

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

O PAPEL DOS DRENOS INTERCEPTORES NA CONTENÇÃO DO  
ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES NOS AQUÍFEROS RASOS

CARLOS SPARTACUS DA SILVA OLIVEIRA

CAMPINA GRANDE - Pb

JANEIRO, 1997

CARLOS SPARTACUS DA SILVA OLIVEIRA

O PAPEL DOS DRENOS INTERCEPTORES NA CONTENÇÃO DO  
ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES NOS AQUÍFEROS RASOS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS  
EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE

Dr. Seemanapalli V. K. Sarma - Ph.D.

Orientador

Campina Grande

Janeiro, 1997



048p

Oliveira, Carlos Spartacus da Silva

O papel dos drenos interceptores na contenção do espalhamento dos contaminantes nos aquíferos rasos / Carlos Spartacus da Silva Oliveira. - Campina Grande, 1997. 242 f. : il.

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

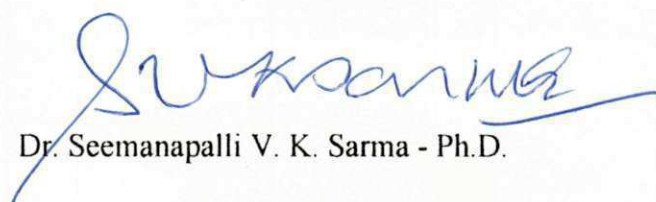
1. Drenos Interceptores - 2. Drenos Interceptores - 3. Drenos Interceptores - 4. Dissertação I. Sarma, Seemanapalli V. K., Dr. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 626.862(043)

CARLOS SPARTACUS DA SILVA OLIVEIRA

O PAPEL DOS DRENOS INTERCEPTORES NA CONTENÇÃO DO  
ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES NOS AQUÍFEROS RASOS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS



Dr. Seemanapalli V. K. Sarma - Ph.D.

Orientador



Dr. Hans Dieter Schuster - Ph.D

Componentes da Mesa Examinadora



Dr. Tumkur R. Gopinath - Ph.D

Componentes da Mesa Examinadora

Campina Grande - Pb

Janeiro, 1997

## AGRADECIMENTOS

Para a obtenção deste trabalho de pesquisa objeto da presente Dissertação de Mestrado, tornou-se importante o agradecimento às seguintes Instituições e profissionais:

O Professor da Área de Recursos Hídricos da Universidade Federal da Paraíba, o Dr. Seemanapalli V. K. Sarma, orientador da Pesquisa, que participando ativamente no desenvolvimento deste trabalho com larga experiência e sua compreensão ajudou muito na realização deste trabalho.

Agradeço ainda, ao Professor Dr. Seemanapalli V. K. Sarma, por todos os programas computacionais e numéricos que ele desenvolveu e modificou para meu benefício nesta Dissertação de Mestrado e pelas sugestões dadas em cada etapa.

Ao Sr. Alex M. de Alves pela incorporação das variáveis pertencentes aos programas computacionais da Linguagem Pascal.

Ao Sr. Silvestre pelo auxílio técnico computacional que ele ofereceu durante todo trabalho.

Ao Sr. Alberto José Colaço Catão atual Secretário da Agricultura do Município de Campina Grande, Pelo seu incentivo e apoio técnico.

Ao Sr. Felix Araújo Filho, prefeito de Campina grande pelo incentivo e minha liberação.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola pelo apoio, quando necessitei dos Laboratórios, na pessoa da Professora Lúcia Helena.

A todos os professores da Área de Recursos Hídricos, pela sua participação e incentivo.

A todos os técnicos e funcionários da Área de Pesquisa de Recursos Hídricos, principalmente ao Sr. Ismael pelo apoio à pesquisa.

A todos os amigos alunos de Mestrado e Estagiários que durante minha passagem no mestrado deram seu apoio.

A Universidade Federal da Paraíba que, com o curso de Mestrado ofertado, proporcionou esta Dissertação.

A FAPESQ, pelo apoio e financiamento de alguns equipamentos para o desenvolvimento da pesquisa.

A Coordenação do Curso de Engenharia Civil.

A Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

A Coordenadora do Laboratório de Hidráulica a Professora Gledsneli Maria Lins.

A Soniaele Pires de Carvalho, Estudante do Mestrado de Engenharia Civil, pela ajuda na correção da redação final da Tese.

Aos meus irmãos Kátia, Patrice, Vália, Olena, Oliveiros Filho, José Augusto, Ana, Nadja e (Nadja e Ceciana in memória) pelo seus grandes incentivos e apoio.

Em fim, a todos que diretamente e indiretamente contribuíram com este trabalho.

Dedico este trabalho á  
minha esposa Fabiola, a  
minha filha Mylena e aos  
meus pais Oliveiros e  
Zilda.

## NOMENCLATURA

a, b, c, d - coeficientes na Equação polinomial de n termos, (A, B, C, D)

A - Área do aquífero em questão,  $m^2$

H - Cargas hidráulicas do nível dinâmico no cone de rebaixamento/ou potencial hidráulico, m ( $h_1, h_2, h_3$ )

$h_0$  - Espessura saturada, m

i - Gradiente hidráulico na Equação de Darcy,  $V=K.i$ , adimensional, (l)

i,j - As duas direções tratadas na malha do computador para representar um determinado aquífero

K - Permeabilidade do meio poroso do aquífero, m/s

( $K_{xx}, K_{yy}$  e  $K_{zz}$ ) - Permeabilidade nas direções x, y e z, m/s

( $K_{x1}, K_{x2}$ ) ou ( $K_{y1}, K_{y2}$ ) - Permeabilidade com divisão do meio, m/s

$K_h$  - Permeabilidade na direção Horizontal, m/s

$K_v$  - Permeabilidade na direção Vertical, m/s

PESTAG - Ponto de Estagnação

Q - Vazão do poço,  $m^3/h$

Q(i,j) - Vazão no determinado ponto (i,j) na rede considerada,  $m^3/h$

$q_a$  - fluxo ambiente, m/s

$Q_A$  - Contribuição total do fluxo ambiente,  $m^3/h$

Q - Vazão no dreno,  $m^3/h$

V - Velocidade, m/h



$X, Y$  - Direções consideradas consideradas para tratamento do problema

$Y_g$  - Posição da linha de fluxo mais afastada do eixo do fluxo, m

$X_s$  - Distância entre o poço e a margem do rio, m

$\Delta x$  - Discretização da Rede, m

$\Phi$  - Phi, Potencial, m

$\Psi$  - Psi, Função do Fluxo,  $m^3/dia$

## INDICE

	PÁGINA
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	15
1.0 - Introdução.....	18
1.1 - Contaminação Subterrânea por Química Agrícola.....	19
1.2 - O Local de Estudo em Sumé, Paraíba.....	21
1.3 - A Contaminação das Terras Agrícolas por Agentes Químicos e o Papel dos Drenos Interceptores na Redução/Eliminação Destes Poluentes.....	22
1.4 - Águas Subterrâneas em Geral.....	24
1.5 - A Importância da Permeabilidade do Meio no Funcionamento do Dreno.....	24
1.6 - Efeito dos Solos Anisotropicos e Estratificados Sobre a Drenagem Subterrânea.....	26
2.0 Revisão Bibliográfica.....	28
2.1 A Hidráulica dos Poços em Aquíferos Confinados e Livres .....	35
2.2 Drenos Interceptores na Delimitação do Espalhamento dos Contaminantes.....	38
3.0 - Modelo Hidrodinâmico e Computacional Adotado.....	42
3.1 - Descrição Do Modelo Hidrodinâmico.....	43
3.2 - Discretização Do Modelo Computacional .....	45
3.3 - Modelo Com Dados De Entrada Para Fim De Calibração .....	47
3.4 - Calibração Do Modelo.....	47
4.0 - Efeitos Ambientais Impostos Sobre Drenos Interceptores.....	50
4.1 - Efeitos Das Condições Hidrológicas.....	51

4.2 Efeitos das Condições Hidrológicas.....	52
5.0 Análise dos Resultados.....	54
5.1 - Esquema de Modelação dos Drenos Interceptores na Contenção dos Poluentes.....	55
5.2 - Critério de Análise dos Dados a partir de Experiências Computacionais.....	57
5.3- Critério Adotado para o Calculo de Vazão.....	59
5.4 - O Efeito de Discretização da Rede sobre as Linhas / Tubos do Fluxo Capturadas pelo Dreno Interceptor.....	61
5.5 -Efeito de Posicionamento do Dreno Sobre Percentagem dos Tubos do Fluxo Capturados.....	63
5.6 - Variação da Vazão do dreno com a Profundidade em Função da Permeabilidade.....	64
5.7 - Variação da Permeabilidade do Material do Dreno com as linha de fluxo ou tubos que Entram no Dreno.....	65
5.8 - Variação da Declividade da Linha Freática com Número de Tubos de Fluxos ou Linhas Capturadas Pelo Dreno em Função da Profundidade do Mesmo...66	
6.0 - Recarga dos Drenos Interceptores e Este Efeito Sobre a Delimitação do Espalhamento dos Contaminantes.....	68
6.1 - Efeito da Recarga no Dreno Interceptor Linear Sobre os Tubos do Fluxo.....	71
6.2 - A Análise da Sensibilidade em Função do Efeito de Recarga.....	72
6.3 - Efeito da Variação de Condutividade Hidráulica em Função da Profundidade do Dreno.....	73
6.4 - Efeitos das Condições Hidrológicas.....	76
6.5 - O Efeito da Recarga Acentuada no Local do Dreno Sobre as Linhas do Fluxo Capturadas ou Tubos do Fluxo que Entram no Dreno.....	79

7.0 CONCLUSÕES E RECOMENNDações.....	82
7.1 - Conclusões.....	83
7.2 - Recomendações.....	89
8 - BIBLIOGRAFIA.....	92
ANEXOS.....	108
I - Balanço Hídrico.....	109
II - Análise Química das Amostras do Solo e da Água.....	111
III - Classificação das Águas - Fonte: CONAMA (1992).....	121
IV - Modelo Conceitual de Zheng Et Ali, (1988).....	127
V - Programas.....	133
VI - Modelo de Diferenças Finitas.....	154
VII - Figuras.....	167
VIII - Sistema Antrópico e a Teoria da Refração das Linhas de Fluxo.....	235

## RESUMO

Os drenos interceptores são úteis na delimitação de água poluída, e podem ser totalmente penetrantes ou parcialmente penetrantes. Tais drenos interceptores que são facilmente instalados, exigem uma manutenção mínima. Porém o uso efetivo destes drenos no campo depende, na maioria dos casos, de um conhecimento profundo sobre a situação geológica e as condições hidrológicas. Os drenos interceptores considerados neste estudo, que foram tratados como drenos abertos, os quais são comumente usados no campo agrícola, são destinados para fim de drenar rapidamente a parte superior do aquífero, assim rebaixando o lençol freático. A finalidade é de otimizar as profundidades e espaçamentos de drenos interceptores, com permeabilidades diferentes de material do dreno, para a remoção efetiva da água poluída do aquífero.

A forma geométrica da propagação da água subterrânea na vizinhança de um dreno interceptor para fins de drenagem agrícola foi simulada, usando as funções do fluxo e potencial no controle do espalhamento e a extensão das químicas agrícolas em aquíferos rasos. O conceito da divisa subterrânea da linha do fluxo é usado para quantificar a eficácia dos drenos interceptores para delimitar a extensão dos contaminantes potencialmente perigosas. O resultado da simulação sugere que esse dreno interceptor poderá criar uma barreira hidráulica forte na prevenção do movimento dos contaminantes agrícolas na água subterrânea. Para que essa barreira seja efetiva ou não depende das mudanças sazonais nas condições hidrológicas, incluindo a dependência sobre gradientes regionais do lençol freático e sobre a

distribuição da recarga, foram estabelecidas relações funcionais entre efetividade do dreno e as condições hidráulicas existentes.

Foi tratado nesta pesquisa que o dreno interceptor também pode ser usado para capturar e até limpar os contaminantes dos aquíferos rasos e pode ser usado para delimitar a extensão de químicas agrícolas em água subterrânea. A contaminação subterrânea por química agrícola que se torna como o maior problema do meio ambiente, não somente nos países em desenvolvimento, como também nos países desenvolvidos, pode ser efetivamente controlada e até eliminada pelos drenos interceptores, que se agem na rápida remoção da água poluída por agro-químicos, bem como herbicidas e pesticidas. Embora estes contaminantes são detectados principalmente nas águas subterrâneas rasas, a química agrícola pode ser transportada para as camadas mais profundas. A degradação na qualidade da água subterrânea pode ser minimizada e ainda prevenida pelo controle da extensão destes agentes químicos em água subterrânea rasa. Os drenos interceptores estendidos ate uma determinada profundidade poderá efetivamente resolver o problema através de captura dos tubos suficientes do fluxo poluído. Pelo dreno interceptor, para conter os contaminantes.

Varias simulações que foram feitas afim de estudar o efeito de recarga sobre eficácia do dreno interceptor mostraram que com recargas mais acentuadas, o numero dos tubos do fluxo que entra o dreno será maior, assim mostrando o fato que quanto mais a recarga subterrânea, maior será a vazão efetivamente retirada do aquífero. As divisas subterrâneas para estes casos mostram que com aumento da declividade da linha freática, aumentam também o número de tubos que entram ao

dreno, assim mostrando a eficácia do dreno interceptor. A recarga causaria um ponto de inflexão no lado jusante do dreno, o potencial maior sendo no lado montante do mesmo, sendo na ordem de 101.4 m.

O ponto de inflexão é mais predominante, com maiores declividades das linhas freáticas e com maiores taxas da recarga. O presente estudo introduz o conceito de quantificar a habilidade dos drenos parcialmente penetrantes na captura de água poluída, baseado na análise do sistema de fluxo sob condições permanentes ou estacionárias.

