8	7,2	7,8	9,0		$9,00 \times 10^{-4}$	$9,75 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-3}$		9,3			$1,16 \times 10^{-3}$
10	7,9	9,3	9,5		$7,90 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-4}$	$9,50 \times 10^{-4}$		7,2		$7,2 \times 10^{-4}$	
12	8,6	10,5	14,0		$7,10 \times 10^{-4}$	$8,75 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-3}$		10,0			$8,33 \times 10^{-4}$
14	8,7	11,7	15,4		$6,21 \times 10^{-4}$	$8,35 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-3}$					
16	9,0	12,0	15,7		$5,62 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-4}$	$9,81 \times 10^{-4}$		10,4			$6,50 \times 10^{-4}$
18	9,4	12,3	15,9		$5,22 \times 10^{-4}$	$6,83 \times 10^{-4}$	$8,83 \times 10^{-4}$					
20	9,7	12,6	16,1		$4,85 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$	$8,05 \times 10^{-4}$		8,3		$4,15 \times 10^{-4}$	$5,50 \times 10^{-4}$
22	10,4	14,2	17,0		$4,72 \times 10^{-4}$	$6,45 \times 10^{-4}$	$7,72 \times 10^{-4}$					
24									11,5			$4,79 \times 10^{-4}$
28									11,9			$4,25 \times 10^{-4}$
32									12,5			$3,90 \times 10^{-4}$
36									16,8			$4,66 \times 10^{-4}$
40									9,1		$2,27 \times 10^{-4}$	
60									10,4		$1,73 \times 10^{-4}$	
80									11,5		$1,43 \times 10^{-4}$	
100									13,6		$1,36 \times 10^{-4}$	
120	7,2				$6,00 \times 10^{-5}$				14,9		$1,24 \times 10^{-4}$	
140	8,5				$6,07 \times 10^{-5}$				17,8		$1,27 \times 10^{-4}$	
160	10,0				$6,28 \times 10^{-5}$				19,8		$1,23 \times 10^{-4}$	
180	11,0				$6,11 \times 10^{-5}$							
200	12,4				$6,20 \times 10^{-5}$							
MÉDIA					$6,15 \times 10^{-5}$	$6,76 \times 10^{-4}$	$8,31 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-3}$			$2,43 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-4}$

de água e o efeito da difusibilidade diminui, limitando assim, os espalhamentos radiais da direção horizontal. Observa-se en tretanto, na figura 11, que para o caso da pressão negativa de -25 cm, as curvas não ficaram muito próximas entre si, devido a que os intervalos tomados entre os tempos padrões foram 10 vezes maiores que os tomados nas pressões positivas, uma vez que no caso da sucção, a frente úmida avança lentamente.

Observa-se ainda, que no caso da pressão positiva de 100 cm (figura 14) houve uma grande discrepância no espalhamento do intervalo de 10.000 a 12.000 s, e isto pode ser atribuído a erros experimentais, pelas imperfeições das condições de realização do trabalho, não obstante as várias repetições efetuadas, o que não implica, porém, em prejuízo para os resultados em termos comparativos.

As taxas dos espalhamentos máximos radiais para o caso da aplicação de sucção de -25 cm, permaneceram praticamente constantes não havendo uma tendência fixa de diminuir ou aumentar, apresentando uma taxa média de $6,15 \times 10^{-5}$ como mostra a tabela 10. Este fato se deve à gravidade e difusibilidade ha verem atingido condições de equilíbrio.

Para as pressões hidrostáticas positivas de 50, 75 e 100 cm as taxas dos espalhamentos foram altas no início ($1,03 \times 10^{-3}$; $1,16 \times 10^{-3}$ e $1,31 \times 10^{-3}$ cm/s respectivamente), como mostra a tabela 10, devido à ação dominante da di fusibilidade, diminuindo em seguida até o tempo de 22.000 s ($4,72 \times 10^{-4}$ e $6,45 \times 10^{-4}$ cm/s respectivamente) pela ação combinada da difusibilidade e gravidade. Porém, os valores das taxas para a pressão de 100 cm a 12.000 e 14.000 s não estão

coerentes, pois deviam ser menores que a taxa referente ao tempo anterior de 10.000 s e isto deve-se aos afastamentos discrepantes das curvas nestes tempos, o que já foi comentado anteriormente.

Observa-se na tabela 10 que as taxas médias dos espalhamentos nas cargas positivas de 50, 75 e 100 cm são maiores que na carga de -25 cm 10,99; 13,51 e 16,42 vezes respectivamente.

3.3.2 - Solo

A tabela 10 apresenta ainda os valores dos espalhamentos máximos radiais para as pressões de -25 cm e 75 cm no solo.

As figuras 15 e 16 mostram que com o passar do tempo, como ocorrido na areia, sob pressões de -25 e 75 cm, as curvas tendem a se limitar na direção lateral, e se infiltrarem mais, tornando-se muito próximas entre si, e isto se deve aos mesmos fatores já explicados para o caso da areia. As discrepâncias observadas para os espalhamentos em algumas das curvas dessas figuras, podem ser atribuídas às mesmas causas citadas para o caso da areia.

A taxa do espalhamento máximo radial para o caso da aplicação da sucção de -25 cm caiu de $7,2 \times 10^{-4}$ para $1,23 \times 10^{-4}$ cm/s nos tempos de 10.000 e 160.000 s respectivamente (tabela 10), devido também aos mesmos fatores anteriormente expostos no caso da areia submetida a pressões positivas.

Para a pressão de 75 cm, as taxas diminuíram de $1,82 \times 10^{-3}$ até $3,90 \times 10^{-4}$ cm/s a 4.000 e 32.000 s, como mostra a tabela 10, devido a fenômenos já mencionados, aumentando em seguida para $4,66 \times 10^{-4}$ cm/s pelo efeito dominante da gravidade.

A taxa média para a pressão de 75 cm é maior, sendo 3,09 vezes em relação à de -25 cm.

3.3.3 - Comparação entre a Areia e o Solo

Comparando-se os valores dos espalhamentos para a pressão de -25 cm na areia e no solo a 120.000; 140.000 e 160.000s, observa-se, na tabela 10, que no 2º caso estes valores foram maiores 2,06; 2,09 e 1,97 vezes respectivamente, pois como dito anteriormente, amostras com textura mais fina apresentam maior facilidade de comunicação de água do que aqueles com texturas grossas, especialmente com a aplicação de sucção, concorrendo assim, para maiores espalhamentos.

Para a pressão de 75 cm, os tempos considerados para comparação entre areia e solo foram 8.000; 12.000 ; 16.000 e 20.000 s, por serem comuns em ambos os casos. Observa-se que apenas no início, a 8.000 s, o espalhamento no solo foi 1,19 vezes maior do que na areia, enquanto nos demais tempos, os espalhamentos foram maiores na areia, 1,05; 1,15 e 1,14 vezes respectivamente como mostrado na tabela 10. Pode-se dizer que isto ocorre apenas no início dos tempos, como no caso do volume molhado, e pelas mesmas razões ali descritas.

Comparando-se as taxas dos espalhamentos máximos radiais para a carga de -25 cm, na areia e no solo, a 120.000, 140.000 e 160.000 s, verifica-se que são maiores no solo, sendo a taxa média 3,97 vezes maior como mostra a tabela 10.

Sob a pressão de 75 cm, as taxas são maiores no solo, inicialmente, a 8.000 s, e menores a 12.000; 16.000 e 20.000 s como mostra a tabela 10.

3.4 - Infiltrações Verticais e Suas Correspondentes Taxas

A infiltração vertical foi obtida também mediante as curvas traçadas com os dados fornecidos pelo sistema de aquisição de dados, e foi considerada como sendo a medida, em cm, compreendida entre a linha correspondente ao topo da cápsula e a intersecção de cada curva com o eixo vertical do gráfico. A taxa de infiltração foi obtida a partir da relação entre seu valor e o tempo (cm/s).

3.4.1 - Areia

As infiltrações verticais para as pressões hidrostáticas de -25, 50, 75 e 100 cm estão apresentadas na tabela 11, onde observa-se que aumentam com as cargas aplicadas e com o passar do tempo.

As taxas de infiltração vertical também estão apresentadas na tabela 11. Observa-se que para o caso da sucção, as diminuições registradas para as taxas de infiltração foram tão pequenas que não chegaram a se tornar significativas, permanecendo praticamente constantes, a uma taxa média de $1,59 \times 10^{-4}$ cm/s. Esta estabilização nas taxas de infiltração pode ser atribuída aos mesmos fatores que concorreram para a estabilização nas taxas dos espalhamentos máximos na areia, sob a carga negativa de -25 cm.

A tabela 11 mostra que as taxas de infiltração nas pressões positivas são altas no início, e diminuem em seguida até o final, semelhantemente ao que ocorre com as taxas de espalha

Tabela 11 -- Infiltrações Verticais e as Correspondentes Taxas, na Areia e no Solo.

TEMPO $\times 10^3$ s	AREIA								SOLO			
	Infiltrações Verticais - cm Cargas Aplicadas - cm				Taxas das Infiltrações - cm/s Cargas Aplicadas - cm				Infiltrações Verticais - cm Cargas Aplicadas - cm		Taxas das Infiltrações - cm/s Cargas Aplicadas - cm	
	-25	50	75	100	-25	50	75	100	-25	75	-25	75
4									16,5			$4,12 \times 10^{-3}$
6	18,3	19,4	21,0		$3,05 \times 10^{-3}$	$3,23 \times 10^{-3}$	$3,50 \times 10^{-3}$					$2,20 \times 10^{-3}$
8	18,8	20,7	23,0		$2,35 \times 10^{-3}$	$2,58 \times 10^{-3}$	$2,87 \times 10^{-3}$		17,6			
10	19,7	21,9	24,3		$1,97 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,43 \times 10^{-3}$		19,5		$1,95 \times 10^{-3}$	
12	20,9	23,3	25,8		$1,47 \times 10^{-3}$	$1,94 \times 10^{-3}$	$2,15 \times 10^{-3}$			18,6		$1,55 \times 10^{-3}$
14	21,8	25,9	26,9		$1,55 \times 10^{-3}$	$1,85 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-3}$			19,5		$1,21 \times 10^{-3}$
16	22,4	26,3	27,7		$1,40 \times 10^{-3}$	$1,64 \times 10^{-3}$	$1,73 \times 10^{-3}$			19,5		
18	23,1	27,0	28,5		$1,28 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,58 \times 10^{-3}$			20,4	20,5	$1,02 \times 10^{-3}$
20	23,3	27,5	29,4		$1,16 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-3}$	$1,47 \times 10^{-3}$					$1,02 \times 10^{-3}$
22	25,1	28,4	30,3		$1,14 \times 10^{-3}$	$1,29 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-3}$					
24										21,3		$8,87 \times 10^{-4}$
28										22,0		$7,85 \times 10^{-4}$
32										22,8		$7,12 \times 10^{-4}$
36										23,9		$6,63 \times 10^{-4}$
40									21,8		$5,45 \times 10^{-4}$	
60									23,1		$3,85 \times 10^{-4}$	
80									23,0		$2,98 \times 10^{-4}$	
100									25,3		$2,53 \times 10^{-4}$	
120	22,2				$1,85 \times 10^{-4}$				26,5		$2,18 \times 10^{-4}$	
140	23,1				$1,65 \times 10^{-4}$				27,5		$1,96 \times 10^{-4}$	
160	25,0				$1,56 \times 10^{-4}$				28,5		$1,78 \times 10^{-4}$	
180	26,5				$1,47 \times 10^{-4}$							
200	28,5				$1,42 \times 10^{-4}$							
MÉDIA					$1,59 \times 10^{-4}$	$1,70 \times 10^{-3}$	$1,95 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-3}$			$5,60 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-3}$

mento na areia sob cargas positivas.

3.4.2 - Solo

A tabela 11 apresenta os valores das infiltrações verticais para as pressões de -25 e 75 cm, as quais aumentam com as cargas aplicadas e com o tempo.