Os resultados assim obtidos foram apresentados na forma das figuras e tabelas, com anexos úteis que fornecem a teoria necessária dos drenos interceptores, as quais são auto-explicativas.

## ABSTRACT

The interceptor drains are useful in delimiting the polluted water and these may be of fully or partially penetrating type. Such interceptor drains are easy for construction and installation, and demand minimum maintenance. However, their effective use depends, in most of the cases, on a deeper knowledge about their geological situation and existing hydrologic conditions. The interceptor drains considered here, which are in fact treated as open drains, which are commonly used in the interior in agricultural fields are supposed to drain away rapidly the upper part of the aquifer, to facilitate effect drawdown of the freatic surface. The purpose of this study is to optimize the depths and spacings of such interceptor drains, by filling in the same with proper material, packed within the drain, for effectively removing the contaminated water of the aquifer.

The mode of propagation of subsurface water in the vicinity of the interceptor drains was simulated in terms of potencial functions, for use in agricultural lands, with a view to control the spread of agricultural chemicals in shallow aquifers. The concept of subsurface water divide is used here-in for quantifying the efficiency of the interceptor drains in delimiting the spread of contaminants that are potentially dangerous. The results of such simulations suggest that interceptor drains might create strong effective hydraulic barrier that serves in the prevention of movement of agricultural chemicals entering subterranean waters of the aquifers. For such a barrier to be effective and not to depend on seasonal hydrological changes that occur in the locality, inclusive of dependence on regional gradients of the freatic line and on the



recharge that occurs in the said locality, functional relationships were established between the effectiveness of the interceptor drain and the existing hydraulic conditions. It was established in this study that the interceptor drains may as well be used to capture or even wash off the contaminants in shallow aquifers and thus containing the spread of agricultural chemicals. The subterranean contamination that is becoming the biggest problem of the day in developed, as well as in developing countries, may be effectively controlled and even eliminated by use of such interceptor drains, which act as means for rapid removal of water polluted by agricultural chemicals, as well as by herbicides and pesticides. Although these contaminants are principally detected in shallow parts of aquifers, such agricultural chemicals might get transported to deeper strata of aquifers. The degradation of subsurface water quality may thus be minimized and even prevented by way of effective control of such chemical agents in subterranean waters. These drains extended to desired depths might prove to be an effective solution to the pollution problem, by way of capturing major part of the polluted flow through flow tubes that are captured by interceptor drains.

Various simulations that were made to enable study the effect of recharge on the efficacy of interceptor drains showed that with more of concentrated recharge, the number of flow lines and flow tubes that enter the interceptor drain increase, which shows that a greater recharge into the drain facilitates faster removal of polluted water from the aquifer. The ground water divides that are witnessed in these cases of recharge show that both increase in gradient of the terrain, as also induced recharge, cause corresponding increases in the flow tubes that enter such drains, thus showing the efficacy of such drains. Recharge in general causes a point of inflexion on

the down-stream side of the drain, while the major potential of 101.4 m lies on the up-stream side of the drain, the point of inflexion being more predominant for greater inclinations of the freatic line and for greater rates of recharge.

The present study helps in introducing the concept of quantifying the capacity of interceptor drains that are partially penetrating in terms of effective removal or reduction of poluents in subsurface waters, in a system that is steady state and stationary. The results so obtained were presented in the form of figures and tables, with useful anexes that furnish the needed theory behind the interceptor drains, that are auto-explicative.

**INTRODUÇÃO**

**CAPÍTULO I**

## **1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 - CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA POR QUÍMICA AGRÍCOLA**

A contaminação subterrânea por química agrícola que se torna como o maior problema do meio ambiente está apropriando um maior interesse ambiental dos Engenheiros Agrícolas e Agrônomos. Estes contaminantes químicos incluem nitratos, bem como herbicidas e pesticidas. Embora estes contaminantes detectados principalmente nas águas subterrâneas rasas, a química agrícola pode ser transportada para as camadas mais profundas. A degradação na qualidade de água subterrânea pode ser minimizada e ainda prevenida pelo controle da extensão destes agentes químicos em água subterrânea rasa. As fontes principais de contaminantes foram mostrados na Figura (1.).

Os recursos de água subterrânea são particularmente susceptíveis de contaminação por agentes químicos devido a alteração da permeabilidade dos solos e a flutuação do lençol freático raso. Quantidades significativas de nitratos e pesticidas têm sido encontradas em água subterrânea rasa, nas terras agrícolas. Soluções imediatas para aquele problema tem sido atrapalhadas pelas considerações econômicas. Na Figura (1.) que mostra as principais fontes de contaminação, foram detalhados casos de contaminação por fertilizantes e inseticidas, bombeamento da água poluída das minas, vazamento dos produtos perigosos, chuva ácida nos locais industrializados, por aterros sanitários e fossos sépticas, etc.

Os drenos interceptores considerados neste estudo referem-se aos drenos abertos que são comumente usados no campo agrícola com altos lençóis freáticos a fim de drenar a parte superior do aquífero, assim rebaixando o lençol freático. Tradicionalmente, os engenheiros agrícolas tem sido principalmente interessados com projetos de otimizar as profundidades e espaçamentos de drenos interceptores para remoção efetiva da água subterrânea. Porém, o dreno interceptor também pode ser usado para capturar e limpar os contaminantes dos aquíferos rasos e poderá ser usado para delimitar a extensão de químicas agrícolas em água subterrânea.

O conceito de quantificar a efetividade de um dreno interceptor nas barreiras hidráulicas para contenção dos contaminantes dentro dos aquíferos rasos deve ser discutido detalhadamente dentro do âmbito dos parâmetros que influenciam a hidráulica da matriz do aquífero e do material do dreno, com os parâmetros físicos hidrogeológicos do terreno envolvido. O estudo atual visa investigar o efeito dos drenos interceptores em função do posicionamento do mesmo, sua largura e profundidade, bem como as permeabilidades relativas dos materiais do dreno e da matriz no sistema de fluxo subterrâneo (Perímetro Irrigado de Sumé-Pb) e explorar a possibilidade de usar drenos interceptores para controlar a extensão de química agrícola em aquífero raso. O estudo está inserido num esforço de oferecer direção para implementação de estratégia de controle de poluição nas terra agrícolas usando plano de gerenciamento dentro das áreas agrícolas em Sumé-Pb. (Figuras 1.C e 1.D)

## 1.2 - O LOCAL DE ESTUDO EM SUMÉ, PARAÍBA

A área de estudo fica localizada no Perímetro Irrigado de Sumé-Pb, no lote de número 20 do Senhor Francisco Thomas Filho (caçulinha), onde foram perfurados 4 poços de observação para acompanhar o perfil do solo e o nível do lençol freático. As Figuras 1 até 11 mostram a localização da área de estudo e suas características geológicas e hidráulicas, comportamento da água subterrânea, o desenvolvimento dos elementos químicos no solo, os níveis freáticos num campo irrigado e a área, esta cultivada com pimentão (*Capsicum*). É a mais importante região agrícola da região dos Cariris Velhos.

A cidade de Sumé, situada na microregião Cariri Velho (MRH - 96) do Estado da Paraíba, mostra as seguintes características:

Precipitação média anual	511,5 mm
Temperatura média anual	22,80 C
Evapotranspiração potencial anual	1135,0 mm
Deficiência hídrica anual	623,5 mm
Índice hídrico de Thornthwaite (-33,0)	

Os maiores detalhes estão no anexo I

### **1.3 - A CONTAMINAÇÃO DAS TERRAS AGRÍCOLAS POR AGENTES QUÍMICOS E O PAPEL DOS DRENOS INTERCEPTORES NA REDUÇÃO/ELIMINAÇÃO DESTES POLUENTES**

A contaminação de terras agrícolas por uso indiscriminado dos agentes químicos e herbicidas e pesticidas é reconhecido no Brasil inteiro. A Rede Globo divulgou no dia 4 de Fev. de 1996 numa reportagem feita sobre agrotóxicos o que é de interesse dos cientistas do meio ambiente. Hoje em dia está mais que na hora do agricultor, o pecuarista e o granjeiro, começarem a defender os seus direitos de consumidor. Alguns dias atrás, o ministério da agricultura denunciou um fato muito grave dizendo que 16% dos fertilizantes e quase 22% dos corretivos de solo vendidos no Brasil estão fora das normas definida pelo governo. Um outro problema sério, da agricultura, é que a cultura da batata, virou uma ameaça a saúde do brasileiro, uma vez que o excesso de veneno nas plantações está contaminando o meio ambiente e pondo em perigo a vida de agricultores e consumidores.

Acidentes com veneno são fatos comuns entre os agricultores e muitos morrem intoxicados ao usar latas de veneno vazias para colher batata. O contato constante com o veneno pode provocar problemas crônicos que só vão se manifestar no futuro.

Os produtos utilizados, em geral, podem provocar problemas nos nervos, degeneração dos mesmos, a pessoa vai perdendo a força, ficando com dificuldade de

memória e pode inclusive ter dificuldade, no futuro, para andar. Há também problemas ligados ao fígado que os outros dizem hepatites crônicas e hepatites agudas. Cerca de duzentos mil casos de intoxicações agudas ocorreram até 1995 no Brasil que não estão sendo notificadas. Isso ocorre porque os casos de intoxicação, muitas vezes, simulam outras doenças, que não, passam pela formação dos médicos que, muitas vezes, não tem as informações necessárias para fazer um diagnóstico adequado e passam também por falta de uma centralização de dados.

Mas, não são só os agricultores que estão sofrendo com o veneno da batata. As lavouras de batata são arriscadas por canais de drenagem, que levam a água para os córregos e riachos secundários que vão desaguar nos rios principais. Como não há nenhum cuidado nas pulverizações, uma parte do veneno acaba indo direto para o ribeirão ou é levada junto com água da enxurrada para dentro do rio. Nas várzeas, a ação da chuva faz com que o veneno penetre no solo, chegando ao lençol de água subterrânea. No laboratório, as amostras de água colhidas passam por filtrações e reações químicas.

Nas outras situações os analistas encontram resíduos de inseticidas organofosforados e de inseticidas carbonatos, com níveis muito maiores para os carbonatos, e as vezes os níveis foram acima dos máximos toleráveis. Existe uma Lei que poderia dar proteção razoável aos agricultores e consumidores de batata estando em vigor desde 1990, na qual a venda de agrotóxicos só é permitida com receita de agrônomo e o uso deve ser fiscalizado e na prática, nada disso acontece.

O seguinte item descreve as características da água subterrânea e o escoamento da água no meio poroso com porosidade diferente.



#### **1.4 - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GERAL**

Embora o uso da água subterrânea date de muitos milhares de anos atrás, foi somente no século XVII que o homem conseguiu ter um entendimento mais claro da interação hidrológica e da dependência que a água subterrânea tem da precipitação.

A água subterrânea move-se muito lentamente em comparação com a água superficial. Uma alta velocidade de água subterrânea estaria na faixa de 1 metro/dia, enquanto um rio rápido pode mover-se a uma velocidade de 1 metro/segundo. O fluxo de água subterrânea é evidentemente um processo laminar, o fluxo de água superficial é turbulento. A água que reside em aquíferos profundos por um tempo tão longo quanto 30.000 anos ou mais (PEARSON e WHITE, 1967), enquanto os rios usualmente possuem tempos de residência inferiores a algumas semanas. Esses altos tempos de residência para a água subterrânea significam que as taxas de recarga anual são muito pequenas, cujo fato torna a água subterrânea uma reserva confiável a longo prazo, efetivamente imune às flutuações anuais de precipitação. Isto significa também que um aquífero, uma vez poluído, pode levar séculos, até que consiga promover uma autodescontaminação, através de mecanismos de fluxo natural.

#### **1.5 - A IMPORTÂNCIA DA PERMEABILIDADE DO MEIO NO FUNCIONAMENTO DO DRENO**

A condutividade hidráulica, ou melhor a permeabilidade do meio, é uma propriedade importante tanto do meio poroso como do fluido que o atravessa. Quanto

maior a condutividade, melhor o aquífero conduz a água. Embora muitos pesquisadores tenham tentado, ainda não conseguiram estabelecer uma relação entre a coeficiente de permeabilidade, a porosidade e a distribuição dos grãos. Poder-se-ia imaginar que um material com uma alta porosidade tivesse um alto coeficiente de permeabilidade. As argilas têm porosidade mais alta do que as areias, mas suas condutividades hidráulicas são bem mais baixas que as das areias. Pode-se razoavelmente argumentar que as areias possuem mais porosidade interconectada que as argilas e, por essa razão, o coeficiente de permeabilidade são maiores. KELLY e FROHLICH (1985) explicam que aparentemente em alguns solos altamente porosos como as areias, e materiais menos permeáveis como os siltes, tendem a preencher os poros do meio. Com os poros assim preenchidos, o coeficiente de permeabilidade do composto sofre uma redução em seu valor. A tendência é de que, quanto mais poroso o solo, tanto mais preenchido com material de baixa condutividade e menor o coeficiente de permeabilidade total do conjunto. Um dos efeitos resultantes da orientação de sedimentos é produzir condutividades hidráulicas na direção horizontal, que são quase sempre maiores do que as condutividades hidráulicas na direção vertical. Para materiais arenosos, pode-se esperar  $K_y/K_x$  variando de 2 a 20. Para outras litologias, essa relação pode estar na casa das centenas ou ser tão alta quanto 1000 (WINTER, 1976).

## 1.6 - EFEITO DOS SOLOS ANISOTROPICOS E

### ESTRATIFICADOS SOBRE A DRENAGEM SUBTERRÂNEA

Se as componentes de permeabilidade do solo ( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ) são iguais num certo local, o solo se caracteriza com um solo isotrópico. Por outro lado, o solo será anisotrópico se a permeabilidade depender da direção em um determinado ponto do aquífero. Numa formação homogênea, a permeabilidade pode ser isotrópica ou anisotrópica, mas essa característica é invariável de um local para o outro em um aquífero, enquanto nas formações heterogêneas, a permeabilidade varia de um local para outro.

Na maioria dos casos, os aquíferos são anisotrópicos; isto acontece, quando os sedimentos que formam o aquífero são, por exemplo, partículas de mica, na forma de folha, quando depositada, o meio poroso resultante, tendo uma permeabilidade mais alta numa direção (geralmente horizontal, a menos de ter inversão durante ocorrência da formação) do que noutras; ambos os fatores de sedimentação e pressão do material sobreposto causam orientação das partículas folheadas (com placas), com dimensões mais compridas paralelas ao plano onde elas permanecem. A rocha se torna anisotrópica com a permeabilidade mais alta na direção geral dos canais, que se forma paralela aos planos de formação (placas). Em alguns solos, as fissuras estruturais se desenvolvem mais claramente numa direção que na outra, assim o solo exibirá anisotropia.

O material homogêneo, compacto das camadas com texturas diferentes, é equivalente no comportamento com meio homogêneo e anisotrópico (BEAR, 1972);

porém, para uma formação desse tipo ser tratada como um aquífero homogêneo e anisotrópico, a espessura das camadas individuais, devem ser tão pequenas comparativamente com seus comprimentos. Assim, não tem sentido a determinação da permeabilidade equivalente de uma formação, cujo comprimento é menor do que a espessura de qualquer camada. Por conseguinte, a distinção entre anisotropia e estratificação é relativa; em nosso caso, Anisotropia é definida para uma matriz com espessura e comprimento suficientemente grandes, onde  $K_{xx} \neq K_{yy}$ , enquanto na estratificação foi tratado o caso onde verticalmente o aquífero se divide em duas partes, com  $K_{x1}$  diferente de  $K_{x2}$  (ou  $K_{y1} \neq K_{y2}$ ), dependendo da orientação da divisa de permeabilidade com referência dos eixos XX ou YY.

**CAPÍTULO II**  
**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento das teorias ligadas a percolação em meios porosos e os drenos para fins de drenar o excesso de água do aquífero como também para fins de descarga dos aquíferos poluídos por agrotóxicos e agentes químicos. Entretanto, citou-se os que mais se destacaram nessa área do conhecimento, e que tem relação direta com os assuntos discutidos neste trabalho.

Henri Darcy (1856), um engenheiro hidráulico francês, interessado-se no fluxo de água através de camadas de areia, usadas para filtrar água que, posteriormente, seriam bebidas (similar ao processo praticado hoje em dia nas estações de tratamento de água). Seu interesse não envolvia o fluxo de água subterrânea em si, mas seus resultados, com base em experimentos de colunas de areia, mostraram uma relação experimental que ficou conhecida como a lei de Darcy. Ele mostrou que a taxa volumétrica de água, através de uma coluna de areia, é diretamente proporcional ao potencial perdido através da coluna e inversamente proporcional à altura da coluna. Seus resultados se tornaram como forma de uma relação de fluxo, baseada no gradiente do potencial através da altura da coluna. A equação pode ser usada tanto para o fluxo saturado como periodicamente saturado.  $K$  é uma função do conteúdo de umidade (centímetros cúbicos de água/centímetros cúbicos de solo) e do tipo de geologia.

A velocidade de Darcy é dividida pela porosidade efetiva para o fluxo  $\eta_{ef}$ , que leva em conta a parte da porosidade total que se encontra de fato disponível para o fluxo (Bear, 1979).

A lei de Darcy é válida quando o fluxo de Darcy,  $q$ , ( $L/T$ ) aumenta com o gradiente hidráulico ( $L/L$ ) e a equação funciona para a maioria das velocidades e geologias encontradas nos estudos de água subterrânea. Ela desvia-se desse comportamento de linha reta em velocidades muito altas, tais como as encontradas em rocha cristalina fraturada. Na última situação, relações não lineares são muito comuns (Bear, 1979).

Embora a lei de DARCY tenha sido desenvolvida experimentalmente, varias tentativas têm sido feitas para derivá-las analiticamente (TAYLOR, 1948). Derivações iguais eram usadas para uma compreensão completa dos fatores que dependem de  $k$ . Numa outra aproximação, POISSEUILLE (1840) trabalhou sobre o fluxo de fluidos entre tubos capilares. Esta lei foi modificada subseqüentemente para uso em solos pela introdução de certa equivalência dos parâmetros do solo (TAYLOR, 1948). A teoria completa para fluxo Bi-Dimensional para regime permanente em meios porosos indeformáveis foi desenvolvida por Pavlovsky (1922), que a tratou como um problema de Física-Matemática, adotando o método do mapeamento conforme e resolveu vários problemas relacionados com percolação em fundações. Terzaghi (1922) interpretou corretamente o mecanismo da erosão.

O coeficiente de permeabilidade é matematicamente descrito como um tensor simétrico de segunda ordem, com nove componentes (BEAR, 1979; FRANCIS, 1980). Para entender o conceito de um tensor, é útil discutir os dois termos: escalar e vetor. Um escalar possui somente magnitude, como é o caso de carga hidráulica, enquanto um vetor possui magnitude e direção, como o gradiente na lei de DARCY (1911).

Um tensor é um valor cuja magnitude muda ao longo de uma dada direção, como é o caso dos solos anisotrópicos, nos quais o coeficiente de permeabilidade varia com as coordenadas, contudo, numa determinada direção o valor da permeabilidade de acordo com o tipo de solo. O conceito de tensor ajudará a descrever os fenômenos matematicamente com as coordenadas. BEAR (1979), FRANCIS (1980) e de MARSILY (1986) exemplificaram as implicações práticas do coeficiente de permeabilidade como um tensor. Os nove componentes dos tensores do coeficiente de permeabilidade,  $k$ , se reduzem eventualmente à apenas três:  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$ .

As primeiras pesquisas sobre o problema de fluxo nos meios porosos, apareceram em meados do século passado. Assim, em 1886, Forchheimer mostrou que a distribuição das pressões da água e velocidades de percolação são governadas pela Equação de Laplace e em 1901 propôs fórmulas generalizadas para fluxo Bi e Tri-Dimensionais, ampliando assim os estudos unidimensionais.

As aplicações do fluxo subterrâneo para várias situações, as primeiras tentativas para avaliar o fluxo de ar e água através de solos foram feitas por Green e Ampt (1911), levando-se em conta as propriedades físicas do solo. Subseqüentemente, Kozeny (1931) através de sua contribuição "Fluxo de Fluidos Homogêneos através de Meios Porosos", deu importância para assuntos ligados com exploração de petróleo e Engenharia Química.

A cientista Russa Polubarinova-Kochina (1952) revolucionou as noções sobre teorias do movimento de águas subterrâneas em meios homogêneos, heterogêneos e estratificados e resolveu inúmeros problemas com contornos variáveis. O valor do coeficiente de permeabilidade é matematicamente descrita como um tensor simétrico



de segunda ordem, como nove componentes (Bear, 1979; Franciss, 1980). Para entender o conceito de um tensor, é útil discutir os dois termos mais comumente compreendidos: escalar e vetor. Um escalar possui somente magnitude, como é o caso da carga hidráulica, enquanto um vetor possui magnitude e direção, como o gradiente na lei de Darcy.

Todd e Bear (1961) resolveram problemas de percolação com camadas anisotrópicas em meios porosos com modelos eletroanalógicos conseguindo excelentes resultados. Todd (1970) resumizou seus resultados e outros em forma de enciclopédia.

Bear (1979), Franciss (1980) e de Marsily (1986) foram os melhores para explicar as implicações práticas da condutividade hidráulica como um tensor. Os nove componentes dos tensores da condutividade hidráulica se reduzem eventualmente a apenas três:  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ .

A equação de DUPUIT (1963) é um artifício poderoso e uma ferramenta simples para ser usada pelos engenheiros em soluções de problemas ligados a aquíferos não confinados. A equação pressupõe declividades suaves da superfície freática. A vazão que atravessa uma área unitária está dada pela lei de DARCY,

$$q_w = -k \frac{\Delta\phi}{\Delta s} = -k \frac{\Delta_2}{\Delta_s} = -k \sin\theta$$

. Um  $\theta$  pequeno pode ser substituído por  $\text{tg}\theta$ , assim pela declividade  $\Delta h/\Delta x$ . A suposição que  $\theta$  é pequeno significa que as linhas de fluxo são quase horizontais, assim  $\phi = \phi(x)$  em vez de  $\phi = \phi(X,Z)$ . Então a equação não é aplicável. O fundo do aquífero é supostamente horizontal. Na maioria dos casos, as suposições de DUPUIT podem ser tratadas como aproximações razoáveis

em algumas regiões, onde o valor de  $\theta$  é realmente pequeno e/ou o fluxo é essencialmente horizontal.

Uma vantagem importante, empregada pelas suposições de DUPUIT é que  $\theta = \theta(x,y,z)$ , tendo sido substituído pela expressão  $h = h(x,y)$ , em que  $z$  não aparece como uma variável independente. Além disso, a medida em que um ponto da superfície freática,  $p = 0$  ou  $p =$  pressão atmosférica e  $\theta = h$ , a linha vertical através deste ponto também é uma linha equipotencial em que  $\phi = h =$  constante. Em geral,  $h$  varia também com o tempo à medida em que  $h = h(x,y,t)$ .

Para melhor entender-se as suposições de DUPUIT, integra-se à expressão exata do fluxo, num aquífero freático onde  $\phi = \phi(x,y,t)$  ao longo da seção vertical a partir do fundo do aquífero.

As suposições de DUPUIT, não tratam da presença da superfície e assim a superfície freática passará pelo ponto  $x = L$  e  $h = h_L$ . Usando a condição a jusante da margem, teremos a equação governante de DUPUIT-FORCHEIMER (1863), para o

cálculo da vazão:  $Q = K \left( \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} \right)$ . A superfície freática parabólica será portanto a linha cheia. Enquanto a superfície ou a linha freática deve ser tangencial à linha horizontal a  $x = 0$ , e a superfície vertical  $x = L$ . Existe uma anomalia no caso em que a linha freática parabólica terá um gradiente  $dh/dx |_{x=0} = -Q / Kh_0$  e  $x = L$  a face exposta à atmosfera é desprezado. Na ausência da face livre, a teoria exata da margem freática e da aproximação de Dupuit serão coincidentes. Como regra simples podemos dizer que para distâncias superiores a 1.5 e a 2 vezes a altura do domínio do fluxo, a

equação de DUPUIT terá precisão suficiente alta, pelo menos para o cálculo da vazão se não fosse as elevações freáticas (BEAR, 1972).

A retenção específica é baixa para litologias com poros altamente interconectados, tais como areia, cascalho e calcário (tipicamente menos de 4%); é alta para materiais com um baixo grau de espaços porosos interconectados, tais como argilas (mais de 40%). Em geral, quanto menor for o tamanho do grãos, maior será a retenção específica. BEAR e VERRUIJT (1987 ) chamaram essa porosidade interconectada como sendo porosidade efetiva para fluxo através do meio,  $n_{ef}$ , ao invés de referir-se somente com porosidade efetiva,  $n_{ef}$  portanto foi-se estabelecido assim a conexão com fluxo. A velocidade verdadeira de um contaminante depende do valor da porosidade efetiva para o fluxo  $n_{ef}$ . Em três dimensões, os poços são fontes pontuais que são matematicamente descritas por três funções delta, de Dirac.

A estratificação de velocidade presente em todos os solos associada à difusão molecular, causada pelas diferenças de concentração, resulta no espalhamento de contaminantes através do processo de macrodispersão (Bear e Verruijt, 1987).

Harr (1962) no seu clássico trabalho "Groundwater and Seepage", publicou soluções de vários problemas de fluxos subterrâneos confinados e não confinados, saturados e não saturados incluindo teorias não muito utilizadas como mapeamento conforme e hidrográficos.

Ernst (1962), aperfeiçoou a teoria de Dupuit dividindo o fluxo percolado de canais em três partes para solos isotrópicos homogêneos estratificados.

Bouwer (1969) usou modelos eletroanalógicos para avaliar perdas d'água por percolação dos canais comparando seus resultados com os de Dachler (1936), Dupuit e Ernst.

## 2.1 A HIDRÁULICA DOS POÇOS EM AQÜÍFEROS CONFINADOS E LIVRES

Para aquíferos livres, usando a teoria de Dupuit-Forchheimer, Adolf e Gunther Thiem (1906) conjuntamente desenvolveram equações para obtenção da vazão com fluxo laminar horizontal permanente.

Um grande avanço nos estudos de fluxo não permanente foi dado por Theis (1935) que desenvolveu uma formula introduzindo os conceitos de fator de tempo e coeficiente de armazenamento. Theis notou que quando o poço penetrante num aquífero confinado e extenso é bombeado com vazão constante, a influencia da vazão se estende no espaço com o passar do tempo e provou que teoricamente não se pode conseguir regime permanente.

Hantush (1964) publicou soluções analíticas em água subterrânea no livro "Advances in Hydroscience" para a determinação dos parâmetros do aquífero.

Hantush (1962) estudou os efeitos de rebaixamento sobre a vazão explorável em aquíferos confinados com os casos de penetração parcial e total e deu expressões em forma de séries infinitas. Posteriormente em 1964 em seu trabalho "Hydraulic of Wells" tratou extensivamente sobre assuntos como poços artesianos, interferência entre poços, efeitos de barreiras impermeáveis e aquíferos semi-permeáveis.

Heath (1982) mostra um exemplo de um extenso aquífero confinado formado por areias inconsolidadas e lentes intercaladas de silte e argila na parte central do Atlantic oastal Plain nos Estados Unidos.

Quando dados de campo são limitados os padrões de fluxo complexos em aquíferos não homogêneos, anisotrópicos e de multi camadas só podem ser estimado através de modelos de fluxo multi dimensionais. FREEZE e WHITERSPOON (1966,1967,1968) estão entre os primeiros pesquisadores a usarem modelos numéricos de fluxo bi-dimensionais, para estudarem padrões de fluxo regional de água subterrânea sob condições geológicas não homogêneas. Os artigos desses autores representam contribuições clássicas para o campo da hidrologia de água subterrânea e contribuições pioneiras na área de modelação matemática.