As taxas das infiltrações verticais também estão mostradas na tabela 11. Para o caso da carga negativa de -25 cm, as taxas sofreram uma diminuição de quase 11 vezes do início até o final, mostrando assim um decréscimo contínuo e verificando-se portanto, que o recipiente e o tempo não foram suficientes e adequados para que fossem atingidas as condições de equilíbrio entre a gravidade e a difusibilidade.

Para o caso da carga de 75 cm, a diminuição também foi grande desde o início até o final, sendo em torno de 6 vezes menor que na sucção. Isto ocorreu devido à ação combinada da difusibilidade e gravidade.

3.4.3 - Comparação entre a Areia e o Solo

Comparando-se os valores das infiltrações na areia e no solo para os tempos de 120.000, 140.000 e 160.000 s, observa-se que são maiores no solo 1,17; 1,18 e 1,14 vezes respectivamente como mostra a tabela 11. Para os mesmos tempos, as taxas de infiltração são também maiores no solo, sendo 3,50 vezes maior a taxa média, como na tabela 11.

Para a pressão de 75 cm as infiltrações verticais são

maiores na areia nos tempos comuns a ambos os casos, ou seja, 8.000; 12.000; 16.000 e 20.000 s (tabela 11). As taxas de infiltração vertical para os mesmos tempos são também maiores na areia, sendo a taxa média de 1,33 vezes maior na areia.

3.5 - Prognóstico dos Espalhamentos e Infiltrações na Areia e no Solo

As tabelas 12 e 13 apresentam os valores dos espalhamentos radiais e infiltrações verticais respectivamente, extrapolados em escala logarítmica, na areia e no solo, para os tempos de 1, 2, 3, e 4 dias, sob as cargas hidrostáticas de -25, 50, 75 e 100 cm. No caso do solo, os valores para as cargas de 50 e 100 cm foram obtidos através de inter e extrapolações respectivamente, para fins de comparação com a areia, uma vez que estas cargas não foram aplicadas no solo.

3.5.1. - Espalhamentos

Observa-se na tabela 12 que os espalhamentos, à pressão de -25 cm, são menores na areia que no solo, enquanto que para as cargas positivas de 50, 75 e 100 cm ocorre o contrário.

Aparentemente, os espalhamentos parecem ser maiores na areia do que no solo, sob as pressões positivas estudadas, entretanto, na realidade, o espalhamento radial é limitado no caso da areia, com as curvas aproximando-se cada vez mais uma das outras (figuras 11 a 14) o que não ocorre necessariamente no caso do solo, enquanto que as infiltrações crescem com o

Tabela 12 - Extrapolação dos Espalhamentos na Areia e no Solo para maiores períodos de tempo

TEMPO	AREIA				SOLO			
	Espalhamentos - cm				Espalhamentos - cm			
DIAS	Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm			
	-25	50	75	100	-25	50	75	100
1	3,6	19,0	26,4	32,4	14,4	18,0	20,4	22,0
2	10,6	25,6	32,4	39,0	21,0	24,5	27,0	28,6
3	15,0	30,0	37,8	47,4	28,2	29,5	30,6	31,2
4	19,8	33,8	42,0	55,2	33,0	33,5	34,2	34,5

Tabela 13 - Extrapolação das Infiltrações na Areia e no Solo para maiores períodos de tempo

TEMPO	AREIA				SOLO			
	Infiltrações - cm				Infiltrações - cm			
DIAS	Cargas Aplicadas - cm				Cargas Aplicadas - cm			
	-25	50	75	100	-25	50	75	100
1	19,2	32,4	37,2	48,0	24,6	27,4	28,2	29,2
2	25,3	37,2	43,8	60,0	30,6	33,4	34,2	35,2
3	33,0	42,0	49,8	69,0	37,2	37,7	37,8	38,0
4	38,4	46,0	56,4	75,0	42,0	44,4	45,0	45,8

tempo, devido à ação dominante da gravidade sobre a difusibilidade. Assim, as extrapolações dos espalhamentos na areia após dois dias não parecem viáveis.

3.5.1.1 - Areia

As razões dos espalhamentos entre as cargas estudadas, mostradas na tabela 14, decrescem na ordem em que se encontram na tabela, para ambos os tempos considerados, porque nessa ordem as relações entre as cargas aplicadas diminuem.

Observa-se na tabela 14, que a razão do espalhamento entre as cargas de 100 e -25 cm, na areia, decresce de 9,00 (32,40/3,60) para 3,67 (39,00/10,60) nos tempos de 1 e 2 dias respectivamente, uma vez que os tempos de 3 e 4 dias não foram considerados, de acordo com o descrito anteriormente.

Entre as cargas de 100 e 50 cm, essa razão decresceu de 1,70 para 1,52 nas mesmas condições de tempo, enquanto que entre as pressões de 100 e 75 cm, a diminuição foi de 1,22 para 1,20 às mesmas condições de tempo (tabela 14). Verifica-se portanto, que com a aplicação de maiores cargas, as razões tendem a estabilizar-se, com o decorrer do tempo.

Comparando-se as razões em relação à carga de 100 cm (100/-25 ; 100/50 e 100/75), verifica-se que os maiores valores ocorrem no caso da relação de 100 e -25 cm, onde observa-se um rápido decréscimo de 9 para 3,67. No caso da relação entre 100 e 50 cm, as razões foram baixas, ocorrendo também um baixo decréscimo de 1,70 para 1,52, e finalmente, para a relação entre 100 e 75 cm, as razões foram ainda menores, sendo

também menor o decréscimo observado (de 1,22 para 1,20). As altas taxas verificadas no caso da relação de 100 e -25 cm são evidentes, por ser a pressão de 100 cm a mais alta e a de -25 cm a menor, com o efeito da difusibilidade agindo na areia.

O decréscimo das razões em cada caso mostra a tendência da frente úmida a se limitar na direção horizontal, embora os valores absolutos aumentem com o tempo, como mostra a tabela 12. Esse fenômeno é esperado na direção horizontal, uma vez que nesse sentido apenas a difusão age, e esta tem uma margem de limite.

3.5.1.2 - Solo

Da mesma maneira que no caso da areia, as razões dos espalhamentos entre as cargas estudadas, vista na tabela 14, decrescem na sequência em que se encontram na tabela, para ambos os tempos considerados devido a que, nessa ordem, as relações entre as cargas aplicadas decrescem.

Observa-se na tabela 12 que entre as cargas de 100 e -25 cm, nos tempos de 1, 2, 3 e 4 dias, as razões dos espalhamentos decrescem, sendo os respectivos valores: 1,52 (22,0/14,4); 1,36 (28,6/21); 1,10 (31,2/28,2) e 1,04 (34,5/33), ocorrendo, porém, uma diminuição bem menos acentuada do que na areia nos tempos comuns a ambos os casos. Observa-se que as razões para esta relação de cargas estudadas tendem a estabilizar-se.

Pode-se ainda afirmar que para a relação das cargas de 100 e 75 cm, as razões para 3 e 4 dias tendem também a permanecer constantes, sendo 1,01 (31,2/30,6) e 1,00 (34,5/34,2) respectivamente (tabela 12).

Isto implica em dizer que a aplicação de cargas maiores que 50 cm não contribuíram em muito para maiores espalhamentos.

Observa-se na tabela 12, que para as cargas de 50 e -25 cm as razões diminuem com o tempo, sendo que a 3 e 4 dias permanecem quase constantes em 1,04 (29,5/28,2) e 1,01 (33,5/33) respectivamente, com os respectivos espalhamentos praticamente invariáveis.

Neste caso, é mais viável aplicar a carga negativa de -25 cm, em virtude do uso mais racional de água, o que será discutido com detalhes ainda neste capítulo, no item 6.

A explicação para o decréscimo das razões dos espalhamentos entre as cargas aplicadas as quais tendem a aproximarem-se de 1, é a mesma citada para o caso da areia.

3.5.2 - Infiltrações

A tabela 13 mostra que as infiltrações verticais, para o caso da aplicação da sucção (-25 cm), são menores na areia do que no solo (como visto no item 3.4.3) e no entanto, quando são aplicadas as pressões positivas de 50, 75 e 100 cm, verifica-se que os valores obtidos no solo superam em muito os obtidos na areia.

3.5.2.1 - Areia

As razões das infiltrações entre as cargas estudadas, mostradas na tabela 15, decrescem na ordem em que se encontram

Tabela 14 - Razões dos Espalhamentos, na Areia e no Solo

TEMPO	AREIA					SOLO				
	Espalhamentos - cm					Espalhamentos - cm				
DIAS	Razões entre as cargas					Razões entre as cargas				
	100/-25	75/-25	50/-25	100/50	100/75	100/-25	75/-25	50/-25	100/50	100/75
1	9,00	7,33	5,27	1,70	1,22	1,52	1,41	1,25	1,22	1,07
2	3,67	3,05	2,41	1,52	1,20	1,36	1,28	1,16	1,16	1,06
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 15 - Razões entre as Infiltrações, na Areia e no Solo

TEMPO	AREIA					SOLO				
	Infiltrações - cm					Infiltrações - cm				
DIAS	Razões entre as cargas - cm					Razões entre as cargas - cm				
	100/-25	75/-25	50/-25	100/50	100/75	100/-25	75/-25	50/-25	100/50	100/75
1	2,50	1,93	1,68	1,48	1,29	1,18	1,14	1,11	1,06	1,03
2	2,37	1,73	1,47	1,61	1,37	1,15	1,11	1,09	1,05	1,02
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

na tabela.

A razão da infiltração vertical entre as cargas de 100 e -25 cm decresce de 2,5 para 2,37, nos tempos de 1 e 2 dias.

Relacionando-se as cargas de 100 e 50 cm e as de 100 e 75 cm para as mesmas condições de tempo, observa-se na tabela 15 que em ambos os casos as razões cresceram de 1,48 para 1,61 e de 1,29 para 1,37 respectivamente. O aumento das razões com o tempo, nas relações entre as cargas positivas é compreensível, pelo fato de que na direção vertical, a infiltração deve-se à difusibilidade e à gravidade. As razões das relações entre as cargas positivas cujo numerador é 100 será sempre maior do que a de numerador 75, uma vez que a diferença entre os valores absolutos dos espalhamentos diminuem com o tempo, e assim a infiltração para a carga hidrostática de 100 cm cresce muito mais com o tempo do que a carga de 75 cm. O mesmo ocorre entre as cargas de 100 e 50 cm.

3.5.2.2. - Solo

Como ocorrido na areia, as razões das infiltrações entre as cargas aplicadas no solo, mostradas também na tabela 15, decrescem na ordem em que estão na tabela.

Verifica-se na tabela 13 que a razão entre as cargas de 100 e -25 cm, decresceu de 1,18 (29,2/24,6) para 1,09 (45,8/42) no período de 1 e 4 dias respectivamente.

Comparando-se com a areia, verifica-se que no solo, a razão da infiltração entre as cargas de 100 e -25 cm decresceu de 1,18 para 1,15, nos tempos de 1 e 2 dias respectivamente. Isto

ocorreu devido a que no solo, a retenção de água é maior, implicando em um menor efeito da gravidade e conseqüentemente reduzindo o processo de infiltração vertical. Relacionando-se as demais cargas positivas, observa-se também que as razões decrescem nos tempos de 1 e 2 dias, embora com pequenos valores de diminuição, mantendo-se praticamente constantes.

A taxa para 3 dias entre as cargas de 100 e -25 cm é 1,02 (38/37,2), aproximando-se do valor obtido a 4 dias 1,09 (45,8/42,0). Como para os espalhamentos, as infiltrações para 3 e 4 dias tendem a se estabilizar com a aplicação das altas cargas de 100 e 75 cm, sendo as referidas taxas de 1,00 (38/37,8) e 1,01 (45,8/45) respectivamente, (tabela 13). Pode-se então afirmar, que a aplicação de cargas hidrostáticas maiores que 50 cm, não contribuem para maiores infiltrações.