Freeze e Cherry (1979). A anisotropia em sedimentos granulares é devido à orientação dos minerais de argila que pode estar presente, e os sedimentos, se depositados em sistema de água corrente, podem orientar-se na direção da correnteza da água.

Davis e DeWiest, 1966, mostram o uso dos mapas potenciométricos que podem ser valiosos em estudos preliminares de um projeto de recursos hídricos.

Toth(1963)apresentou uma rede de fluxo regional de água subterrânea em Central Alberta, Canadá, assumiu a isotropia e traçou as linhas de fluxo perpendiculares as linhas equipotenciais. Van Everdingen (1963) apontou o erro de Toth através de um relatório no Canadian Geological Survey sobre construção das redes de fluxo de secções transversais com escala vertical exagerada.

Winder (1976) redes clássicas de fluxo verticais, sem levar em conta o exagero na escala vertical de 80:1. Embora ele estivesse consciente do problema das suas simulações, no computador, das iterações entre lagos superficiais e a água subterrânea em topografia ondulada, esse autor usou uma razão de  $KH/KV = 1000$  que tende a diminuir significativamente o efeito do exagero na escala vertical (80:1) de rede de fluxo. Porém, na maioria dos casos, não se deparam com tais anisotropias exageradas e os efeitos de exagero na escala vertical precisam ser levados em consideração.

Cleary e Cleary (1988) mostraram na análise de aquífero, o uso de microcomputadores com pacotes gráficos interativos. Em teoria, ela serve tanto para aquíferos confinados como para aquíferos freáticos, contudo a distribuição de carga ao longo de uma superfície exposta de um aquífero freático também define o contorno físico superior do aquífero. A aplicação de Neuman (1975), é um método útil para análise de dados de teste de bombeamento em aquíferos freáticos.

Kashef(1986) investigou-se os efeitos de contaminantes transportes na Subsuperfície os quais freqüentemente requerem o cálculo das componentes da velocidade e a direção da mesma. Segundo Kashef, 1986, as linhas equipotencias podem ser construídas dependendo das cargas registradas e da precisão desejada.

## 2.2 DRENOS INTERCEPTORES NA DELIMITAÇÃO DO ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES

Pouca literatura bibliográfica está disponível sobre a literatura de Drenos Interceptores na Delimitação do Espalhamento dos Contaminantes.

Os drenos interceptores tratados neste estudo referem-se aos drenos abertos que são comumente usados no campo agrícola com altos lençóis freáticos para fim de drenar a parte superior do aquífero, assim rebaixando o lençol freático. Tradicionalmente, os engenheiros agrícolas tem sido os mais interessados com projetos que tem a finalidade de otimizar as profundidades e espaçamentos destes drenos na remoção efetiva da água subterrânea. Porém, o dreno interceptor tratado aqui também pode servir na captura e limpeza dos contaminantes dos aquíferos rasos e poderá ser usado para delimitar a extensão de químicas agrícolas em água subterrânea. Maiores informações serão apresentadas nos próximos capítulos sobre este assunto.

Os drenos interceptores considerados dentro daquele estudo são uma feição proeminente de uma areia simples; aqueles drenos foram construídos em volta do século XVIII, para fornecer geral área drenada e especificação para drenar certas áreas alagadas de agricultura. Uma equação que foi utilizada é de McDonald e Hanbaugh (1983), a qual foi numericamente resolvida, usando o código de diferença finita desenvolvido pelos autores citados. As condições de contorno para o modelo consiste da fronteira sem fluxo ao fundo que tem contato como rocha Sã. Os contornos de carga constante estão no lado esquerdo e lado direito do dreno. Estes contornos constantes de carga fixa são suposições aproximadamente feitas. Porém, estas margens

foram implantadas a uma distância grande, para não afetar significativamente o fluxo próximo ao dreno. De acordo com estes autores, na margem no topo do modelo, pode ocorrer recarga a ou descarga da superfície freática.

Zheng et al.(1988) determinaram a profundidade da linha que se divide as vazões e quantificaram ainda a profundidade de penetração da barreira hidráulica assim criada pelo dreno interceptor, a qual pode ser usada na determinação de efetividade do dreno. Embora as linha de fluxos possam ser construídas graficamente baseada nas cargas de distribuição, é mais quantitativa e precisa determinar as linhas de fluxo a partir de solucionar a função de fluxo, especialmente em aquíferos heterogêneos e anisotropicos assim neste estudo o modelo será resolvida através de função de distribuição de fluxo. Zheng et al. (1988) também apresentaram uma solução analítica simples que diz que a profundidade da linha de fluxo que se divide é inversamente proporcional ao gradiente da superfície do fluxo uniforme regional (  $I$  ) e diretamente proporcional a  $(h_0 - h_d)$ , sendo a diferença entre cargas hidráulicas entre a interfase que separa o dreno e o aquífero homogêneo.

Em 1985, Fogg and Senger desenvolveram a equação governante para fluxo Bi-Dimensional da água para estado permanente do fluxo irrotacional.

Baseada nas medições no campo, Faustini (1985) interpretou a forma geométrica de fluxo adjacente ao dreno. Enquanto a forma geométrica de fluxo baseado na simulação do computador e aquela baseada através de observação no campo se concordam uma com outra na parte rasa do Aquífero, eles se diferiam significativamente na porção mais profunda do aquífero.



O conceito de divisa subterrânea da linha de fluxo foi introduzido para delinear o fluxo subterrâneo que interceptado pelo dreno parcialmente penetrante. A profundidade de divisa é um indicador para quantificar o grau que o dreno age, como uma barreira hidráulica efetiva para limitar o espalhamento da água subterrânea contaminada nos aquíferos rasos sob condições permanentes. Gilbert e Gress, 1987, Canter e Knox, 1986, American Petroleum Institute, 1982, sugeriram sistemas de drenos interceptores que podem ser usados como um meio confiável no controle de poluição.

A efetividade do sistema interceptor é devido o fato que ele criaria uma barreira hidráulica que captura a Água Subterrânea poluída que vem das fonte existentes na montante do aquífero (Kuss et al., 1983). O uso mais popular do sistema interceptor e nos aquíferos onde os poluentes são concentrados próximos a superfície freática ( Lençol Freático), como é o caso nas Químicas Agrícolas ou derramamento dos óleos ( Blake e Lewis, 1982), este sistema esta freqüentemente usado em conjunto com outras ações remediais de Água Subterrânea com paredes que separam água de esgoto na recuperação de limpeza da Água EPA em 1985 discutiu o sistema interceptor que varia a penetração completa de trincheira vertical até drenos parcialmente penetrantes ( Brown, 1984). Porém somente os casos dos drenos parcialmente penetrantes são tratados nesta tese.

Drenos interceptores são facilmente instalados e exigem uma manutenção mínima. Porém o uso efetivo destes drenos interceptores depende na maioria dos casos sobre a situação geológica e as condições hidrológicas ( Quince e Gardner, 1982). Para fins de avaliar a eficácia do Dreno Interceptor na delimitação de água poluída, é vital

ter um melhor entendimento sobre o sistema de fluxo subterrâneo na vizinhança do dreno, sobre as várias teorias do Fluxo Subterrâneo que se aproxima de um dreno parcialmente penetrante, Cohen e Miller, 1983 trataram detalhadamente no seu artigo sobre Modelos Analíticos na Avaliação do Tipo Corretora dos componentes perigosos da água dos esgotos, porém a maioria das soluções se tratam com rebaixamento e/ou as distâncias da influência causadas pela presença do dreno e fornecem assim poucas informações sobre Sistema Subterrâneo na vizinhança dos drenos.

Sobre os sistemas anisotrópicos e a teoria da refração das linhas do fluxo nos sistemas com multi-camadas ( Hubbert, 1940), foi a teoria detalhada, devidamente ilustrando os gráficos pertencentes, os quais são auto-explicativos. No fluxo bi-dimensional, estes conceitos tem amplas aplicações a respeito de percolação nas barragens de terra em canais não revestidos e nas outras situações da Engenharia Civil. ( Ver Anexos VIII)

### CAPÍTULO III

#### MODELO HIDRODINÂMICO E MATEMÁTICO ADOTADO

### 3.0 - MODELO HIDRODINÂMICO E COMPUTACIONAL

#### ADOTADO:

#### 3.1 - DESCRIÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO:

O perfil do modelo para estado permanente em duas dimensões foi usado para examinar o potencial do dreno para fim de delimitar o movimento dos químicos agrícolas além de água dentro do dreno. O objetivo do modelo é para determinar a eficácia do dreno em termos da profundidade até qual o fluxo subterrâneo do lado jusante interceptado pelo dreno.

A equação utilizada para fluxo Bi-Dimensional sob condições permanentes é:

P/ Aquífero Confinado:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q + S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

onde h= a carga hidráulica, Tx, Ty São transmissividades nas direções x,y, S=Coeft. de Armazenamento, n= porosidade do meio, Q=Fonte ou Sumidouro da água.

P/ Aquífero Não-Confinado:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x b(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y b(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q + n \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

onde  $h$  = a carga hidráulica,  $T_x$ ,  $T_y$  São transmissividades nas direções  $x, y$ ,  $S$  = Coef. de Armazenamento,  $n$  = porosidade do meio,  $Q$  = Fonte ou Sumidouro da água,  $b(h)$  = espessura saturada do aquífero não-confinado. Onde  $h$  é a direção hidráulica,  $x$  e  $y$  são as coordenadas dos eixos que coincide com a direção principal da condutividade hidráulica tensor ( $k_x$  e  $k_y$ ); e  $r$  é usado para representar ambas distribuição e fontes pontuais (positiva) ou se afundar (negativo). Essa equação é numericamente resolvida usando o código de diferença finita desenvolvido por McDonald e Hanbaugh (1983). As condições de contorno para o modelo consiste de fronteira sem-fluxo ao fundo que tem contato como Rocha Sã e com contornos de carga constante no lado esquerdo e lado direito.

Estes contornos constantes de carga fixa são as suposições aproximadamente feitas. Porém, estas margens foram implantadas a uma distância grande, para não afetar significativamente o fluxo próximo ao dreno. Na margem décima no modelo, pode ocorrer recarga a ou descarga da superfície freática.

A aproximação do dreno no modelo de diferenças finitas é ilustrada na Figura 3.A. Os programas em PASCAL para os casos foram desenvolvidos segundo os exemplos dados por Toth (1939); (Wang e Anderson, 1982).

Os programas foram adaptados e mudados por Seemanapalli V.K. Sarma Ph.D. e aplicados para as situações atuais com a variação na profundidade, largura e localidade do Dreno Interceptor. A camada do sedimento do dreno é representada pelo

prisma retilíneo de materiais porosos. A perda através do sedimento do dreno,  $q_d$  é aproximadamente dada pela Lei de Darcy, como abaixo:

$$q_d = K_{sd} * W * (h_o - h_d) / m \quad (3)$$

onde  $q_d$  é em ( $\text{cm}^2/\text{dia}$ ) e  $K_{SD}$  ( $\text{cm}/\text{dia}$ ) e  $m$  ( $\text{cm}$ ), que são, respectivamente a condutividade vertical hidráulica e espessura da camada sedimentada no dreno;  $w$  ( $\text{m}$ ) é a largura do canal dreno,  $h_d$  é a carga no lado de sedimento do dreno e  $h_o$  é carga no centro da célula que contém o dreno.

### 3.2 - DISCRETIZAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A grade tratada aqui consiste de 13 linhas e 26 colunas com um total de 309 nós ativos. Objetivo é estudar o fluxo padrão dentro e na vizinhança da vala. Quando a equação 1 governante de Bouseneque (1904) é resolvida, as cargas hidráulicas em todos os nós serão obtidas. Porém, é necessário conhecer as direções das linhas do fluxo a fim de identificar a posição, da linha, na qual se divide, separando o fluxo interceptado pelo dreno e o que passa abaixo do dreno. A profundidade dessa linha, que se divide estas vazões, quantifica a profundidade de penetração da barreira hidráulica, assim criada pelo dreno interceptor, a qual pode ser usada na interpretação de efetividade do dreno. (Zheng et al., 1988). Embora

as linhas de fluxo podem ser construídas graficamente baseada nas cargas de distribuição, é mais quantitativa e precisa determinar as linhas de fluxo a partir de solucionar a função de fluxo, especialmente em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos assim neste estudo o modelo será desenvolvido através de função de distribuição de fluxo.

A equação governante para fluxo Bi-Dimensional da água no estado permanente e fluxo irrotacional (Fogg and Senger, 1985) é dada por (Equação 1). Onde  $\Psi$  é a função do fluxo que tem a dimensão de  $\text{cm}^3/\text{dia}$ . Essa equação pode ser solucionada pelo mesmo programa computadorizado usado para resolver a equação uma vez que as duas equações tem a mesma forma. As condições de contorno foram dadas separadamente no Anexos IV. Onde  $\Psi_0$  é o valor quando  $t_1=0$ . F representa a fonte na solução da função e é diretamente análogo ao termo do fluxo na solução da carga, cujo valor é determinado pela diferença ( $\Delta h$ ) entre cargas nos nós vizinhos, ao longo da margem. Para o modelo em estudo  $\Psi_0$  é supostamente zero ao longo da margem de sem-fluxo,  $F=0$  ao longo das margens de cargas constantes em ambos os lados. Para cada nó ao longo da superfície freática, o F é calculado para várias cargas de superfície. O dreno é tratado como um sumidouro em função do modelo e assim faz parte da margem superior.

### 3.3 - MODELO COM DADOS DE ENTRADA E CALIBRAÇÃO

A permeabilidade na direção horizontal ( $K_x$ ) foi tratado como valor unitário, um padrão de referência, enquanto os valores reais (como foram dados no Anexos IV) são de ordem de  $K_x=3.38*10E-04$  cm/s e  $K_y=3.43*10E-04$  cm/s respectivamente nas direções X e Y. A condutividade hidráulica  $K_{dreno}$  foi tratado como 1.02, o qual deu melhores resultados nas simulações, enquanto foi tratada na simulação numérica. É evidente que a forma geométrica do fluxo está sujeita as flutuações de curto prazo em resposta, das mudanças que ocorrem na forma de recarga subterrânea do aquífero.

O sistema de fluxo responde rapidamente para as mudanças de curto prazo, devido os altos valores de permeabilidade dos solos. Consequentemente o sistema de fluxo pode ser visto como uma síntese dos modos de estado quase permanente dentro dos períodos diferentes de tempo, e assim é transitório.

### 3.4 - CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração foi feita com uma variação de distribuição especificada da recarga subterrânea ao longo do lençol freático, até que tenha uma boa concordância entre cargas simuladas e medidas. Além disto, o fluxo simulado no dreno qd foi comparado com o valor real medido.



A forma geométrica de recarga subterrânea ao longo da secção da superfície foi determinada baseando-se nas observações feitas no campo de estudo (Faustini, 1985). Usando a topografia, a configuração da superfície freática e as características hidrológicas da superfície do terreno tais como terras alagadas, riachos e drenos de recarga em uma determinada bacia de drenagem, onde o local de estudo se situa.

Após a calibração do modelo, as cargas hidráulicas desenvolvidas ao longo da superfície freática foram usadas na determinação do valor de  $F$  em função de fluxo (ver anexos IV).  $F=0$  nas duas margens de carga constante e  $\Psi_0=0$  ao longo da margem sem-fluxo no fundo.

A forma geométrica do fluxo na área de ABCD (Figura 3.A) foi traçada pelo programa computacional que mostra a linha de fluxo que divide a área do fluxo em duas partes. A presença do dreno interceptor criaria uma barreira que previne a alcançar de montante para jusante as químicas agrícolas e o espalhamento das mesmas e a barreira, assim previne acumulação dos poluentes na parte jusante do aquífero. É de interesse examinar de perto a forma geométrica de fluxo na vizinhança imediata do dreno. A Figura 3.B mostra a rede de fluxo simulada adjacente ao dreno. As linhas de redés do fluxo  $\Phi$  e  $\Psi$  serão ortogonais nos solos isotrópicos ou não ortogonais nos solos que exibem anisotropia. Montando uma rede de piezômetros em diferentes locais (multiníveis), a rede pode ser traçada com uma perfeição maior. Uma parte do fluxo subterrâneo poderá passar abaixo do dreno, antes de ser interceptado e até retornar para o dreno. Baseada nas medições no

campo, Faustini (1985) interpretou a forma geométrica de fluxo adjacente ao dreno como mostrado na Figura 3.C. Enquanto a forma geométrica de fluxo baseada na simulação do computador se conforme bem com aquela baseada através de observação no campo e eles se diferem significativamente na parte mais profunda do aquífero.

O modelo numérico usado, aqui pode servir como uma ferramenta útil na interpretação dos dados de campo e no melhor entendimento do sistema de fluxo.

**CAPÍTULO IV**  
**EFEITOS AMBIENTAIS IMPOSTOS SOBRE DRENOS**  
**INTERCEPTORES**

#### **4.0 - EFEITOS AMBIENTAIS IMPOSTOS SOBRE DRENOS**

##### **INTECEPTORES**

Em seguida serão estudados vários efeitos ambientais da hidrologia hidráulica e hidrogeologia sobre o dreno ineteceptor

#### **4.1 - FLUTUAÇÃO SAZONAL DO LENÇOL FREÁTICO E SEU**

##### **EFEITO**

A barreira hidráulica criada pelo dreno pode ser uma barreira completamente ou parcialmente penetrante. Desde que a forma geométrica do fluxo varia em resposta das flutuações sazonais do lençol freático e do nível da água no dreno, é razoável esperar que a profundidade da barreira hidráulica varia também sazonalmente. Uma linha de fluxo se divide as duas partes.

Embora o dreno não poderia criar uma barreira hidráulica completamente penetrante, atingindo o fundo do aquífero, ele ainda efetivamente delimitará o espalhamento das químicas agrícolas a divisa do fluxo, se localizando próximo ao fundo do aquífero.

Dependendo da situação, somente uma parte do fluxo total poderá ser interceptado pelo dreno em um determinado tempo.

## 4.2 - EFEITOS DAS CONDIÇÕES HIDROLOGICAS

A solução analítica simples proposta por Zheng , (1988) diz que a profundidade da linha de fluxo que se divide é inversamente proporcional ao gradiente da superfície freática uniforme regional  $I$  , e diretamente proporcional ao  $(h_0 - h_d)$ , sendo a diferença entre cargas hidráulicas entre a interfase que separa o dreno do aquífero homogêneo.

No campo a configuração da superfície freática é geralmente não-uniforme e não-linear. A superfície é não-linear especialmente na vizinhança do dreno onde existem depressões e no lado jusante do dreno que revertem o gradiente e que causam água a fluir na direção do dreno. O parâmetro  $I$  aqui representa a configuração geral da superfície freática o qual será computado a partir da diferença de cargas entre as duas margens da Figura 2.A .

O termo  $(h_0 - h_d)$  foi introduzido para quantificar o fluxo subterrâneo que flui do lado E para o dreno cujo valor é calculado pela distribuição de recarga/descarga ( $R$ ) e o nível de água no dreno ( $h_d$ ). Assim  $(h_0 - h_d)$  é relacionado com  $R$  e  $h_d$ . Com o aumento ou diminuição no  $R$ , correspondentemente teremos um aumento ou diminuição em  $h_0 - h_d$ .  $I$  e  $h_0 - h_d$  podem ser medidos no campo, estes parâmetros fornecem a avaliação de eficácia do dreno.

No próximo capítulo 5 serão detalhadas as experiências computacionais feitas com drenos de profundidades e espaçamentos diferentes e com varias permeabilidades da matriz e do material do dreno e os resultados que foram

apresentados na forma das tabelas e gráficos, serão analisados nos esquemas diferentes que serão explicados.

**CAPÍTULO V**  
**ANÁLISES DO RESULTADOS**

## 5.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 - ESQUEMA DE MODELAÇÃO DOS DRENOS

#### INTERCEPTORES NA CONTENÇÃO DOS POLUENTES

Afim de avaliar a eficácia dos drenos totalmente ou parcialmente penetrantes, foram concebidos vários arranjos dos drenos para obter uma perspectiva detalhada de efetividade do dreno no determinado local.

Sendo a área estudada da forma quadrática com  $75 \times 75 \text{m}^2$ , com um ponto de 1.4m de profundidade na média, para fins computacionais no programa de diferenças finitas, foi discretizado o retângulo de 75m de largura por 1.4m de profundidade, com  $dx=dy=3\text{m}$ , na maioria das situações.

A carga hidráulica tem um nível de referência de 100m foi suposta, o qual facilitou os cálculos. Dependendo da precisão desejada, a largura de 75m foi dividida em 25 partes iguais em algumas tentativas, ou em 50 ou até 75 partes iguais em outras tentativas.

Vale a pena salientar o fato que nas iterações que o computador faz usando a estrela de cinco nós (Ames, 1983), o tempo decorrido para alcançar as duas iterações finais, que se diferenciam por uma precisão prefixada, seja de 0.01m ou 0.001m ou 0.0001m, será enorme com a matriz de  $75 \times 13$  espaços, em comparação de  $25 \times 13$  espaços. Assim os casos tratados de  $75 \times 13$  espaços são limitados, a maioria dos casos sendo de  $25 \times 13$  espaços.



A idéia é de estabelecer uma aproximação que possa ser usada para expressar quantitativamente a habilidade do Dreno Interceptor na delimitação do movimento da água contaminada sobre várias condições hidrogeológicas e hidrológicas. A aplicação destes conceitos e variações serão discutidos posteriormente.

Os parâmetros que influenciam o fluxo subterrâneo que atravessa o Dreno Interceptor na modelação dos mesmos, foram usadas as seguintes variações:

- Os posicionamentos dos drenos foram : 1/3, central e 2/3 do lado direito e, onde a carga hidráulica é maior.

- A profundidade do dreno variou em função dos espaços, no qual a profundidade foi dividida. A profundidade variou de 5, 8, 11 e 13 espaços, o último número representando um caso onde a penetração foi completa em função da profundidade do aquífero.

Assim as Figuras 5.A, 5.B e 5.C são auto-explicativas, mostrando profundidades e localizações do dreno de determinada largura.

- Sendo a permeabilidade do material do dreno um fator que influencia predominantemente o fluxo entrando no dreno ( o qual foi interpretado em função das linhas do fluxo que entram efetivamente no dreno ), foi variado o valor de permeabilidade do dreno de 1.02 ate 2.00, o valor intermediário representando a permeabilidade da matriz. Assim estes valores  $K_d$  do dreno ou  $K_q$  do aquífero representam permeabilidades adimensionais, os quais facilitam aos pesquisadores a adotar seus respectivos valores atuais dos terrenos, quando se fazem a convenção.

A permeabilidade da matriz do terreno é muito importante na seleção da implantação dos drenos interceptores para a efetivamente drenar os poluentes de um

aquífero. Assim foi feito um estudo onde a permeabilidade do terreno em questão passou a ser mesmo um valor unitário, tal estudo facilitaria em distinguir solos mais porosos ou permeáveis ( como areia siltosa, areia pouco argilosa ), em comparação daqueles solos menos porosos ou mais impermeáveis ( como solos siltes e argilas ) em comparação daqueles solos que não permitem fácil retirada de água.

Nos programas de Turbo Pascal que foram desenvolvido pelo meu orientador, a área hachurada introduzirá na equação governante os efeitos de  $K_x$  e  $K_y$  do dreno sobre as vazões drenadas no aquífero.

Entre os aquíferos disponíveis, em geral para fim de praticar irrigação nas terras agrícolas, é bom reconhecer previamente os que têm material da matriz e do dreno adequado para drenagem eficiente. Se não, o dreno não será eficiente a drenar, nem os contaminantes, nem a água poluída do aquífero, nem para retirada do excesso de água.

## **5.2 - CRITÉRIO DE ANÁLISE DOS DADOS A PARTIR DE EXPERIÊNCIAS COMPUTACIONAIS**

Para o caso de variação de profundidade de dreno com área de captura do mesmo com certa profundidade adotada para o dreno em questão, ( seja para o caso de 9 espaços ) a área capturada pelo dreno foi planimetrada e foi expressa em termos de percentagem da área total do retângulo que representa a secção do terreno, em abaixo do dreno as profundidades foram em ordem de 5,8,11 e 13 espaços( assim atingindo o fundo do aquífero, o que é um caso puramente de interesse acadêmico), os valores

intermediários foram obtidos com 6,7,9,10 e 12 espaços, e seus Compatíveis por Lon Poole e et ali, Mc. GrawHill, 1985) usando o programa de Regressão Geométrica (Programas Práticas em Basic IBM PC e seus Compatíveis por Lon Poole e et ali, Mc. GrawHill, 1985). O programa de regressão linear deu resultados errôneos.

A Figura 5.1 mostra o caso da rede de fluxo que existiu sem dreno no local do estudo que mostra as linhas equipotenciais e do fluxo que se cruzam ortogonalmente, mostrando os quadrados assim gerados sem dreno no meio homogêneo-isotrópico e as linhas equipotenciais e de fluxo, parecem como mostrado nas Figuras 5.D e 5.E. As linhas que se cruzam ortogonalmente ( com  $90^\circ$  ), assim obedecendo a Equação de Laplace ( ver anexo IV ).

A flexibilidade do programa, que gera as linhas equipotenciais e de fluxos é que o tamanho do retângulo que mostra a rede, bem como de acordo com os nossas exigências ou necessidades . É só ajustar o incremento Dx e Dy ou incremento das linhas equipotenciais e de fluxo  $\Delta\Phi$  e  $\Delta\psi$ . A finalidade desta flexibilidade é de obter uniformidade para todos os casos estudados.

Caso do aquífero sem dreno: O caso do aquífero sem dreno foi estudado afim de conhecer a rede de fluxo mostrando as linhas de PHI e PSI, que se cruzam na forma de “quadrados”, para ambos os casos de 14x28, 14x53 e 14x78 espaços. Essa rede servirá para fim de comparação com as outras demais redes, a serem obtidas com os casos do aquíferos com valores de  $K_{\text{dreno}}$  próximos ao valor unitário, (como  $K= 1.005$  , 1.01 e assim por diante) as linhas no fluxo se afastam uma das outras, dentro do dreno, assim mostrando velocidades menores, mas com  $K_{\text{dreno}}=1.20$ , as linhas se acumulam causando um dreno mais apertado com mais linhas de fluxo. A acumulação

das linhas de fluxo é tão grande que não dá para contar as linhas que estão dentro do dreno. Isto mostra que as velocidades dentro do dreno são mais altas. As diversas condições impostas como foi dito nos parágrafos anteriores.

Os quatro gráficos traçados com profundidades de espaços de 5,8,11 e 13 cm com o dreno colocado na posição 7, 8 e 9, foram mostrados. O valor da permeabilidade do dreno foi colocado como 1.2, enquanto o valor do  $K_{\text{dreno}}$  da matriz foi na ordem de 1.00, para fim de analisar a entrada das linhas de fluxo da matriz ( as vezes chamadas de formação) para o dreno. Da para ver que no dreno, as linhas de fluxo que se aproximam terão declividades acentuadas para baixo, assim mostrando uma tendência do dreno de atrair mais rapidamente possível as linhas de fluxo. Com as linhas se aproximando maiores profundidades ( do dreno ) ao longo da parede do mesmo as linhas se curvam na forma de semi-círculo, o que foi evidenciado em todas as Figuras 5.F1 até 5.13.