3.5.3 - Área de Influência do Bulbo Molhado

Analisando a formação do bulbo molhado, ou seja, a área espalhada e correspondente profundidade atingida pela infiltração, verifica-se no caso da areia, sob pressão de 50 cm, que o espalhamento de 19 cm e a infiltração vertical de 32,4 cm encontrados (tabela 12 e 13 respectivamente) aproximam-se muito dos valores encontrados por PIRES (1982) para a cultura do feijoeiro, que foram 20 e 30 cm respectivamente, com a aplicação da mesma carga.

No caso do solo, os espalhamentos radiais e as infiltrações verticais aumentam cada vez mais, e o motivo da escolha da extrapolação até o tempo de 4 dias foi para prever a exten

são do bulbo molhado nas direções horizontal e vertical, e conseqüentemente conhecer-se a área de influência de cada cápsula porosa, tendo em vista a necessidade de absorção d'água pelas raízes das plantas nessas direções.

Uma vez que o espalhamento radial (ou lateral) e a profundidade vertical são conhecidos para cada pressão e tempo, pode-se indicar as plantas cujas raízes são adequadas a essas dimensões.

Para o caso do solo, sob a pressão hidrostática negativa de -25 cm, os espalhamentos máximos radiais atingidos nos períodos de 1 e 4 dias, dão as áreas de influência respectivas do bulbo de 651 e 3.421 cm². Para as pressões de -25, de 50, 75 e 100 cm, as áreas obtidas para 4 dias são praticamente constantes enquanto que para 1 dia, essas áreas diferem muito. Com relação à infiltração, pode-se observar na tabela 13, que da mesma forma que nos espalhamentos radiais, os valores da mesma não diferem muito para o tempo de 4 dias, ficando entre 42 e 45,8 cm, da pressão de -25 para a de 100 cm respectivamente. Esta pequena variação não afeta o desenvolvimento normal das raízes das plantas.

No caso da areia, observa-se na tabela 12, que nos tempos de 1 e 2 dias de liberação de água, é grande a variação da área de formação do bulbo molhado entre as pressões de -25 e 100 cm, sendo em torno de 40,71; 352,90; 3.297 e 4.778,37 cm² respectivamente, e as correspondentes infiltrações são 19,20 ; 25,3; 48 e 60 cm respectivamente (tabela 13).

4 - DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE COM O TEMPO

Nesta etapa do trabalho serão discutidos os parâmetros observados, na areia e no solo, para as pressões hidrostáticas estudadas e tempos tomados como padrões. O desenvolvimento desta etapa está descrito com detalhes no Capítulo III, ítem 3.4. Os parâmetros são: Percentagem dos volumes ocupados pelas faixas de umidade; Espalhamento máximo radial das faixas de umidade e Infiltração vertical destas faixas.

Como dito anteriormente, foram realizados dois ensaios: para cada tipo de amostra, sendo que no caso da areia, foram a 15.000 e 22.000 s, à pressão hidrostática positiva de +75 cm, enquanto que no caso do solo foram a 100.000 e 123.000 s à pressão hidrostática negativa de -25 cm. As faixas dos teores de umidade consideradas para a areia foram: 0 - 5; 5 - 10; e maior que 10 %, enquanto que no solo foram: 0 - 5; 5 - 10; 10 - 15; 15 - 20 e maior que 20 %.

4.1 - Percentagem dos Volumes Ocupados pela Faixas de Umidade

As percentagens dos volumes ocupados pelas faixas de umidade, na areia e no solo, foram determinadas a partir dos perfis realizados para cada percentagem de teor de umidade, de acordo com o descrito no Capítulo III. Inicialmente foram calculados os volumes ocupados por cada faixa de umidade, a cada 5 cm de profundidade, somando-se em seguida os volumes de cada uma dessas camadas para obtenção do volume total ocupado por

cada uma delas, expresso em percentagem.

4.1.1 - Areia

As figuras 17 e 18 mostram a distribuição da umidade, a 15.000 e 22.000 s respectivamente, sob a carga positiva de +75 cm.

Observa-se na figura 17 que o volume ocupado pela faixa de 0 a 5 % de umidade é menor do que o volume ocupado pelas faixas de 5 a 10 e maior que 10 % de umidade, sendo que o maior volume foi ocupado na faixa de 5 a 10 %. Os valores das percentagens de volume ocupado por estas faixas são 21,73; 49,37 e 28,89 respectivamente, mostrados na tabela 16.

A figura 18 mostra que o volume ocupado pelas faixas de umidade cresce da faixa de 0 - 5 % para a de 5 - 10 % e diminui na faixa maior que 10 %, cujos valores são: 20,25; 61,35 e 18,40 % respectivamente, mostrados na tabela 16.

Comparando-se os tempos estudados, verifica-se que as percentagens dos volumes das faixas de umidade de 0 - 5 % e maior que 10 % são maiores para o tempo de 15.000 s, enquanto que na faixa de 5 a 10 % esta percentagem é maior no tempo de 22.000 s.

O aumento da percentagem dos volumes de 49,37 para 61,35 na faixa de 5 a 10 % de umidade entre os tempos estudados, e a posterior diminuição de 28,89 para 18,40 na faixa seguinte (maior que 10 %) mostra que o efeito da difusibilidade da frente úmida está se reduzindo com o tempo, e a gravidade está predominando na maior parte da matriz.

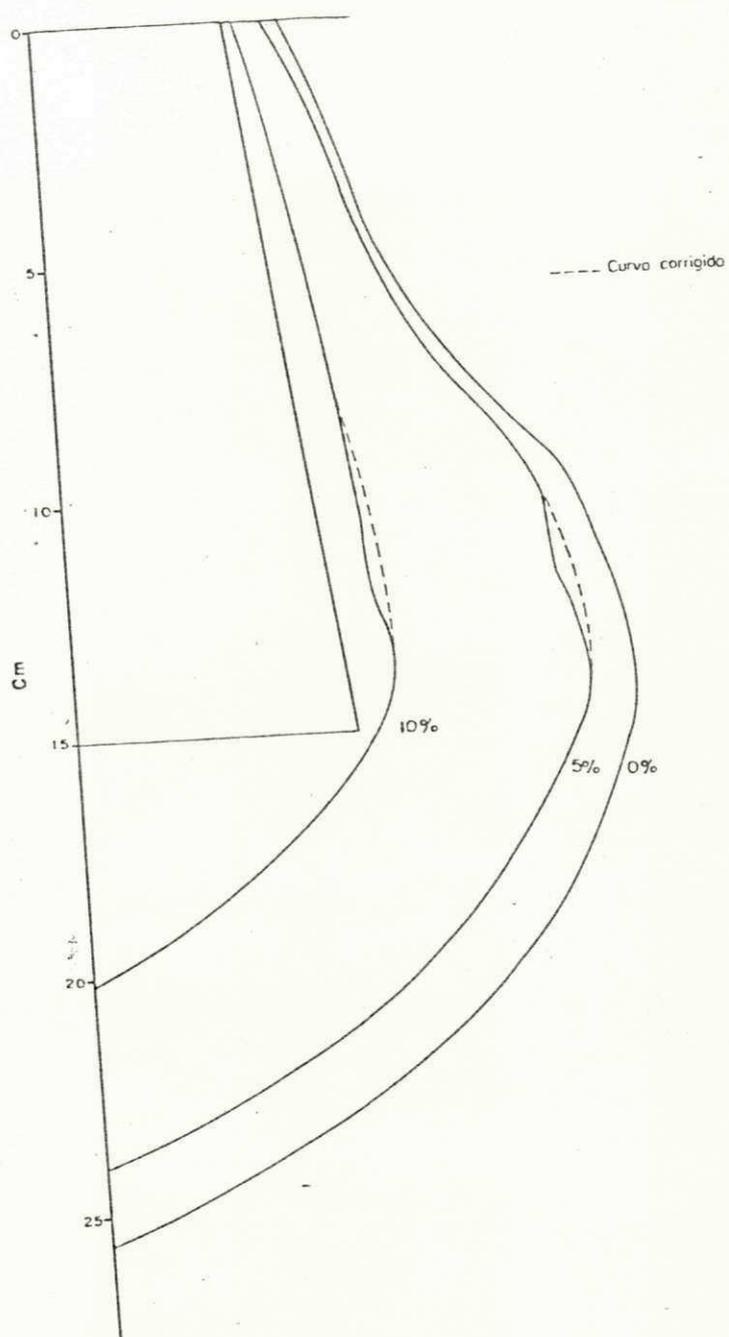


FIG. 17 - Distribuição da umidade no areio a 15.000 s para a pressão positiva de 75 cm.

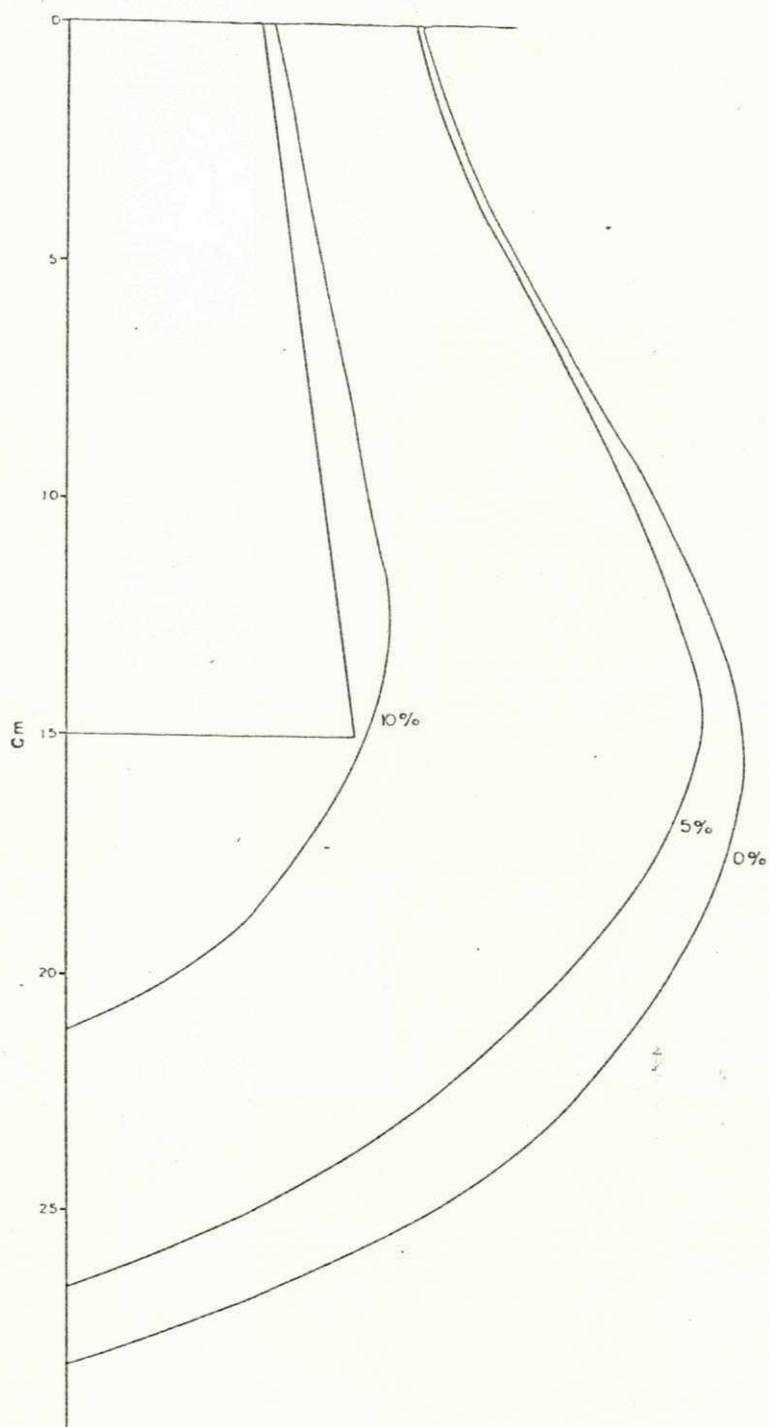


FIG.18 - Distribuição da umidade no ar a 22.000 s para a pressão positivo de 75 cm.

4.1.2 - Solo

As figuras 19 e 20 mostram a distribuição da umidade a 100.000 e 123.000 s respectivamente, sob a pressão hidrostática negativa de -25 cm.

Observa-se em ambas as figuras, que a faixa de percentagem de umidade que ocupou maior volume foi a de 15 a 20 %, seguida das faixas de 10 a 15, maior que 20, 5 a 10 e 0 a 5 %, nesta ordem.

Os valores das percentagens dos volumes das faixas de umidade consideradas para os tempos estudados são mostrados na tabela 17. Para o tempo de 100.000 s estes valores são: 5,22; 6,59; 23,05; 45,45 e 19,66 % respectivamente, enquanto que para 123.000 s são: 13,74; 14,78; 26,50; 27,77 e 17,17 % respectivamente.

Comparando-se os tempos de 100.000 e 123.000 s observa-se que as percentagens dos volumes das faixas de umidade de 0 - 5; 5 - 10 e 10 - 15 % são maiores a 123.000 s, enquanto que nas faixas de 15 - 20 e maior que 20 % são maiores a 100.000 s (tabela 17).

Como ocorrido na areia, ao passar do tempo, o efeito da difusibilidade reduz-se e os valores diminuem de 45,45 para 27,77 e de 19,66 para 17,17 nas faixas de 15 a 20 e maior que 20 % de umidade, respectivamente, enquanto que nas faixas anteriores de 0 a 5; 5 a 10 e 10 a 15 % os valores aumentam de 5,22; 6,59 e 23,05 para 13,74; 14,78 e 26,50, respectivamente, mostrando assim a ação predominante da gravidade, o que limita o espalhamento na direção radial, e aumenta a infiltração ver-

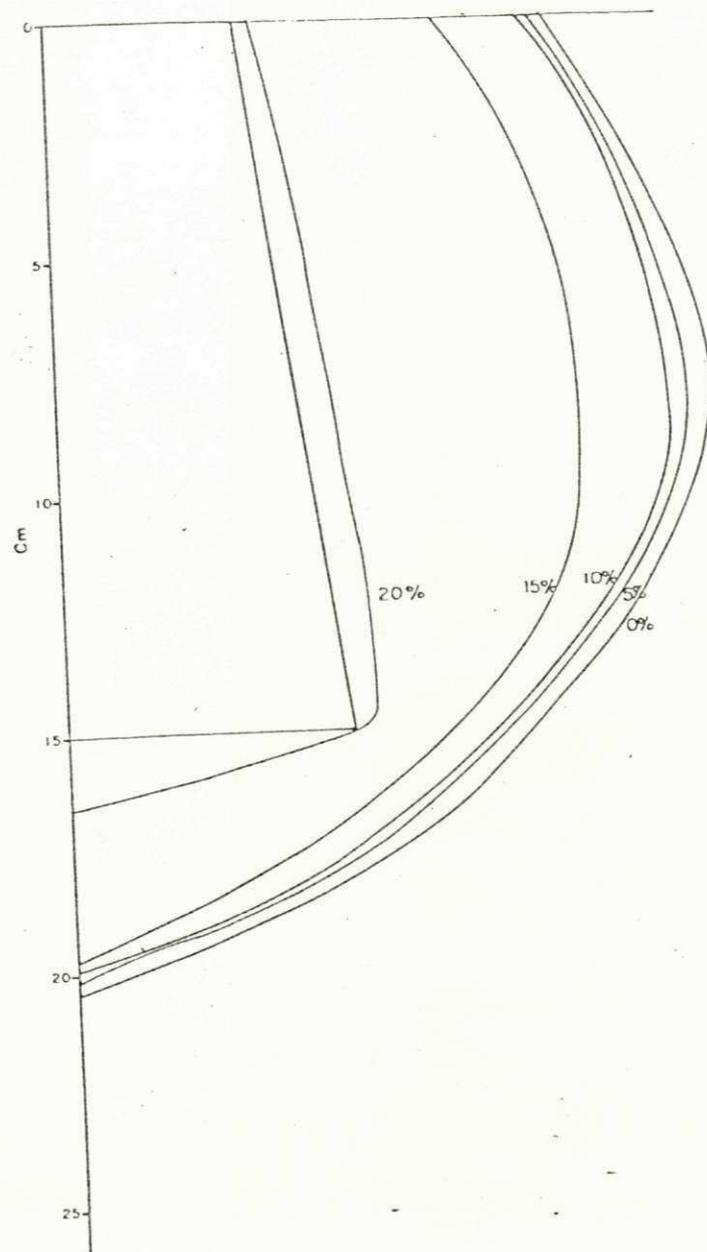


FIG. 19 - Distribuição da umidade no solo a 100.000 s para a pressão hidrostática negativa de -25 cm (Sucção).

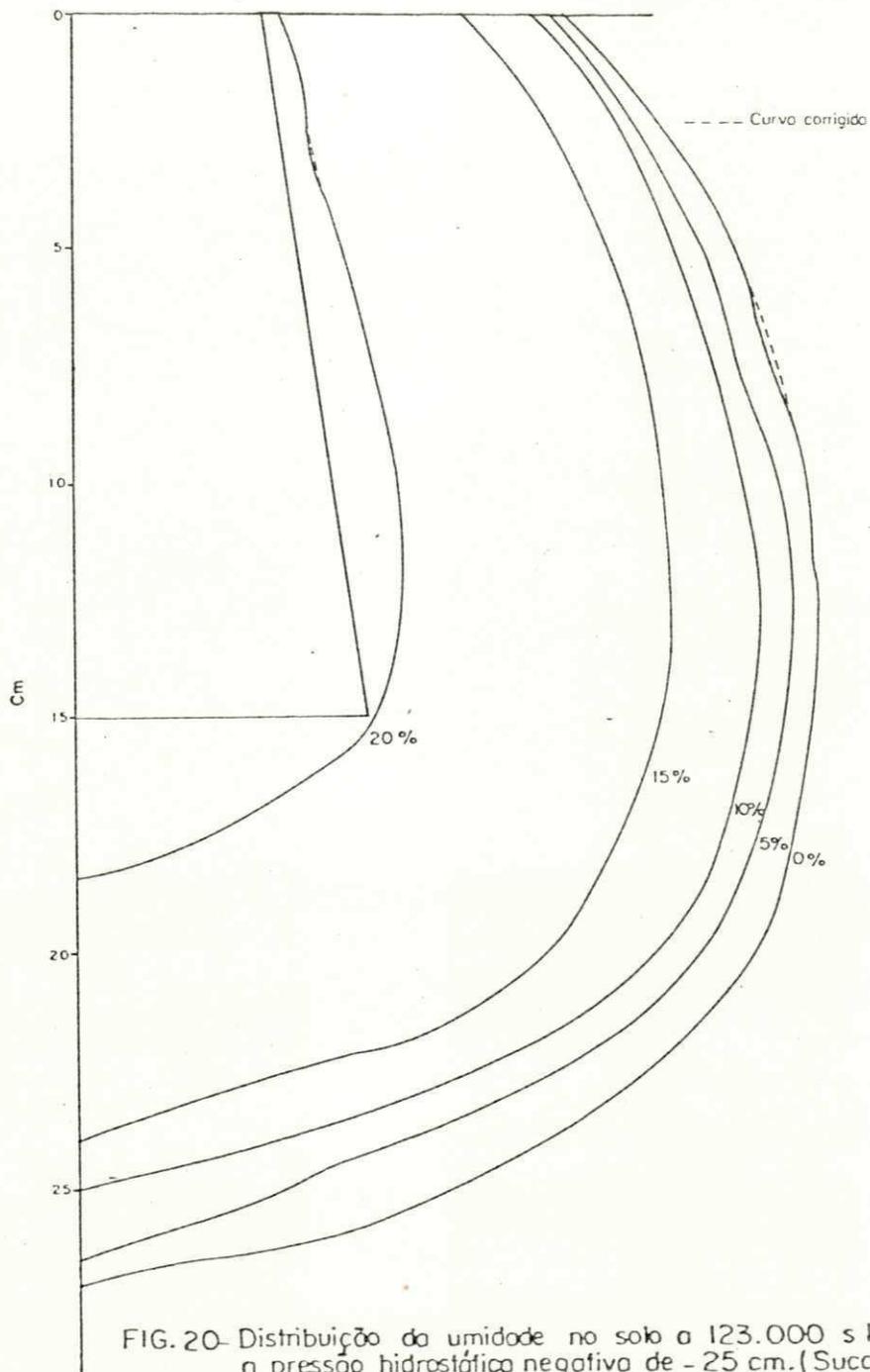


FIG. 20- Distribuição da umidade no solo a 123.000 s para a pressão hidrostática negativa de - 25 cm. (Succão).

Tabela 16 - Valores dos Parâmetros Estudados, na Distribuição de Umidade na Areia, nos Tempos de 15.000 e 22.000 s, para a Pressão Hidrostática Positiva de 75 cm

Faixas de Umidade %	Volumes das Faixas de Umidade - %		Espalhamentos das Faixas de Umidade - cm		Infiltrações das Faixas de Umidade - cm	
	Tempos - s		Tempos - s		Tempos - s	
	15.000	22.000	15.000	22.000	15.000	22.000
0 - 5	21,73	20,25	0,9	0,9	1,8	1,6
5 - 10	49,37	61,35	4,1	6,6	3,8	5,5
Maior que 10	28,89	18,40	1,0	0,9	5,0	6,3

Tabela 17 - Valores dos Parâmetros Estudados, na Distribuição de Umidades no Solo, nos Tempos de 100.000 e 123.000 s, para a Pressão Hidrostática negativa de -25 cm

Faixas de Umidade %	Volumes das Faixas de Umidade - %		Espalhamentos das Faixas de Umidade - cm		Infiltrações das Faixas de Umidade - cm	
	Tempos - s		Tempos - s		Tempos - s	
	100.000	123.000	100.000	123.000	100.000	123.000
0 - 5	5,22	13,74	0,4	0,6	0,20	0,6
5 - 10	6,59	14,78	0,4	0,7	0,20	1,4
10 - 15	23,05	26,50	1,8	1,8	0,20	1,1
15 - 20	45,45	27,77	4,9	5,7	3,40	5,5
Maior que 20	19,66	17,17	0,7	1,1	1,60	3,5

tical cada vez mais.

4.2 - Espalhamentos Máximos Radiais

Da mesma maneira que para as percentagens de volume ocupado nas faixas de umidade, os espalhamentos máximos radiais foram obtidos a partir de perfis realizados para cada percentagem de teor de umidade. Foi determinado para cada faixa considerada o espalhamento correspondente, pela diferença entre os valores dos espalhamentos máximos radiais dos teores de umidade da faixa desejada, e este espalhamento foi expresso em cm.

4.2.1 - Areia

Os valores dos espalhamentos máximos radiais para os tempos estudados, à pressão de 75 cm, estão apresentados na tabela 16. Observa-se que em ambos os tempos considerados, o espalhamento aumentou da primeira (0 - 5 %) para a segunda faixa (5 - 10 %), e decresceu em seguida na terceira faixa (maior que 10 %) de teores de umidade.

Comparando-se os tempos de 15.000 e 22.000 s observa-se na tabela 16, que a frente úmida manteve os valores dos espalhamentos nas faixas de 0 a 5 % e maior que 10 %, enquanto que para a faixa de 5 a 10 % de umidade, o espalhamento aumentou de 4,1 para 6,6 cm o que é substancial para comprovar que a gravidade age mais fortemente do que a difusibilidade, com o decorrer do tempo.

4.2.2 - Solo

Os valores dos espalhamentos radiais para os tempos estudados, sob a sucção de -25 cm, estão mostrados na tabela 17. Observa-se que os valores, para ambos os tempos estudados, aumentam da faixa de 0 a 5 % até a de 15 a 20 % de umidade diminuindo em seguida na faixa maior que 20 % de umidade.

A frente úmida, que é responsável pela propagação da umidade parece estender-se de 0 até 15 %, onde o espalhamento varia de 2,6 a 3,1 cm nos tempos de 100.000 e 123.000 s, respectivamente.