### 5.3- CRITÉRIO ADOTADO PARA O CALCULO DE VAZÃO

Para fins de obter a vazão, seja a vazão do aquífero ou a vazão que atravessa o dreno, a formula de Dupuit foi usada, que diz que  $Q = k*( h_1 - h_2 ) * X/L$ . No caso de vazão total  $h_1$  e  $h_2$  representam as cargas nas extremidades do retângulo grande, que representa 75 metros de largura e estas cargas são 100.4 e 101.4 metros respectivamente, enquanto a vazão carregada pelo dreno tem valores de  $h_1$  e  $h_2$  que são as cargas nas duas extremidades no dreno, seja no dreno de 1 metro de largura ou até 6 metros de largura.

A lei de Dupuit na qual  $Q = K(h_1 - h_2) * L * D / W$  foi usada para cálculo da vazão que percorre no interior do dreno interceptor, onde  $Q =$  vazão,  $K =$  permeabilidade,  $h_1$  e  $h_2$  as cargas hidráulicas nas duas extremidades do dreno,  $L$  sendo o comprimento do dreno,  $D$  a profundidade e  $W$  a largura do dreno.

As seguintes tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 e as figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as vazões calculadas de acordo com as regras ditas acima. A tabela 1 mostra a variação da vazão com a permeabilidade do material do dreno  $K_{\text{dreno}}$  variando de 1.0, 1.5, 2.0 e até 3.0. Observa-se que há um aumento gradual na vazão entre  $K=1$  até 3. Este aumento é esperado para o material do dreno mais poroso.

A variação de profundidade do dreno com vazão foi mostrado na figura 2 e tabela 2. Com profundidade maior a vazão aumentou até o valor de  $J=13$ , o que representa a penetração total do dreno. As linhas capturadas pelo dreno para cada uma das situações foram discutidas numa outra ocasião.

A figura 5.5 e tabela 5.5 representam a variação da largura do dreno com a vazão, observa-se que com largura maior que 2 metros, (entre 2 e 3 metros) a vazão diminui, mas com uma taxa menor que aquela observada entre as larguras 1 e 2 metros. Assim uma grande largura não terá nenhuma vantagem na capturação do fluxo subterrâneo do aquífero.

A figura 5.6 e tabela 5.6 mostram o efeito da declividade da linha freática sobre a vazão do dreno. Observe que a vazão aumenta com declividades acentuadas, sendo a declividade de 0.0134, o valor natural da linha freática existente no local de estudo. A declividade 0.2 foi somente estudado para fins acadêmicos, devido a não

existência de grandes declividades das linhas freáticas numa largura de 75 metros, este valor representando o valor real da área estudada.

As demais discussões sobre a variação do número das linhas ou tubo que estão sendo capturados com os fatores que influenciam devido a mudança na permeabilidade do material do dreno, sua largura e profundidade e o efeito da declividade da linha freática serão feitas nos próximos capítulos.

#### **5.4 - O EFEITO DE DISCRETIZAÇÃO DA REDE SOBRE AS LINHAS / TUBOS DO FLUXO CAPTURADA PELO DRENO INTERCEPTOR**

O efeito de discretização,  $Dx$  quando ( aumenta de 1.0, 1.5 até 3 ) sobre as linhas de fluxos foi mostrado nas Figuras 5.J.1 até 5.M.3 com o mesmo intervalo de 0.1 a posição do dreno no lado esquerdo, destas três Figuras parece como uma posição diferente da outra. Na Figura 5.M.1 o dreno parece como mais próximo do lado esquerdo devido ao fato que a largura de 75 metros foi dividida em 75 partes, cada um espaço representando um metro, enquanto na Figura 5.L.1, o dreno é mais afastado do lado esquerdo, devido o fato que o espaçamento  $Dx$  é 3 metros para este caso.

Observe se que enquanto o número de linhas  $N\psi$  que passam pela secção vertical do dreno é igual a 10, as declividades das linhas que entram no dreno são diferentes, sendo a curva que entra no caso da Figura 5.L.1 mais suave do que a Figura 5.J.1, o que ainda é mais suave do que a Figura 5.M.1. Dá para notar que o número de

linhas que entram no dreno em cada um dos casos parecem como 5, mais de fato levando em consideração as frações das linhas entre se, para o caso da Figura 5.J onde  $Dx=3$ ,  $N\psi=5$  ou  $N\psi=9$  tubos de fluxos entram, enquanto no casos das Figuras 5.J.1 e 5.M.1, estes números são na ordem de 5.5 e 5.0 tubos de fluxo. Assim a percentagem das linhas que entram nos caso das Figuras 5.J.1, 5.L.1 e 5M.1 são na ordem de 59, 55 e 50%. Isto mostra que  $Dx$  tem uma influência significativa sobre a percentagem de fluxo que entra no dreno ( em termos de fluxo total ).

A respeito da largura do dreno nos casos das Figuras 5.J.1, até 5.M.3 dois espaços colocados para o dreno significam respectivamente de 6, 3 e 2 metros de largura. Ainda que o dreno de 2 metros influencia 50% do fluxo e de 3 metros 56% do fluxo e de 6 metros de largura do dreno, quase 59% ou 60% do fluxo está entrando no dreno. É esperado que o dreno de 2 metros colocado a 6 espaços do lado esquerdo atrairia menos percentagem do que um dreno de seis metros na mesma posição com terreno de largura de 25 espaços. Assim, podendo interpretar que a largura do dreno na discretização da rede no computador, terá somente uma ligeira influência sobre o aumento na vazão.

A análise, através da regressão geométrica, da percentagem do fluxo capturado pelo dreno, versos o diâmetro do dreno mostra os seguintes resultados:

TABELA 5.1

Largura do dreno em m:	0.125	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3
% do Fluxo Capturado em função do fluxo total	37.08	41.45	45.84	50.70	53.78	55.08	57.13	59.48

A largura mais realística do dreno, será da ordem de 0,5 a 1,0 metro num terreno de 75 metros de largura. Mas, para se instalar um dreno desta largura, os espaços de  $Dx$  devem aumentar para 150 ou 300, o que significa um enorme tempo computacional que envolve uma matriz de  $14 \times 150$  ou  $14 \times 300$  espaços. Assim, uma extrapolação foi feita para saber a percentagem do fluxo que entra no dreno de 1,50 metros de largura. Os resultados de análise foram apresentados no quadro mostrado.

Vale lembrar que: na prática, larguras menores que um metro não são viáveis, para a construção do dreno, uma vez que os equipamentos usados na escavação não se acomodam num espaço curto.

Nas Figuras, 5.J.1, até 5.M.3 a profundidade do dreno em todos os casos foi de até  $J=5$  espaços, com  $Dx=1$  metro.

### **5.5-EFEITO DE POSICIONAMENTO DO DRENO SOBRE PERCENTAGEM DOS TUBOS DO FLUXO CAPTURADOS.**

Os três casos para os quais, o dreno foi posicionado nos pontos  $I=7,8$  e  $9$ , ( na margem esquerda  $F$ , no caso de 75 espaços com uma largura de 75 metros) com o dreno ocupando 2 espaços de um metro, igual a 2 metros e com profundidade de 11 espaços, observe que a área da poluição ou contaminação capturada pelo dreno diminui da Figura 5.N.3, onde o caso da Figura 5.N.1 representa o dreno mais próximo do lado direito, observe que a percentagem de área capturada e de 56,82%, enquanto no caso da Figura 5.N.2 ( no centro) é de 53,24% e no caso da Figura 5.N.3 é de 63,47%. A área de referência foi os tubos que foram capturados pelo dreno versus o número de tubos que



ocupam a profundidade inteira , uma vez que a área do lado esquerdo do dreno não entra nos cálculos. Este estudo mostra que drenos colocados mais próximos do lado esquerdo onde a concentração da poluição é maior, onde o valor de  $\phi$  é na ordem de 101.4 metros, a captura das linhas de fluxo é maior.

Como mostram as Figuras 5.N.1, 5.N.2 e 5.N.3 a profundidade do dreno tem uma influência sobre a captura dos tubos de fluxo. quanto maior a profundidade maior será a área de captura ou a percentagem de fluxos que entram.

#### **5.6 - VARIAÇÃO DA VAZÃO DO DRENO COM A PROFUNDIDADE EM FUNÇÃO DA PERMEABILIDADE.**

O gráfico mostra o crescimento da vazão com o aumento na profundidade do dreno com varias permeabilidades adotados. As larguras do dreno consideradas foram de 0.5, 1 e 1.5 metros, enquanto as permeabilidades variam de 1.02 a 1.20 (adimensionais ) e que quanto maior for a permeabilidade do dreno, maior será a facilidade com que a água do aquífero entraria no dreno, por exemplo, se usarmos cascalho como material do dreno teríamos uma rápida retirada de água do terreno pelo dreno adotado.

O caso da permeabilidade do dreno sendo igual ao valor unitário, isto significa que o dreno tem a mesma permeabilidade do terreno, isto significa que a vazão do fluxo dentro do dreno será a mesma do que a vazão da matriz.

### **5.7- VARIACÃO DA PERMEABILIDADE DO MATERIAL DO DRENO COM AS LINHAS DE FLUXO OU TUBOS QUE ENTRAM NO DRENO.**

Os dois casos das Figuras 5.O e 5.P mostram o efeito de anisotropia na matriz do solo sobre as declividades das linhas do fluxo ou a curvatura dos tubos de fluxo para os casos com  $K_{\text{dreno}}$  igual a 1.02 e 1.20. Com estes valores os drenos parecem como mais claros e mais escuros, respectivamente, devido ao fato que as linhas se distanciam mais para o caso de  $K_{\text{dreno}}$  igual a 1.02, para ambos os casos o primeiro um quarto do terreno ao longo da profundidade  $J=13$  espaços foi tratado como se o solo tivesse permeabilidade  $K=1.00$ , e próximo a um quarto mais próximo ao dreno tendo um valor de  $K=1.005$ , no interior do dreno assumindo um valor mais próximos dos valores anteriormente comentados. Observa-se que em barragens de terra com o zoneamento, a zona mais afastada do coroamento é mais impermeável e a zona próxima ao talude sendo mais permeável, onde as linhas de fluxos se rebaixam de repente com maiores declividades, especialmente na divisa onde há mudança brusca de permeabilidade, assim o dreno atrai mais tubos de fluxo, significando mais percentagem de água contaminada entrando no dreno, sendo a finalidade de atuação do dreno interceptor atrair maior parte do fluxo contaminado, a escolha do terreno e o conhecimento detalhado da variação da permeabilidade em um determinado trecho facilitaria melhor drenança da água poluída através do uso de drenos interceptores.

O mesmo procedimento pode ser estendido empregando drenos mais profundos, em localizações mais eficazes do mesmo.

### **5.8 - VARIAÇÃO DA DECLIVIDADE DA LINHA FREÁTICA COM NÚMERO DE TUBOS DE FLUXO OU LINHAS CAPTURADAS PELO DRENO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO MESMO**

Na seguinte discussão será apresentada a variação da inclinação da linha freática em função dos números de tubos de fluxo e profundidade de dreno. Com três profundidades de dreno captadas com  $J$  igual a 5, 8 e 11 espaços, o gráfico mostra a maneira em que as linhas do fluxo serão capturadas pelo dreno em função de  $m$ , sendo a declividade da linha freática na parte superior da matriz. O significado da Figura  $j < 5$ ,  $j < 8$  e  $J < 11$ , referenciam para aquelas condições onde a profundidade do dreno ocupa 5, 8 e 11 espaços. Para fins de Programação em Pascal, esta nomenclatura foi utilizada.

Observa-se que quando a profundidade do dreno ocupa 5 espaços, o número de linhas capturadas pelo dreno aumenta com o aumento na declividade da linha freática enquanto a % da área capturada pelo dreno diminui. (ver Figura 5.2)

A respeito da Figura 5.6 que mostra a variação do coeficiente angular ( $m$ ), com o número de linhas capturada pelo dreno, foi feita a regressão geométrica para os valores intermediários do coeficiente angular. Enquanto os quatro valores tratados de  $m$  são 0.0134, 0.05, 0.10 e 0.2, os demais valores foram obtidos pela interpolação. (Tabela.5.1, que está acima da figura 5.6)

A Figura 5.6 mostra que houve uma linha reta que representa a variação de  $m$  com o número de linhas de  $m$  igual a 0.01 até 0.09, a partir do qual tem uma rápida

mudança na declividade da linha para cima mostrando maior números de linha que entram para os valores de  $m$  igual 0.1, 0.15 e 0.20 e assim por diante. Assim com a diferença de  $(h_2-h_1)$  sendo maior para a mesma largura de 75 metros maior números de linha entram no dreno. Isto pode acontecer no caso de precipitação excessiva no terreno, onde ocorre uma diferença perceptível entre  $h_2$  e  $h_1$ , ou quando houve maior acumulação de água em  $h_2$  comparando a  $h_1$ .

Para o gráfico em questão (Figura 5.6 ), o valor de  $K_{\text{dreno}}$  é na ordem de 1.02, com  $D_2$  igual a 3 metros, a regressão geométrica mostrou um coeficiente de correlação de ordem de 0.9976 e valor de determinação, com erro padrão de estimativa de  $3.04E-02$ .

Os resultados assim obtidos foram mostrados na forma de tabela bem como traçado nas linhas do fluxo, claramente evidenciando maior número de linhas entrando no dreno com maior declividade. De fato, para as declividades de 0.1 e 0.5 houve uma grande acumulação das linhas para estes casos, e assim foi possível conhecer o número de linhas através de extrapolação, pelo uso do programa de regressão geométrica.

O ponto de inflexão onde houve a mudança de declividade da faixa 1 para faixa 2 é de interesse dos pesquisadores para induzir maior entrada de água para o dreno que facilitaria melhor drenagem de água poluída.