As percentagens médias do volume molhado desta faixa de umidade para os tempos referidos variaram de 11,62 para 18,34, mostrando assim pequenos aumentos (tabela 17).

Na faixa de 15 a 20 %, a variação da percentagem do volume ocupado foi de 45,45 para 27,77 a 100.000 e 123.000s, respectivamente, em consequência do grande aumento no volume molhado de 100.000 a 123.000 s (de 7.650 para 10.505 cm³, tabela 8). Verificou-se também que o correspondente aumento no valor do volume liberado variou de 2.645 para 3.280 ml, nas mesmas condições de tempo.

4.3 - Infiltração Vertical

As infiltrações verticais foram determinadas a partir das curvas traçadas para cada percentagem de teor de umidade. Para cada faixa de umidade, a infiltração vertical foi dada pela diferença entre os valores das infiltrações verticais dos

teores de umidade da faixa considerada, e o valor expresso em cm.

4.3.1 - Areia

Os valores das infiltrações verticais para os tempos estudados, à pressão positiva de 75 cm, estão apresentados na tabela 16. Observa-se que houve um súbito aumento de 1,8 para 3,8 cm e de 1,6 para 5,5 cm nas faixas de 0 a 5% e 5 a 10 % de umidade nos tempos de 15.000 e 22.000 s respectivamente, devido a uma maior acumulação de água, o que concorre para a atuação predominante da gravidade.

Comparando-se os valores de infiltração para os tempos de 15.000 e 22.000 s, verifica-se que as infiltrações verticais são maiores em todas as faixas de umidade para o tempo de 22.000 s (tabela 16) exceto na faixa de 0 a 5 % de umidade.

4.3.2 - Solo

Os valores de infiltração vertical nos tempos estudados, sob a pressão negativa de -25 cm, são mostrados na tabela 17.

Para o tempo de 100.000 s, a infiltração vertical permaneceu constante em 0,20 cm nas faixas de 0 - 5; 5 - 10 e 10-15% de umidade, aumentando para 3,40 cm na faixa de 15 - 20 % e diminuindo para 1,60 cm para valores de umidade maiores que 20 %.

Para o tempo de 123.000 s, não verificou-se uma tendência

fixa de aumentar ou diminuir, nos valores de infiltração vertical para as faixas de teores de umidade consideradas, que registraram variações alternadas.

Observa-se que ocorreu um súbito aumento no valor da infiltração vertical de 0,20 para 3,40 e de 1,1 para 5,5 cm a 100.000 e 123.000 s respectivamente, da faixa de 10 - 15 para a de 15 - 20 % de umidade, semelhantemente ao registrado no caso da areia (tabela 17).

Comparando-se os valores para os tempos considerados, verifica-se na tabela 17, que são maiores as infiltrações verticais observadas a 123.000 s em todas as faixas de teores de umidade. As diferenças significativas entre os valores das infiltrações nos tempos de 100.000 e 123.000 s para as faixas de 15 - 20 e maior que 20 % de umidade, foram em torno de 2 cm devido ao efeito dominante da gravidade. Essas diferenças diminuem para as faixas de umidade menores que 15 % devido à maior parte do solo não estar saturado ainda, existindo vazios e assim, a gravidade tem menor influência, apesar de haver acréscimos na infiltração, como mostra a tabela 17.

5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como visto no item 3, foram obtidos valores, na areia e no solo, para os volumes liberados de água, volumes molhados, espalhamentos máximos radiais e infiltrações verticais. Para assegurar a validade desses resultados foi feita uma análise do comportamento de uma variável em relação a outra.

Neste item, será considerada a precisão dessas variáveis e também serão analisados os valores de liberação d'água obtidos de acordo com os testes de uniformidade a serem discutidos.

5.1 - Considerações Gerais

No estudo dos fenômenos físicos, as diversas variáveis podem ser estudadas simultaneamente para se observar como estão inter-relacionadas; em outros casos há uma variável de particular interesse e as demais variáveis são estudadas pela sua possível ajuda em trazer esclarecimento sobre essa variável particular. Essas duas classes de problemas estão comumente associadas aos termos de correlação e regressão respectivamente (HOEL, 1963).

Os métodos de correlação são usados quando se está interessado em estudar como duas ou mais variáveis estão inter-relacionadas. Entretanto, é comum estudar-se a relação entre variáveis a fim de que se encontre qualquer relação que possa ser utilizada para fazer estimativas ou previsões de uma variável particular. O coeficiente de correlação está ligado à determi

nação da intensidade de relação linear entre as variáveis, não sendo capaz de resolver problemas de previsão.

, Para os fenômenos de hidrologia e física dos solos, uma correlação abaixo de 0,6 não é considerada boa.

Os métodos destinados a lidar com problemas de previsão são conhecidos como métodos de regressão e podem ser explicados considerando-se os parâmetros estudados como X e Y em cada caso, e verificar-se-ã que estão relacionados de modo aproximadamente linear (figura 21).

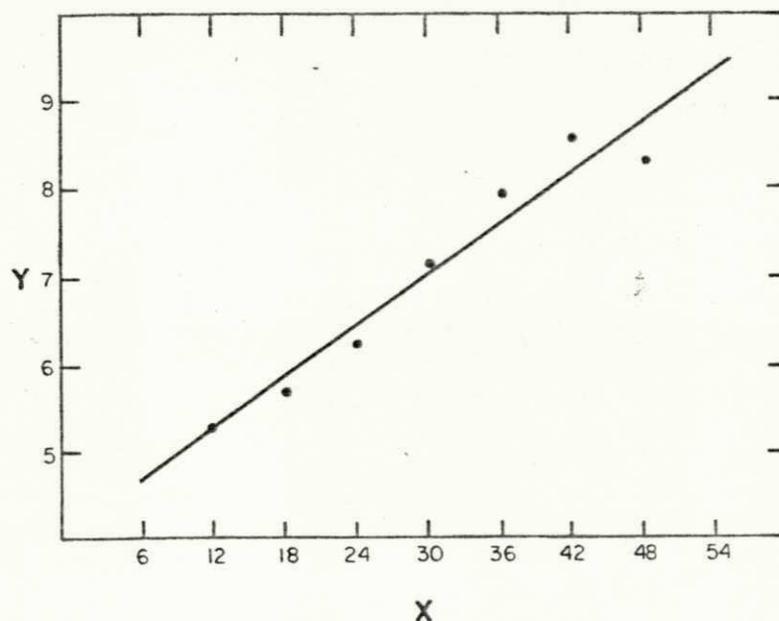


FIG.21 - Diagrama de dispersão para as variáveis X e Y (hipotético).

Uma linha reta será então ajustada a esse conjunto de pontos com o propósito de tentar prever o valor de Y com base no valor de X , e diz-se então que tem-se uma regressão de Y para X , visto que Y é avaliado a partir de X .

Geralmente a reta de regressão de Y para X não é a mesma de X para Y (SPIEGEL, 1961).

Admitindo-se um grande número de repetições nas experiências realizadas e calculando-se a média separadamente dos valores de Y correspondentes a cada um dos muitos valores de X , seria obtida uma relação entre X e Y extremamente linear que seria tanto mais precisa quanto maior fosse o número de repetições efetuadas.

5.2 - Análise de Regressão

Os valores de correlação, das declividades e dos interceptos das linhas de regressão de Y para X e de X para Y foram calculados utilizando-se o programa da calculadora TI-51-III.

A seguir serão apresentados os valores dos coeficientes de correlação e as linhas de regressão de Y para X e de X para Y para os casos de: volumes liberados d'água x volumes molhados; volumes liberados x cargas aplicadas; espalhamentos x cargas aplicadas; taxas dos espalhamentos x cargas aplicadas; infiltrações verticais x cargas aplicadas; taxas de infiltrações x cargas aplicadas e testes de uniformidade na liberação d'água por cápsulas porosas.

5.2.1 - Volumes Liberados x Volumes Molhados

Como visto anteriormente, os volumes liberados e molhados encontram-se nas tabelas 6 e 8 respectivamente.

Os valores dos coeficientes de correlação e as linhas de regressão dos volumes liberados x volumes molhados, areia e no solo, sob as cargas hidrostáticas aplicadas são:

AREIA

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coefficientes de Correlação (r)	Linhas de Regressão
-25	0,9644	Y para X \rightarrow $Y = 0,253x + 0,81$
		X para Y \rightarrow $Y = 3,68x - 2,6104$
50	0,9984	Y para X \rightarrow $Y = 0,57x + 6,37$
		X para Y \rightarrow $Y = 1,7479x - 10,82$
75	0,9939	Y para X \rightarrow $Y = 0,1706x + 20,13$
		X para Y \rightarrow $Y = 3,2786x - 26,68$
100	0,9907	Y para X \rightarrow $Y = 0,2560x + 14,04$
		X para Y \rightarrow $y = 3,8335x - 50,84$

SOLO

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coefficientes de Correlação (r)	Linhas de Regressão
-25	0,9962	Y para X \rightarrow $Y = 0,3362x - 0,2463$
		X para Y \rightarrow $Y = 2,9540x + 0,9600$
75	0,9944	Y para X \rightarrow $Y = 0,6080x + 5,603$
		X para Y \rightarrow $Y = 1,64x - 9,127$

Em todos os casos, o coeficiente de correlação mostrou-

se alto, variando entre 0,9644 e 0,9984, significando que há uma coerência nos resultados encontrados nas experiências realizadas, e uma boa relação entre os volumes liberados e molhados.

5.2.2 - Volumes Liberados x Cargas Aplicadas

Como já visto, a tabela 7 mostra que os valores experimentais obtidos para a areia são 4, enquanto que no solo apenas 2, sendo os demais valores obtidos por inter ou extrapolação.

Os coeficientes de correlação e as linhas de regressão linear, para os volumes liberados x cargas aplicadas são:

AREIA

Coeficiente de Correlação (r)	Linhas de Regressão
0,99	Y para X \rightarrow $Y = 0,08x + 2,63$
	X para Y \rightarrow $Y = 1,97x + 25,13$

SOLO

Coeficiente de Correlação (r)	Linhas de Regressão
1,00	Y para X \rightarrow $y = 0,08x + 4,45$
	X para Y \rightarrow $Y = 2,80x + 45,07$

O alto coeficiente de correlação de 1,00 para o solo é devido à aplicação de apenas 2 cargas, resultando uma relação extremamente linear.

5.2.3. -- Espalhamentos Radiais na Areia e no solo para as Diferentes Cargas

Os espalhamentos para a pressão de -25 cm na areia não foram comparados com os das pressões positivas, uma vez que os tempos diferiam muito (tabela 10) e devido também ao lento desenvolvimento da fronteira úmida.

Para os casos das pressões positivas, os espalhamentos na areia foram comparados e os coeficientes de correlação e as linhas de regressão são:

Cargas Hidrostáticas	Coeficiente de	Linhas de Regressão
Δh (cm)	Correlação (r)	Y para X e X para Y
50 e 75	0,554	Y para X $\rightarrow Y = 0,002x + 10,620$ X para Y $\rightarrow Y = 0,424x + 4,439$
75 e 100	0,894	Y para X $\rightarrow Y = 1,446x + 0,646$ X para Y $\rightarrow Y = 2,261x + 21,179$

Para as taxas dos espalhamentos na areia (tabela 10), tem-se os seguintes valores de coeficientes de correlação e linhas de regressão:

Cargas Hidrostáticas	Coeficientes de	Linhas de Regressão
Δh (cm)	Correlação (r)	Y para X e X para Y
50 e 75	0,554	Y para X $\rightarrow Y = 0,836x + 0,00027$ X para Y $\rightarrow Y = 1,061x - 0,000204$
75 e 100	0,894	Y para X $\rightarrow Y = 0,310x + 0,00083$ X para Y $\rightarrow Y = 0,952x - 0,0001$

Observa-se com evidência, a identidade entre os coefi cientes de correlação dos espalhamentos e os de suas taxas, pois ambos referem-se ao mesmo tempo, sendo que a taxa é a re lação entre o espalhamento (cm) e o respectivo tempo (s).

No caso do solo, como sô foram aplicadas as pressões de -25cm e 75 cm, para efeito de comparação, foi feita interpola ção para o valor do espalhamento a 10.000 s, sob a pressão de 75 cm. Para o tempo de 40.000 s, sob a mesma condição de pres são, não foi feita extrapolação porque não foi possível obter-se uma previsão exata do valor a ser alcançado.

O valor do coeficiente de correlação e as linhas de re gressão para os espalhamentos são:

Cargas Hidrostáticas	Coeficientes de	Linhas de Regressão
Δh (cm)	Correlação (r)	
-25 e 75	1,00	Y para X \rightarrow $Y = 1,2273x + 0,8136$ X para Y \rightarrow $Y = 0,8148x - 0,6629$

Para as correspondentes taxas dos espalhamentos tem-se que o valor de correlação é:

Cargas Hidrostáticas	Coeficiente de
Δh (cm)	Correlação (r)
-25 e 75	1,00

Os coeficientes dos espalhamentos e respectivas taxas são iguais conforme explicação anterior.

O alto coeficiente de correlação para os espalhamentos e suas taxas no solo, é devido à comparação ter sido feita com poucos valores, ou seja, apenas com os referentes aos tempos de 10.000 e 20.000 s.

5.2.4 - Infiltrações Verticais na Areia e no Solo para as Diferentes Cargas

Da mesma forma que nos espalhamentos radiais, observa-se na tabela 11 que as infiltrações na areia, para a expressão negativa de -25 cm não podem ser comparadas com as das pressões positivas uma vez que os tempos diferem muito, como também a frente úmida desenvolve-se vagarosamente.

Para o caso das pressões positivas na areia, as infiltrações foram comparadas e os resultados são:

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coefficiente de Correlação (r)	Linhas de Regressão
50 e 75	0,726	Y para X $\rightarrow Y = 3,36x - 51,61$
		X para Y $\rightarrow Y = 1,36x - 10,13$
75 e 100	0,840	Y para X $\rightarrow Y = 0,718x + 7,457$
		X para Y $\rightarrow y = 1,096x - 4,640$

Para as correspondentes taxas de infiltração na areia, esses valores são:

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coefficiente de Correlação (r)	Linhas de Regressão
50 e 75	0,726	Y para X $\rightarrow Y = 0,9898x + 0,00023$
		X para Y $\rightarrow Y = 1,0048x - 0,000223$
75 e 100	0,840	Y para X $\rightarrow Y = 0,8352x + 0,00025$
		X para Y $\rightarrow Y = 1,5x10^{-6}x + 1,3x10^{-3}$

No caso do solo, para efeito de comparação, os valores das infiltrações e suas taxas, a 10.000 e 40.000 s foram inter

e extrapolados respectivamente ; sob a pressão de 75 cm.

Para as infiltrações verticais (tabela 11), o coeficiente de correlação e as linhas de regressão são:

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coeficiente de Correlação (r)	Linhas de Regressão
-25 e 75	0,9901	Y para X \rightarrow Y = 3,009x - 40,83 X para Y \rightarrow Y = 0,3305x + 113,33

Para as correspondentes taxas de infiltração (tabela 11) tem-se:

Cargas Hidrostáticas Δh (cm)	Coeficientes de Correlação (r)	Linhas de Regressão
-25 e 75	0,9901	Y para X \rightarrow Y = 0,9195x + 0,000063 X para Y \rightarrow Y = -2,323x + 0,00579

Neste caso os valores comparados foram referentes aos tempos de 10.000, 20.000 e 40.000 s.

5.3 - Testes de Uniformidade na Liberação D'água por Cápsulas Porosas

Neste caso, foram comparadas as vazões médias liberadas obtidas em 3 repetições efetuadas com 40 cápsulas porosas novas, em série de 10 cápsulas interligadas entre si e todas a um reservatório de abastecimento que fornecia uma pressão hidrostática de 75 cm, durante 15 minutos. Essas cápsulas têm características semelhantes à da cápsula utilizada no estudo da propagação da frente úmida, e foram instaladas, livremente, sem contato com a amostra (areia ou solo).

Com o procedimento acima descrito, é evidente que pode-se garantir uma pequena diferença entre as cargas aplicadas na primeira e última cápsula, apesar da curta extensão da série de cápsulas. Esta diferença é devido a perda de carga ao longo das cápsulas transferida de uma a outra cápsula o que só não ocorreria se não existisse fluxo da cápsula para o meio ambiente, e aí teríamos a mesma carga agindo sobre cada cápsula. Entretanto, quando as cápsulas começam a liberar água, há, uma variação na vazão devido à variação na carga.

Os valores médios de vazão obtidos das 3 repetições citadas são:

370 ; 283 ; 270 ; 567 ; 730 ; 477 ; 617 ; 477 ; 317 ; 553 ;
 337 ; 227 ; 533 ; 500 ; 667 ; 503 ; 553 ; 557 ; 150 ; 273 ;
 327 ; 623 ; 627 ; 487 ; 263 ; 580 ; 410 ; 533 ; 620 ; 620 ;
 633 ; 183 ; 763 ; 913 ; 190 ; 660 ; 150 ; 603 ; 427 ; 300 ml.

Observa-se na amostragem acima, que as vazões variam de 150 a 913 ml, sendo o valor médio 471,83 ml.

É interessante notar que as variações ocorridas na amostragem acima não foram decrescentes e sucessivas como era esperado, sem que ocorressem necessariamente as máximas no início e as mínimas no final de cada série de cápsulas, de acordo com a ordem em que foi colocada a série.

Por exemplo, na primeira experiência a liberação máxima foi registrada na 5.^a cápsula e a mínima na 2.^a cápsula, sendo a média 466,10 que corresponde aproximadamente ao valor de liberação d'água da 6.^a cápsula (477 ml).

Isto deve-se à grande não-uniformidade da liberação d'água entre as referidas cápsulas, pelas imperfeições na construção da mesma.

Foram então, determinados os valores do desvio padrão, do valor médio, da variância, correlação e do coeficiente de variação, de acordo com SPIEGEL (1961), a fim de comprovar essa variação. Os valores obtidos em ml/15 minutos foram:

Valor médio	:	471,83
Desvio padrão	:	184,23
Variância (s^2)	:	33.940,69
Correlação	:	0,08
Coeficiente de variação (cv):		39 %

Estes valores comprovam uma grande não uniformidade entre as liberações de água nas amostras citadas.

Devido a essas grandes variações nas vazões médias, foi feita uma outra tentativa, utilizando-se o método dos agrupamentos, distribuindo as liberações em 8 grupos diferentes com intervalos de 100, mostrados na tabela 18. Essa tabela apresenta ainda a frequência de ocorrência dos grupos e os dados necessários à obtenção do desvio padrão, e do coeficiente de variação. O desvio padrão e o coeficiente de variação então calculados foram 178,25 e 37,77 %, ratificando os resultados obtidos anteriormente e demonstrando mais uma vez a grande não-uniformidade na liberação d'água por cápsulas porosas. Os valores dos desvios-padrão obtidos nos dois casos, de 184,23 e 178,25 ml liberados em 15 minutos correspondem às vazões de 17,68 e 17,08 l/dia, respectivamente.

Porém, esta não uniformidade não altera os resultados do presente estudo, uma vez que no mesmo foi utilizada a cápsula em contato direto com a amostra (areia ou solo).

Tabela 18 - Grupos das liberações d'água, e frequência de ocorrência das mesmas.

Grupos de liberações d'água (ml/15min)	Ponto médio X (ml/15min)	Média de 40 amostras- \bar{X} (ml/15min)	Desvio X - \bar{X} (ml/15min)	Desvio ao quadrado (X - \bar{X}) ²	Frequência f	Frequência x desvio ao quadrado (X - \bar{X}) ²
150 - 250	200	471,83	- 271,83	73.891,55	5	369.457,75
251 - 350	300		- 171,83	29.525,55	8	236.204,40
351 - 450	400		- 71,83	5.159,55	3	15.478,65
451 - 550	500		28,17	3.793,55	7	5.554,85
551 - 650	600		128,17	16.427,55	12	197.130,60
651 - 750	700		228,17	52.061,55	3	156.184,65
751 - 850	800		328,17	107.695,55	1	107.695,55
851 - 950	900		428,17	183.329,55	1	183.329,55
Σ	-	-	-	-	N=40	1.271.036,00

6 - APLICAÇÃO PRÁTICA DO USO DA CÁPSULA POROSA NUMA CONDIÇÃO HIPOTÉTICA DE CAMPO

Neste ítem, será mostrado o procedimento para instalação e manejo de um sistema de irrigação por cápsulas porosas no campo. Será apresentada também, a aplicação, em termos práticos, dos resultados obtidos no presente estudo, para uma condição de campo, embora o trabalho tenha sido realizado em laboratório, fazendo-se as necessárias comparações com outros estudos.

6.1 - Preparo do Solo e Montagem do Sistema

Para a instalação do sistema de irrigação por cápsulas porosas, inicialmente é feito o preparo da terra, com a aração e gradagem da área a ser utilizada, e em seguida é feita a abertura das covas para colocação das cápsulas com espaçamento adequado à cultura a ser utilizada. Pode-se utilizar um espaçamento de 2 x 2 m entre as cápsulas, com 0,90 m de diâmetro e 0,60m de profundidade, supondo a cultura do feijão a ser irrigada, segundo PIRES (1982).

Depois da abertura das covas, recoloca-se o solo em sentido contrário ao da retirada, com a finalidade de aumentar a porosidade do solo, e proporcionar uma melhor aeração para as raízes. Em seguida, é feita a instalação das cápsulas porosas no centro das covas, a uma profundidade de 5 cm abaixo da superfície, de acordo como foi feito no laboratório. Essas cápsulas devem ser conectadas através de uma mangueira com 1,50cm de

diâmetro e ligadas a um reservatório de abastecimento d'água, sendo mantida a carga desejada.

No plantio da cultura, o semeio deve ser feito manualmente, sendo que o número de sementes por cova depende das conveniências de cada situação, e o número de covas depende do desenvolvimento do bulbo molhado. No nosso caso, supõe-se que foram colocadas 3 sementes de feijão por cova, sendo essas covas igualmente espaçadas, e a uma distância radial em torno da cápsula porosa que depende do espaçamento obtido. O desbaste foi feito após 15 dias do início da germinação, conservando apenas uma planta por cova, e retiradas as demais plantas.

6.2 - Determinação do Número de Covas e Espaçamento entre elas, no Lote Experimental

Admitindo-se que a área experimental (hipotética) tenha 12 m de largura vezes 20 m de comprimento, abrangendo assim 240 m^2 , verifica-se então, que a mesma acomodaria 60 cápsulas porosas em um espaçamento de 2 x 2m, e o croqui para esse arranjo está apresentado na figura 22.

Como já citado, o número de covas e o espaçamento entre elas depende do desenvolvimento do bulbo molhado.

Para a determinação do número de covas, para a areia e solo, foram considerados diferentes espaçamentos médios entre as mesmas.