## **CAPÍTULO VI**

### **RECARGA DOS DRENOS INTERCEPTORES E ESTES EFEITOS Á DELIMITAÇÃO DO ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES**

## **6.0 - RECARGA DOS DRENOS INTERCEPTORES E ESTE EFEITO SOBRE A DELIMITAÇÃO DO ESPALHAMENTO DOS CONTAMINANTES**

No fluxo tridimensional no campo num aquífero não confinado interceptando o dreno parcialmente penetrante, (Fig. 3.C) uma partícula que origina no lado montante do dreno pode entrar no dreno ou passar seguindo o gradiente hidráulico para lado jusante do dreno, dependendo do sistema de fluxo e a posição da partícula; Nas linhas de fluxo na rede mostrada algumas destas podem entrar totalmente e assim serem capturadas pelo dreno. Mas, aquelas partículas abaixo da linha podem ficar fora do controle do dreno, e assim, se movimentam fora do dreno seguindo o gradiente hidráulico para jusante do dreno, caso a dispersão transversal é desprezível, esta superfície é referida como a superfície divisora, uma vez que esta superfície separa o fluxo interceptado da outra parte ( underflow ). (Fig.3.B )

A recarga subterrânea é um dispositivo para aumentar os tubos de fluxo que serão capturados pelo dreno interceptor. Através de recarga ainda podemos esperar que as linhas de fluxo se curvam no lado esquerdo do dreno, sendo o maior potencial localizado no lado direito do dreno, o fluxo ocorrendo assim do lado direito para esquerdo.

Na quantificação da eficácia do dreno na interceptação de água subterrânea poluída, a profundidade da divisa subsuperficial é importante. Com esta profundidade da divisa subsuperficial, é possível prever que os poluentes da fonte do lado montante

poderiam ser ou não interceptado pelo dreno, nos casos onde o efeito da dispersão é significativo, a divisa subsuperficial pelo menos providenciaria evidência sobre a habilidade do dreno em delimitar o espalhamento da água poluída. Além disso, o conceito de dispersão hidrodinâmica como foi proposto por Batu, 1987, pode ser introduzido para contabilizar este efeito de dispersão.

Em geral, a divisa subterrânea é complexa e tridimensional na vizinhança do dreno, como pode ser visto nas figuras 3.B e 3.C. Porém nos casos onde os drenos são distintos nos aquíferos, os componentes tridimensionais podem ser tratados aproximadamente como bidimensionais, assim reduzindo a complexidade do problema. Como uma primeira aproximação, a análise desta concentração se limita ao estudo do fluxo bidimensional.

No campo do fluxo bidimensional, a divisa subsuperficial pode ser representada como uma linha que se divide ao longo do fluxo regional (ou natural). Sob condições permanentes, Path Lines do fluxo (Ingersoll & Daugherty, 1983) subterrâneo se comportam como linhas de fluxo. A linha divisora na realidade é uma linha especial que separa o fluxo capturado com o under-fluxo ou sob-fluxo que flui abaixo desta linha. A posição desta divisa poderá ser determinada analiticamente ou numericamente. Uma solução analítica simples para o fluxo bi-dimensional sob o estado permanente que ocorre abaixo do dreno com declividade linear foi adotado seguindo as instruções de Slichter, 1899. O aquífero é supostamente infinito em extensão espacial, isotropico e homogêneo e situado no plano XY, onde Y representa a dimensão vertical com a carga ao longo de  $Y = 0$  linear, representando o lençol freático ( $h = h_0 + Ix$ ) interceptado pelo dreno, o qual tem uma carga constante  $h_2$  e largura  $2a$  no intervalo de  $-a \leq x \leq +a$ .

É o gradiente uniforme do lençol freático é  $\partial h/\partial x$  e a carga no aquífero abaixo do dreno é  $h_0$ .

### 6.1 - EFEITO DA RECARGA NO DRENO INTERCEPTOR LINEAR SOBRE OS TUBOS DO FLUXO

O dreno linear é definido como um dreno que tem extensão ao longo da superfície e pode ser tratado como uma depressão de 3m ou 6m da largura, não ocupando uma certa profundidade. Tais drenos foram tratados por Zheng et ali. (1988) sobre os quais a teoria foi desenvolvida. (Ver Anexo IV). Assim, este tipo de dreno não terá uma profundidade de  $J= 5, 8$  ou 11 espaços, como foi tratado nos capítulos anteriores.

É obvio que a divisa subterrânea controla a habilidade do dreno interceptor na contenção e na captura de água poluída. Assim a profundidade da divisa subterrânea pode ser usada diretamente para quantificar a eficácia do dreno. Porém a profundidade desta divisa varia com a distância do dreno, como foi mostrado na Fig. 6.2. Será útil para identificar a profundidade específica que é um identificador da eficácia do dreno interceptor. Para obter tal profundidade específica, suponha que  $l_a \ll (h_0 - h_d)$ .

Na solução numérica o ponto de estagnação não pode ser exatamente localizado uma vez que o problema foi discretizado. Para localizar esta divisa, é necessário seguir o contorno detalhadamente até que este ponto seja localizado.(ver anexo IV).



Dada uma taxa de recarga de 20 cm/ano , a distribuição da linha de fluxo simulada dentro de ABCD é representado pela Fig. 6.1 . O ponto de estagnação, ou melhor, a zona de solução numérica existe a cem metros do dreno , no lado jusante. A função do fluxo no ponto de estagnação será  $0,067\text{m}^2/\text{dia}$ , assim  $\psi = 0,067$  representa a divisa que separa o fluxo saturado do subfluxo. O fundo do aquífero representa uma margem de sem-fluxo e assim pode ser simulado com  $\psi = 0$ . Então  $\psi_{sp} = 0,067$  implica uma taxa de subfluxo de  $0,067\text{ m}^2/\text{dia}$ . Neste exemplo a divisa subterrânea é localizada próximo ao fundo do aquífero, a presença do dreno criaria impressão que a barreira hidráulica tem penetração completa, e assim, previniria da água poluída passar de montante para jusante.

## **6.2 - A ANÁLISE DA SENSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO EFEITO DE RECARGA**

Várias simulações foram feitas afim de estudar o efeito de recarga sobre eficácia do dreno interceptor. Nessas simulações todos os outros parâmetros foram tratados como constantes exceto a taxa de descarga que varia de 10-20-30 cm/ano para os casos 1, 2, e 3 respectivamente. As divisa subterrâneas para estes casos foram mostradas na figura 6.4. É claro que com taxas de recarga diminuindo a profundidade da divisa e vice-versa, isto pode ser explicado devido o caso de uma recarga maior causaria uma diferença maior entre cargas dentro do dreno e assim na parte do aquífero que fica abaixo do dreno.

### 6.3 - EFEITO DA VARIAÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO DRENO

Caso a configuração da linha freática seja constante, isto é,  $h_0 = h_d$  fica constante, um aumento na profundidade do dreno interceptor causaria aumento correspondentemente na profundidade da divisa subterrânea. Isto foi mostrado na Fig. 6.4, no qual as quatro divisas subterrâneas foram obtidas para profundidades correspondente  $J=2,5,8,13$ . O caso de  $J=13$  é para fins acadêmicos, porque não existe a possibilidade de barrar o aquífero até o fundo. Em todos estes casos,  $S$  fica constante. (ver Anexo: IV). Assim, com dreno interceptor mais profundo maior quantidade de fluxo está capturada deixando menor quantidade de subfluxo que provocaria um aumento da profundidade da linha de divisa subterrânea. Porém vale lembrar que estes casos ocorrem quando a linha freática é tratada como constante e quando aumentamos a profundidade do dreno.

A recarga tem um papel muito importante em controlar a habilidade do dreno interceptor na delimitação de movimento dos poluentes, uma vez que esta recarga determina a configuração da linha freática. Com aumento na taxa de recarga e com o nível de água no dreno ficando constante, a profundidade da divisa subterrânea aumenta. Com recarga variando sazonalmente, a eficácia do dreno interceptor muda significativamente. Além disso um aumento da profundidade do dreno aumentaria a profundidade da divisa subterrânea.

Um bom entendimento da estratigrafia do aquífero providenciaria melhor construção do dreno interceptor e na otimização dos drenos existentes abandonados

para serem usados como drenos interceptores dos poluentes. A eficácia do dreno interceptor é fortemente controlada pela localização das camadas dentro do dreno com condutividades hidráulicas pré-conhecidas. Camadas com baixas condutividades fecham os drenos forçando um fluxo maior para se mover abaixo do dreno. Camadas de alta condutividades também vão influenciar a forma e distância de divisa subterrânea, esta aproximação quantitativa sugerida nesta dissertação deve auxiliar um engenheiro civil na avaliação do potencial dos drenos existentes, na delimitação dos poluentes os quais espalham, como fontes pontuais e fontes não pontuais.

A forma geométrica da propagação da água subterrânea na vizinhança de um dreno interceptor para fins de drenagem agrícola foi simulado usando as funções do fluxo e potencial no controle do espalhamento e a extensão das químicas agrícolas em aquíferos rasos. O conceito da divisão da linha do fluxo é usado para quantificar a eficácia dos drenos interceptores para limitar a extensão dos contaminantes potencialmente perigosos.

O resultado da simulação sugere que esse dreno interceptor poderá criar uma barreira hidráulica forte na prevenção do movimento dos contaminantes agrícolas na água subterrânea. Para que essa barreira seja efetiva e não depender das mudanças sazonais ou hidrológicas, foi estabelecida uma relação funcional entre efetividade do dreno e as condições hidrológicas existentes, incluindo a possível recarga e retirada/bombeamento da água do dreno e assim do aquífero.

É evidente que a forma geométrica do fluxo está sujeita as flutuações de curto prazo em resposta as mudanças na recarga e nível da água no dreno, porém o sistema de fluxo responde rapidamente para as mudanças de curto prazo devido os altos

valores de condutividade hidráulica dos solos, conseqüentemente o sistema de fluxo pode ser visto como uma síntese dos modos de estado quase permanente dentro dos períodos diferentes de tempo.

Para minimizar os efeitos transitórios, os parâmetros de entrada que variam com o tempo devem ser medidos durante o mesmo dia e são usados para fins de simulações e calibragem. Estes parâmetros incluem as cargas hidráulicas em ambos os lados das margem e o nível da água no dreno.

A forma geométrica de recarga ao longo da secção da superfície foi determinado baseando-se nas observações feitas no campo de estudo (Faustini, 1985). Usando a topografia a configuração da superfície freática e as características hidrológica da superfície do terreno tais como terras alagadas, riachos e drenos de recarga e descarga em uma pequena bacia de drenagem, onde o local de estudo se situa.

É de interesse examinar de perto a forma geométrica de fluxo na vizinhança imediata do dreno a figura mostra a rede de fluxo simulada adjacente ao dreno. As linha de fluxos equipotenciais podem ser ortogonais nos solos isotrópicos ou não ortogonais devido o efeito anisotrópico. Montando uma rede de piezômetros em diferentes locais(multiníveis) a rede pode ser mais precisamente plotada. Uma porção do fluxo subterrâneo pode passar do dreno antes de ser interceptado (e retornar para o dreno) pela superfície freática.

A interpretação seletiva dos dados de campo podem resultar em muitas possíveis interpretações da forma geométrica do fluxo. É dito que a forma geométrica do fluxo simulado representa a interpretação mais razoável uma vez que a mesma mostrado na figura 6.2 ignora o efeito de fluxo regional ou fluxo ambiente ou fluxo

sem interferência do dreno. O gradiente da superfície do fluxo regional é superposto sobre o gradiente local que passa pelo dreno, que resultaria na forma geométrica de fluxo da figura 6.1 para mudar para aquela forma da figura 3.A. Este exemplo ilustra que o modelo numérico usado pode servir como uma ferramenta na interpretação dos dados de campo e no melhor entendimento do sistema de fluxo.

A barreira hidráulica criada pelo dreno é uma barreira completamente penetrante, porém desde que a forma geométrica do fluxo varia em resposta das flutuações sazonais do lençol freático e do nível da água no dreno, é razoável esperar a profundidade da penetração da barreira hidráulica se mude também sazonalmente, como indicada pela profundidade da linha de fluxo que se divide as duas porções.

Embora o dreno não poderia criar uma barreira hidráulica completamente penetrante, ele ainda efetivamente delimitará o espalhamento das químicas agrícolas a medida que a linha de fluxo que se divide se localiza próximo ao fundo do aquífero.

Dependendo da situação somente um terço do fluxo total poderá ser interceptado pelo dreno em um determinado tempo. Neste caso o dreno pode se comportar como uma barreira efetiva contra as químicas agrícolas, somente no caso destas químicas sejam limitados próximas ao lençol freático.

#### **6.4 - EFEITOS DAS CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS**

Uma solução analítica simples que foi obtida por Zheng et ali (1991) diz que a profundidade da linha de fluxo que se divide é inversamente proporcional ao gradiente da superfície do fluxo uniforme regional ( $I$ ) é diretamente proporcional a

( $h_o - h_d$ ), sendo a diferença entre cargas hidráulicas entre a interfase que separa o dreno e o aquífero homogêneo.

Figura 6.1 mostra cada ponto sólido representando uma simulação que mostra a linha de fluxo que se age como divisor de água o qual atinge o fundo do aquífero. A figura também mostra as simulações da descarga/recarga. Nota-se que todos os pontos cabem na linha reta que definiria as condições críticas sobre o qual o dreno interceptor criaria uma barreira totalmente penetrante até o fundo do aquífero. Caso I e  $h_o - h_d$  cabem acima da linha reta a barreira é totalmente penetrante. Se não ( $h_o - h_d$ ) cabem abaixo da linha reta a barreira hidráulica se torna parcialmente penetrante e o fluxo passa jusante abaixo do dreno.

Com distância maior para esquerda da linha mostrada na figura 6.2, o sub fluxo (abaixo do dreno) será maior, isto significa que o dreno interceptor será menos eficaz. Isto é ilustrado através dos ponto circulo da figura com letras M, J, A. O gradiente I da superfície freática do fluxo regional é computado pela equação M J A.