No caso da areia, sob pressão hidrostática de 50 cm, considerando o espalhamento de 25,60 cm para 2 dias (tabela 12), obtem-se um perímetro circular ao redor da cápsula de aproximada

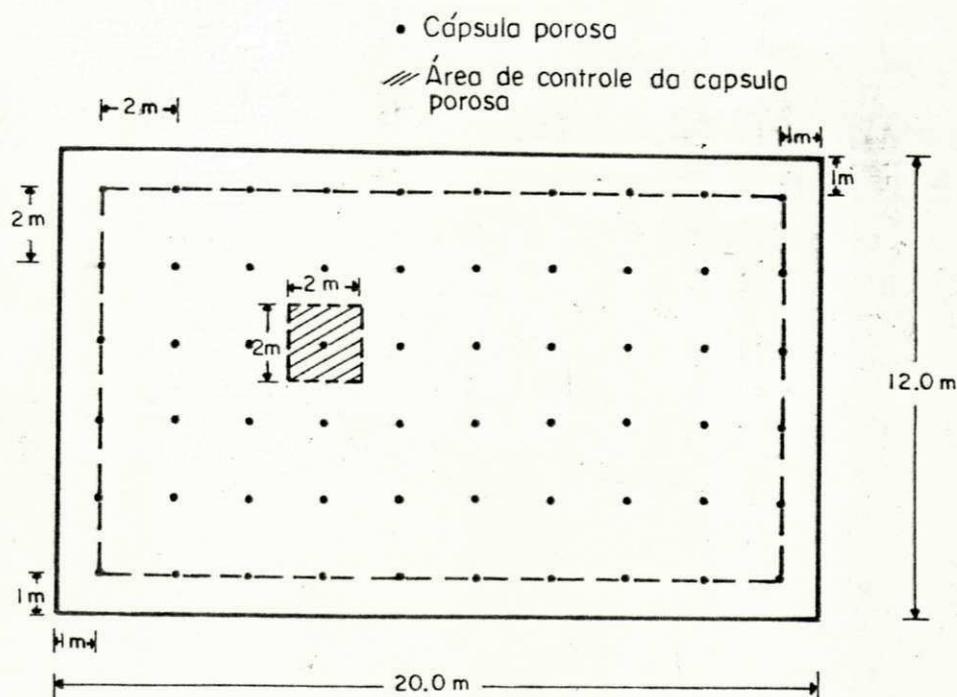


FIG.22 - Croqui da área experimental hipotética de 240 m² irrigadas por cápsulas porosas.

mente 160 cm, o que daria um número de 6 covas para um espaçamento de 27 cm entre elas. Para fins de comparação, observa-se que na mesma condição de pressão ($\Delta h = 50$ cm), PIRES (1982) utilizou 7 covas por cápsula porosa para a cultura do feijão num solo de textura franco-arenoso com uma distância radial de 30 cm em torno de cada cápsula porosa, e um espaçamento entre as covas de 27 cm.

Para a pressão de 100 cm, nas mesmas condições de tempo (2 dias) na areia, o espalhamento foi 39 cm (tabela 12). Isto determina um perímetro circular de aproximadamente 240 cm em torno da cápsula, o que implicaria em um número de 9 covas com espaçamento de 27 cm entre si. Admitindo-se um espaçamento de 25 cm entre covas, pode-se obter um maior número de covas e

consequentemente mais plantas ao redor da cápsula, ou seja, 10. Os volumes d'água liberados nesses casos foram 819,60 (6,83 l/dia x 2 dias x 60 cápsulas) e 1.332 litros (11,10 l/dia x 2 dias x 60 cápsulas), respectivamente (tabela 7).

No solo, os espalhamentos radiais extrapolados para a determinação do número de covas, foram os correspondentes ao tempo de 4 dias, devido a que os valores dos espalhamentos foram menores. Sob a pressão hidrostática de 50 cm, o espalhamento radial foi 33,50 (tabela 12), e isto dá um perímetro circular de 210 cm, o que implicaria em um número de 8 covas com espaçamento médio de 27 cm entre elas. Admitindo-se um espaçamento médio de 21 cm, o número de covas seria 10. Para a pressão de 100 cm com espalhamento de 34,50 cm, o perímetro circular em torno da cápsula porosa é 216 cm, e isto dá um número de 8 covas, para 27 cm de espaçamento entre elas, enquanto que para um espaçamento de 24 cm, o número de plantas (covas) eleva-se para 9. Os volumes d'água liberados nesses casos são 2.064 l e 3.108 l respectivamente, observando-se que o volume d'água liberado à pressão de 100 cm a 4 dias é quase 1,5 vezes maior que o volume liberado à pressão de 50 cm, sendo então mais viável a aplicação da carga de 50 cm, uma vez que os espalhamentos não diferem muito.

Para a carga de -25 cm, o número de covas determinado para o tempo de 4 dias, com um espalhamento de 33,0 cm e um perímetro circular de 207 cm, foi de 8 covas, com um espaçamento médio de 27 cm entre elas. Isto significa dizer que o número de covas seria o mesmo já determinado para as pressões positivas, uma vez que os espalhamentos foram praticamente os mesmos

(tabela 12). Com isso, verifica-se que com a aplicação da sucção, pode-se-ia obter os mesmos resultados e com o uso de menor quantidade de água, pois no final de 4 dias, o volume total liberado é de apenas 568,80 l.

Todavia, na areia, a aplicação da sucção a 22 dias, não é viável, devido ao espalhamento ser apenas 10,60 cm (tabela 12), o que daria um perímetro circular de apenas 66,60 cm ao redor da cápsula, acomodando 3 plantas por cápsulas espaçadas de 22 cm entre si. Além disso, a infiltração foi apenas 25,3 cm o que não satisfaz as exigências das raízes das plantas.

Assim, o planejamento das covas para determinada cultura depende do tipo de solo utilizado e das pressões hidrostáticas aplicadas (positiva ou negativa).

6.3 - Liberação D'água pela Cápsula Porosa Durante o Ciclo do Cultivo

Baseado em estudos similares, o tempo considerado para a medição de liberação d'água pela cápsula porosa durante o ciclo do cultivo foi 74 dias de acordo com SILVA (1980), embora a fase de maturação total seja de 85 dias.

Para a pressão de 50 cm na areia, o volume liberado pela cápsula utilizada nos 74 dias é $0,505 \text{ m}^3$ ($6,83/1000 \text{ m}^3/\text{dia} \times 74 \text{ dias}$), (tabela 7) na área de controle de 4 m^2 (figura 22). Esse volume corresponde a uma liberação de $1.263,5 \text{ m}^3/\text{ha}$, obtido por um fator conversão de 2.500.

No caso do solo, para as mesmas condições de pressão e tempo, o volume liberado pela cápsula utilizada foi $0,636 \text{ m}^3$,

na mesma área de controle, o que corresponde a $1.591 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Para a pressão negativa de -25 cm no solo, obteve-se um volume liberado de $0,175 \text{ m}^3$ na mesma área abrangida pela cápsula, em 74 dias, o que significa um volume de $438,45 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Observa-se que a maior economia de água entre os 3 casos acima citados, ocorreu na pressão negativa de -25 cm no solo onde somente $438,45 \text{ m}^3/\text{ha}$ foram necessários durante o ciclo do cultivo. Com a pressão de 50 cm entre o solo e a areia, deve-se optar pela areia, onde o volume de água necessário é da ordem de $1.263,5 \text{ m}^3/\text{ha}$, menor que no solo, apesar da retenção de água ser maior neste, e isso também deve ser considerado.

Assim, conclui-se que a escolha da carga para determinação do volume de água liberado, depende da cultura a ser irrigada e do tipo de solo em que se irá plantar.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O estudo sobre a propagação em três dimensões da frente úmida, por cápsulas porosas propiciou as seguintes conclusões:

i) A pesquisa tridimensional, conduzida num modelo físico reduzido, com cápsulas porosas liberando água na areia e no solo permitiu estudos mais detalhados sobre os parâmetros relacionados com o desenvolvimento da frente úmida, fornecendo informações adequadas para a adaptação da cápsula porosa para fins agrícolas.

ii) O sistema eletrônico de aquisição de dados foi de máxima utilidade, porque além de fornecer dados continuamente, não perturbava a amostra (areia ou solo) e fornecia informações úteis e precisas sobre o tempo decorrido para que a frente úmida atingisse os diferentes pontos no espaço tri-dimensional da matriz estudada.

iii) O estudo que envolveu a tensão capilar (sucção) revelou que, com a aplicação inicial da sucção para a amostra saturada (34 % para a areia e 35,75 % para o solo), o solo ofereceu maior resistência à retirada d'água do que a areia, porém, com sucessivas aplicações de sucção, a areia ofereceu maior resistência do que o solo, como mostram os gradientes. Esses resultados mostram que o solo é mais adequado à retenção de água, em relação à areia que drena com maior rapidez.

iv) Sendo a difusibilidade D (cm^2/s), um índice que go

verna o espalhamento numa determinada secção, observou-se que ocorreram variações muito acentuadas nos seus valores em função do teor de umidade, sendo que o valor máximo ($2,69 \text{ cm}^2/\text{s}$) para a areia nas proximidades da saturação, foi mais alto do que o do solo ($0,5750 \text{ cm}^2/\text{s}$). Observou-se que a difusibilidade na areia, diminuiu 240 vezes ao passar das condições de saturação para as de quase seca, enquanto que no solo diminuiu 27,64 vezes apenas. O ponto comum onde as difusibilidades para os casos estudados (areia e solo) coincidiram foi o teor de 11,33 % de umidade, sendo $0,0820 \text{ cm}^2/\text{s}$. Para a faixa de 0 - 11,33 %, a difusibilidade no solo superou a da areia, enquanto que para teores maiores que 11,33 % de umidade ocorre o contrário.

v) A condutividade hidráulica deduzida dos valores de difusibilidade e do gradiente de sucção, apresentou maiores valores na areia do que no solo, na faixa de 10 a 32 % de umidade. A condutividade na areia diminuiu 4.673 vezes ao passar da condição de saturação para a de quase seca, enquanto que no solo diminuiu apenas 23,63 vezes.

vi) Equações do tipo exponencial e logarítmica foram estabelecidas para a difusibilidade (D) e condutividade hidráulica (K) respectivamente, na areia e no solo em função do teor de umidade, sendo:

$$D(\theta) = e^{11,56 + 0,509\theta - 0,0082\theta^2} \quad , \quad e$$

$$D(\theta) = e^{13,38 + 0,245\theta - 3,385 \times 10^{-3}\theta^2} \quad \text{respecti}$$

vamente, e:

$$K(\theta) = 10^{-0,535 + 4,6(\log\theta) - 0,125(\log\theta)^2} \quad , \quad e$$

$$K(\theta) = 10^{2,304 + 1,5 \log \theta + 0,34 (\log \theta)^2} \quad \text{respecti}$$

mente. Tais equações ajudam na resolução da equação do fluxo (equação 13) onde D e K são funções únicas do teor de umidade, com a finalidade de obter teores de umidade em função do espaço e tempo.

vii) Um sistema mais prático, desde a instalação até o manejo sem o uso de reservatório e de energia no bombeamento, poderia ser obtido satisfatoriamente, com uma liberação d'água de 4,7 ℓ /dia (obtida por interpolação) em uma cápsula porosa sob pressão atmosférica. As mesmas condições de pressão atmosférica, a taxa liberada na areia foi 2,7 ℓ /dia, o que pode ser suficiente para culturas menos exigentes que o milho, tais como feijão, sorgo e outras.

Os gráficos que demonstram o volume d'água liberado versus cargas hidrostáticas facilitaram a escolha das cargas desejadas para determinada liberação. Verificou-se para a liberação de 4 ℓ /dia foram necessárias as aplicações das pressões hidrostáticas de 16,25 e -6,25 cm (sucção) na areia e solo respectivamente. A aplicação da sucção implica em uso racional e eficiente de água.

viii) Os coeficientes de correlação obtidos para os casos comparados de volumes liberados versus volumes molhados; volumes liberados versus cargas aplicadas; espalhamentos radiais para diferentes cargas e infiltrações verticais para diferentes cargas, foram em geral, altos, mostrando uma boa relação entre as variáveis comparadas, o que comprova uma coerência nos resultados obtidos experimentalmente, exceto para alguns casos

esporádicos.

ix) Os espalhamentos extrapolados nas diferentes pressões hidrostáticas do solo a 4 dias, foram praticamente constantes (entre 33 e 34,5 cm), como também as infiltrações não apresentaram variações significativas, ficando entre 42,0 e 45,8 cm. Isto concorre para a escolha da menor carga de -25 cm, em virtude do uso mais racional de água (2,37 l/dia). No caso da areia, a 2 dias esta viabilidade não se verifica devido ao baixo valor do espalhamento (10,6 cm). Além da carga negativa de -25 cm, poderia se optar pela carga de 50 cm no solo, cuja aplicação é a mais econômica entre as cargas positivas.

x) Sendo o número de covas uma função de carga aplicada e conseqüentemente do espalhamento, na areia ou no solo, com o tempo, determinou-se 8 covas no caso do solo, sob pressão de 50 cm em 4 dias, onde o espalhamento foi 33,50 cm e o perímetro circular 210 cm, sendo 27 cm o espaçamento entre covas, que pode ser reduzido até 21 cm, para acomodar 10 covas no mesmo perímetro circular, e o volume liberado nesse caso foi 2.064 l. No caso da aplicação da pressão negativa de -25 cm, obteve-se uma situação mais econômica de água (568,8 l), onde o mesmo número de covas (8) puderam ser acomodadas com o mesmo espaçamento médio de 27 cm.

Mais uma vez, ficou comprovado que a água necessária ao ciclo do cultivo, seria mais racionalizada com a aplicação da carga de -25 cm no solo, quando foi de apenas 438,45 m³/há, quantidade inferior à liberada pela cápsula nas demais cargas.

PROGRAMAÇÃO FUTURA

O estudo sobre a propagação tri-dimensional da frente úmida por cápsulas porosas, desenvolvido neste trabalho, culminou em conclusões úteis como foram apresentadas anteriormente. Apesar dos parâmetros considerados terem abrangido quase todos os aspectos relacionados com a utilização da cápsula porosa na irrigação, como: volume d'água liberado, formação do bulbo molhado, distribuição do número de covas ao redor da cápsula e espaçamento entre elas, e volumes d'água liberados durante o ciclo do cultivo, tem-se que levar em consideração ainda, outros aspectos inerentes ao sistema, como pode-se verificar abaixo.

- Devido ao trabalho ter sido conduzido em laboratório, através de um modelo reduzido, certas limitações se impuseram, como no caso da aplicação da sucção no solo, onde o tempo e o recipiente não foram suficientes e adequados para que fossem atingidas as condições de equilíbrio entre a gravidade e a difusibilidade. Pode-se portanto, utilizar um maior recipiente para que em maiores tempos, não se façam necessárias as extrapolações efetuadas. As experiências podem ainda ser conduzidas no campo, com o uso de equipamentos sofisticados para obtenção da frente úmida.

- No laboratório, alguns fatores climáticos não foram considerados, tendo então sido desprezados, a evaporação da água do solo, a transpiração da planta (uma vez que não foi utilizada) as eventuais precipitações, e outros. A fim de tor

nar o sistema mais próximo do real, as experiências podem ser feitas em laboratório, porém, simulando-se as condições acima citadas, para se conhecer o volume d'água liberado que seria necessário para a região semi-árida.

- Para fins de otimização do sistema solo-água-planta, pode-se fazer tentativas de diversas maneiras de uso d'água, dispondo-se de métodos de avaliação que possam ser utilizados no campo. Desse modo, pode-se conhecer outros aspectos, como o efeito da cultura, qualidade da água, composição da vegetação e outros.

- Na distribuição das plantas pelas covas hipotéticas, cujos espaçamentos e distâncias radiais ao redor da cápsula foram determinados a partir dos espalhamentos máximos, recomendou-se o número de uma planta por cova (feijão). Uma estimativa da profundidade das raízes das plantas ao longo do ciclo do cultivo, será útil para a análise eficiente do sistema, no cálculo das perdas por evapotranspiração e de absorção d'água pelas raízes nas diferentes camadas.

- No presente estudo, foram considerados 2 tipos de solo compactados, e é evidente que os solos desagregados serão diferentes desses, quanto à liberação d'água e propagação da frente úmida. Logo, é válido fazer-se estudos no campo, com solos de consistências, composições e origens diferentes, para analisar a influência dos mesmos no comportamento da liberação d'água e propagação da frente úmida, sob diferentes pressões hidrostáticas.

- Nas experiências realizadas, em ambos os casos (areia ou solo), a matriz considerada foi homogênea. Porém, em condi

ções de campo, encontram-se camadas estratificadas ao longo da profundidade das raízes da planta considerada, sendo portanto, a simulação dessas condições, uma vez que a absorção d'água pelas raízes varia muito com as propriedades do solo em cada camada. O avanço da frente úmida também será afetado, como visto no texto, no caso das partículas finas sobrepostas às grossas que diferem muito das grossas sobrepostas às finas, criando condições de lento avanço e desenvolvendo aquíferos falsos.

Embora a execução dos trabalhos sugeridos exijam estudos prolongados em tempo e dedicação, para se obter um melhor comportamento da cápsula sob as condições complexas descritas, será de muita utilidade a realização desses estudos os quais podem se aplicar, satisfatoriamente, no semi-árido nordestino, tendo em vista que o método de irrigação por cápsulas porosas demonstrou grande praticidade e economia nas regiões carentes de água.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro. Manual de Métodos de Análise de Solo. 1979.
- GARDNER, W.R. & WIDTSOE, J.A. The movement of soil moisture. Soil Sci. 11:215-232. 1921.
- GARDNER W.R. & MAYHUGH, M.S. Solutions and Tests of the Diffusion Equation for the Movement of Water in Soil. Soil Sci. Soc. Amer. 22:197-201, 1958.
- GARDNER, W.R. & HILLEL, D. The Relation of external evaporative conditions to the drying of soils. J. Geophys. Res. 67:4319-4325. 1962.
- GARNER, D.E. Entrapped soil air in a field site. Soil.Sci. Soc. Amer. Proc. 33:634-635. 1969.
- GAVANDE, S.A. Física de Suelos ; Principios y aplicaciones. México, Editorial Lumisa. 351 p. 1979.
- HANKS, R.J. & BOWERS, S.A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soil. Soil Sci. Soc. Amer. 26:530-534. 1962.
- HENDERSON, F.M. Open Channel flow. Library of Congress Catalog card number: 66-10695. 1966.
- HERNANDEZ SAUCEDO, F.R. Producción de lechuga (lactuca sativa) utilizando riego por succión en la zona de Chapingo, México. Chapingo, México, Universidad Autónoma. 1979. 53 p. (Tese Mestrado).
- HILLEL, D. Soil and Water. Physical principles and processes. New York, Academic Press. 1971. 288 p.

- HOEL, P.G. Estatística Elementar. Rio de Janeiro, Biblioteca Fundo Universal de Cultura. 1963. 311 p.
- JACKSON, R.D. & WHISLER, F.D. Equations for approximating vertical non-steady state drainage of soil columns. Soil. Sci. Soc. Amer. 34:715-718. 1970
- JACKSON, R.D.; KIMBALL, B.A.; REGINATO, R.G. & NAKAYAMA, F. S. Diurnal soil-water evaporation: time depth flow patterns. Soil Sci. Soc. Amer. 37:505-509. 1973.
- KHAN, M.Y.; KIRKHAM, D. & HANDY, R.L. Shapes of steady state perched groundwater mounds. Water Resour. Res. 12 (3) : 429-436. 1976.
- KIRKHAM, D. & POWERS, W.L. Advanced soil physics. John Wiley & Sons. 1972. 543 p.
- KLUTE, A. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. Soil. Sci. Soc. Amer. 78 : 105-116. 1952.
- KLUTE, A. Some theoretical aspects of the flow of water in unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. 16(2):144-148. 1957.
- KLUTE, A. & HEERMANN, D.F. Soil water profile development under a periodic boundary condition. Soils. Sci. Soc. Amer. 117/(3) 265-271. 1974.
- MARINO, M.A. Artificial groundwater recharge, I Circular recharging area. Journal of Hydrology, 25: 201-208 Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdã. 1974
- MARINO, M.A. Artificial groundwater recharge, II Rectangular recharging area. Journal of Hydrology, 26:29-37. 1975

MILLER, E.E. & MILLER, R.D. Physical theory of capillary flow phenomena. J. Appl. Phys. 27: 324. 1957.

OLGUIN, P.C. Riego por succion, descripción del método y avances en la investigación. 17 p Mimeografado. (trabalho apresentado no Seminário Nacional de Riego por Goteo, 1. Hermosillo, Son). 1975

OLGUIN, P.C.; LLERENA, V.F.A.; VIZCAINO, V. J. & PENA, J. de la. Observaciones sobre o efecto del riego por succion en el rendimiento y desarrollo de maiz (Variedad H-507) en el distrito de riego. nº 41, Rio Yagui, Sonora. 1976. 18 p. (Mimeografado).

PHILIP, J.R. Theory on infiltration. The equation and its solution soil. Sci. vol.83 p.345-357. 1957.

PHILIP, J.R. A linearization technique for the study of infiltration. UNESCO Symposium on water in the unsaturated zone. 1:471-478. 1966.

PHILIP, J. R. Theory of infiltration. Adv. Hydrol. Sci. 5:216-219 1969b.

PIRES, T.S. Irrigação por Cápsulas Porosas: Efeito do tipo de água e frequência de irrigação sobre o funcionamento do sistema. Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria, 1982. 120 p. Tese de Mestrado.

POULOVASSALIS, A. Flow Characteristics during infiltration into a horizontal sand column. Water Resources Res. 13 (2) : 369-374. 1977.

REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo, Fundação Cargil. Ed. 3.1975 286 p.

- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediuns. Physics, 1:318-333 . 1931.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, D.C. USDA, 1954. 160 p.
- RIJTEMA, P.E. An analysis of actual evapotranspiration. Agr. Res. Rep. 659, 10-107, Pudoc. Wageningen, 1965.
- SAGAR, B. & SINGH, S.R. On Jacob's aproximation in flow through porous media. Water Resources Res.16(2): 377-380. 1980.
- SANTOS, E.D. Determinacion de la evapotranspiracion en trigo mediante riego por succion. Chapingo, México, Escuela Nacional de Agricultura. Colégio de Postgraduados, 1977, 107 p. (Tese de Mestrado).
- SARMA, S.V.K.; NIGAM, S.D. & RAO, J.V. Studies on partially saturated flows with special reference to recharge by spreading. New Delhi, International Commision on Irrigation and Drainage, 1965. 56 p.
- SARMA, S.V.K. & PRADHAN, J.L. Application of variational principle for the solution of gravity drainage problem. J. IAHR. The Netherlands, 4 (9): 565-590. 1971.
- SILVA, A.de S.; SANTOS, E.D. & MAGALHÃES, A.A. de. Confecção de Cápsulas porosas para o método de irrigação por sucção. Recife - Pe, EMATER-Pe, 1978a, 17 p. (Boletim Técnico, 13).
- SILVA, A.de S.; SANTOS, E.D. & MAGALHÃES, A.A.de. Introdução e Avaliação do método de irrigação por sucção na região do trópico semi-árido. Recife-Pe. EMATER. 1978b. (Bol. Técnico 12)
- SILVA, D.A. da. Irrigação por Cápsula Porosa: Características

- e avaliação do método sob pressões hidrostáticas. Campina Grande, Pb, Universidade Federal da Paraíba, CCT. 1980. 67 p. (Tese de Mestrado).
- SILVA, D.A.da. Irrigação por cápsulas porosas III : Avaliação técnica do método por pressão hidrostática. Petrolina-Pe, EMBRAPA/CPATSA, Boletim de Pesquisa 13, p 20-42. 1981
- SMITH, W.O. Infiltration in sands and its relation to ground water recharge. Water. Resources Res. 3(2). 1967.
- SPIEGEL, M.R. Estatística. Rio de Janeiro, Sociedade Editora e Gráfica Ltda. 1961. 580 p.
- STALLMAN, R. W. Flow in the zone of aeration. Advan. Hydrosci. 4:151-195. 1967.
- TERZAGHI, K. Theoretical soil mechanics. McGraw-Hill, New York, 1943. 606 p.
- VALE FLORENCIA, H. del. Experimento preliminar en invernadero ; con riego por succion para el diseño de capsulas porosas . Nueva Epoca, Chapingo, México, (7-8):39-53, sep. dic. 1977.
- VAUCLIN, M & KHANJI, D. Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated - saturated water table recharge problem. 15(5) : 1089-1101. 1979.
- WHISLER, F.D. & KLUTE, A. Analysis of infiltration into stratified soil columns. Wageningen symposium water in the unsaturated zone. International Association of Scientific Hydrology, 1966
- WIND, G.P. A field experiment concerning capillary rise of moisture in a heavy clay soil. Netherland, J. Agr. Sci. 3 : 60-69 . 1955.