A profundidade da divisa muda da penetração completa para a parcial quando os pontos marcados com letras M e J ainda afastam da linha reta para A e assim por diante.

O presente estudo demonstra que o dreno interceptor é capaz de criar uma forte barreira hidráulica para fluxo subterrâneo. Caso as químicas agrícolas lixiviados sejam conservativos, isto é, o efeito de dispersão da química agrícola é desprezível e ainda estes químicos são delimitados para a porção rasa do aquíferos, os drenos interceptores originalmente quando destruídos para melhorar a condição de drenagem subterrânea, provariam ser menos efetivo no controle do espalhamento dos químicos

agrícolas. Porém, estudos mais detalhados devem ser feitos no campo para verificar que este método se aplica a outros tipos dos químicos agrícolas e outros defensivos agrícolas, para provar que a teoria se aplica não só para fluxo subterrâneo mas também para captura efetiva das químicas citadas.

O conceito de divisa subterrânea com linha de fluxo que separa a porção no qual as linhas do fluxo movem-se para o dreno daquela onde as linhas se afastam do dreno. É importante em solucionar problemas no campo e em aumentar a capacidade do dreno para atrair mais linhas para uma drenagem efetiva dos poluentes. Isto pode ser feito usando uma largura adequada do dreno, material cuja permeabilidade é adequada para uma drenagem rápida, profundidade do dreno que captura maior número de linhas e gradiente adotado entre ambos lado do dreno, porém a eficácia do dreno interceptor varia sazonalmente em resposta as mudanças nas condições hidrológicas e hidráulicas, como I, R ( distribuição de descarga/recarga e o parâmetros hd, que foi definido anteriormente.

A eficácia do dreno interceptor foi mostrada para dada situação geológica que existe em Sumé-Pb, na forma das tabelas e gráficos com os parâmetros envolvidos que serviria como um guia para a escolha dos vários parâmetros envolvidos. As curvas e tabelas fornecem um caminho simples na estimativa da efetividade do dreno interceptor bem como as condições críticas sob qual um dreno interceptor criaria uma barreira hidráulica totalmente penetrante.

## **6.5 - O EFEITO DA RECARGA ACENTUADA NO LOCAL DO DRENO SOBRE AS LINHAS DO FLUXO CAPTURADAS OU TUBOS DO FLUXO QUE ENTRAM NO DRENO**

A recarga foi efetuada com variações feitas em função da posição do dreno, permeabilidade do meio do dreno e a inclinação da linha freática. Assim foram criados arquivos que resultaram na forma de figuras 6.5.1 até 6.8.3.

As figuras 6.5.1 até 6.7.3 mostram a posição do dreno a  $l=19$ , com mesma declividade da linha freática de 0.0134 (inclinação natural do terreno), com  $K=2$  e com recarga variando de 120, 185 e 250 metros.

As figuras 6.8.1 e 6.8.2 mostram o efeito de variação da declividades em  $m = 0.1$  e  $0.2$ , para mesmo valor de permeabilidade do meio do dreno  $K=2$  e mesma posição do dreno do lado esquerdo F com valor de  $l=19$ . A taxa de recarga ficou para estes três casos como 120 m.

As figuras 6.5.1 até 6.5.2 são casos com dreno colocado em  $l=7$ , com mesma recarga de 120 metros, com  $K=1$  ( para os caso 6.5.1 até 6.8.3), os três primeiros casos tendo valor de declividade da linha freática de  $m=0.0134$ , sendo o valor natural do terreno, enquanto para figura 6.8.2, a declividade,  $m$  tratado como  $0.1$ , e 6.8.3 a declividade é de  $0.2$ .

Visto as figuras 6.5.1 até 6.8.3, onde o incremento entre as linhas de fluxo sempre foi tratado de  $0,1$  para fins de boa comparação entre as figuras, dá para perceber que um aumento de recarga de 120, passando de 185 para 250 metros,



aumentaria o número das linhas/tubos do fluxo substancialmente, lembrando que número de tubos será igual ao número de linhas menos um.

A mancha preta dos gráficos assim gerados, com espaçamento entre as linhas de fluxo adotado na ordem de 0.2, ocupou maior espaços, cada vez mais, com o aumento correspondente da taxa de recarga. Nas figuras 6.5.1 e 6.5.2, houve uma clara divisão entre as linhas de fluxo que entram no dreno e as linhas que passaram de jusante para montante. Tais tubos do fluxo que estão localizados abaixo do ponto da inflexão não foram capturados pelo dreno. Dá para localizar o ponto de inflexão, P nestas figuras. Vale observar também que a velocidade de entrada das linhas é maior no caso da Figura 6.5.3, onde ocorre o menor espaçamento entre as linhas de fluxo, enquanto o espaçamento é maior no caso de Figura 6.5.1, onde observa-se maior espaçamento entre as linhas que reflete sobre a lenta velocidade do fluxo quando a recarga é somente 120 metros. Na teoria de rede do fluxo que representa os quadrados formados pelas linhas do fluxo e linhas equipotenciais, quanto maior seja o espaçamento entre as linhas (equipotenciais ou do fluxo), menor será a velocidade do fluxo e vice versa.

A respeito das figuras 6.5.3, 6.6.3 e 6.7.3, que mostram o posicionamento do dreno no mesmo local de  $l=19$  ( i.e., mais próximo a margem direita onde se posiciona o potencial máximo de 101.4 metros), com a mesma permeabilidade de  $K=2$  e a declividade variando de  $m=0.0134$ , 0.1 e 0.2, respectivamente, dá para concluir que um aumento na declividade da linha freática provocaria maior número das linhas do fluxo que passam no domínio do fluxo. Enquanto o número de linhas aumentam consideravelmente, com declividade  $m$  aumentando de 0.0134 para o valor de 0.2, os tubos do fluxo que passam abaixo do dreno aumentam em número enorme,

assim o fluxo capturado pelo dreno parece como menor, no caso de maior declividade da linha freática, usando a mesma taxa de recarga de 120 metros. Nestes três casos, somente os casos com declividade da linha freática de  $m=0.1$  e  $0.2$  mostraram o ponto de inflexão P, que define a divisa subterrânea, abaixo do qual os tubos de fluxos não entram no dreno e acima do qual os tubos são capturados pelo dreno.

As figuras 6.5.1 até 6.6.1 se referem para o caso do dreno colocado na posição de  $I=7$ , com  $K=1$ , o valor zero para permeabilidade do dreno representando mesmo valor daquele adotado para a matriz do solo do aquífero. Nestes três casos,  $m$  variou de  $0.0134$ ,  $0.1$  e  $0.2$ . Para o caso 6.8.1 até 6.8.3, com o aumento na declividade de  $0.0134$  para  $0.2$  provocou entrada de maior número de linhas ao dreno, bem como um aumento no número das linhas no domínio do fluxo. Tal resultado é esperado devido altas velocidades do fluxo que ocorrem, com declividades acentuadas na linha freática.

O maior espaçamento entre as linhas do fluxo (como é no caso de Figura 6.5.1), com  $K=1$  significa velocidades menores no meio poroso. O espaçamento entre as linhas de fluxo foi tratado como  $0.1$  para todos os casos.

As linhas se curvam e entram no dreno, com maiores velocidades provocadas pelas declividades acentuadas na ordem de  $0.1$ . A influencia do dreno em capturar maior número de linhas foi observado no caso da fig. 6.5.2 Em nenhum dos três casos, o ponto de inflexão foi observado na parte jusante do dreno, o qual foi evidente nas figuras 6.5.1 e 6.5.2, a figura 6.5.3 mostrando somente ligeiramente este ponto da inflexão, cuja teoria foi elaborado detalhadamente no Anexo VII.

**CAPÍTULO VII**  
**CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

## 7.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 - CONCLUSÕES

- Drenos interceptores são facilmente instalados e exigem uma manutenção mínima. Porém o uso efetivo destes drenos interceptores depende, na maioria dos casos, da situação geológica e as condições hidrológicas ( Quince e Gardner, 1982). Para fins de avaliar a eficácia do Dreno Interceptor na delimitação de água poluída, é vital ter um melhor entendimento sobre o sistema de fluxo subterrâneo na vizinhança do dreno, sobre as varias teorias do Fluxo Subterrâneo que se aproxima de um dreno parcialmente penetrante

- Os drenos interceptores considerados neste estudo que foram tratados como drenos abertos os quais são comumente usados no campo agrícola são destinados para fins de drenar a parte superior do aquífero, assim rebaixando o lençol freático. A finalidade de otimizar as profundidades e espaçamentos de drenos interceptores para remoção efetiva da água subterrânea foi um sucesso.

A forma geométrica da propagação da água subterrânea na vizinhança de um dreno interceptor para fins de drenagem agrícola foi simulada usando as funções do fluxo e potencial no controle do espalhamento e a extensão das químicas agrícolas em aquíferos rasos. O conceito de divisa subterrânea , das linhas do fluxo é usado para quantificar a eficácia dos drenos interceptores para limitar a extensão dos contaminantes

potencialmente perigosos. O resultado da simulação sugere que esse dreno interceptor poderá criar uma barreira hidráulica forte na prevenção do movimento dos contaminantes agrícolas na água subterrânea. Essa barreira, seja efetiva ou não, depende das mudanças sazonais nas condições hidroóicas, incluindo a dependência sobre gradientes regionais do lençol freático, a distribuição da recarga ou descarga, e o nível da água no dreno. Foi estabelecida uma relação funcional entre efetividade do dreno e as condições hidrológicas existentes.

Foi tratado nesta pesquisa que o dreno interceptor também pode ser usado para capturar e limpar os contaminantes dos aquíferos rasos e pode ser usado para delimitar a extensão de químicas agrícolas em água subterrânea. A contaminação subterrânea por química agrícola que se torna como o maior problema do meio ambiente pode ser efetivamente controlada e até eliminada pelos drenos interceptores, que se agem rapidamente na remoção da água poluída por agro-químicos, bem como herbicidas e pesticidas. Embora estes contaminantes são detectados principalmente nas águas subterrâneas rasas, a química agrícola pode ser transportada para as camadas mais profundas. A degradação na qualidade de água subterrânea pode ser minimizada e ainda prevenida pelo controle da extensão destes agentes químicos em água subterrânea rasa. Os drenos interceptores estendidos até uma determinada profundidade poderá resolver o problema através a capturas dos tubos suficientes do fluxo, para conter os contaminantes.

Foi mostrado o uso mais popular do sistema interceptor e nos aquíferos onde os poluentes são concentrados próximos a superfície freática ( Lençol Freático), como é o caso nas Químicas Agrícolas ou derramamento dos óleos, para o qual drenos até três ou cinco espaços servirão. O sistema interceptor que varia de penetração completa de trincheira vertical até drenos parcialmente penetrantes de cinco ou oito ou mais espaços deu uma visão ampla sobre o comportamento da penetração parcial sobre os tubos do fluxo que um determinado dreno poderá capturar na remoção efetiva dos poluentes.

- Varias simulações que foram feitas afim de estudar o efeito de recarga sobre eficácia do dreno interceptor mostraram que com recargas mais acentuadas, o numero dos tubos do fluxo que entram no dreno serão maiores, assim mostrando o fato que quanto mais recarga, maior será a vazão efetivamente retirada do aquífero.

- As divisas subterrâneas para estes casos mostram que com taxas de recarga diminuem a profundidade da divisa e vice-versa, este fato pode ser explicado devido o caso de uma recarga maior causaria uma diferença maior entre cargas dentro do dreno e assim na parte do aquífero que existe abaixo do dreno.

Foi confirmado que um aumento na profundidade do dreno interceptor causaria correspondentemente um aumento na profundidade da divisa subterrânea. Nas quatro divisas subterrâneas que foram obtidas, as para profundidades correspondentes de  $J=2,5,8,13$ , o caso de  $J=13$  foi tratado somente para fins acadêmicos, porque não

existe a possibilidade de barrar até o fundo. Em geral, com dreno interceptor mais profundo, maior quantidade de fluxo será capturada, deixando menor quantidade de subfluxo que provocaria um aumento da profundidade da linha de divisa subterrânea. Porém vale lembrar que este caso ocorre quando a linha freática é tratada como constante quando aumentamos a profundidade do dreno.

- O presente estudo introduz o conceito de quantificar a habilidade dos drenos parcialmente penetrantes na captura de água poluída, baseado na análise do sistema de fluxo sob condições permanentes ou estacionária.

- A profundidade da divisa subterrânea, da água contaminada pode ser interceptada pelo dreno foi usado como uma propriedade quantitativa. As aproximações analíticas e numéricas foram estabelecidas para definir a posição da divisa subterrânea, os efeitos dos vários fatores hidrológicos e hidrogeológicos no controle da profundidade da divisa foram explorados.

- A recarga tem um papel muito importante em controlar a habilidade do dreno interceptor na delimitação de movimento dos poluentes, uma vez que esta taxa de recarga determina a configuração da linha freática. Com taxa de recarga aumentando, o nível de água no dreno constante a profundidade da divisa subterrânea aumenta. Com recarga variando sazonalmente a eficácia do dreno interceptor muda significativamente. Além disso, um aumento de profundidade de dreno aumentaria a profundidade da divisa subterrânea com configuração da linha freática ficando constante.

- É vital que um bom entendimento da estratigrafia do aquífero providenciaria melhor construção do dreno interceptor ou na ótima utilização dos drenos existentes para ser usados como drenos interceptores dos poluentes. A eficácia do dreno interceptor é fortemente controlado pela localização e camadas dentro do dreno com condutividade hidráulica conhecida. Camadas com baixas condutividades fecham os drenos forçando um fluxo maior para se mover abaixo do dreno. Camadas de alta condutividades também vão influenciar a forma e distância de divisa subterrânea. Esta aproximação quantitativa sugerida nesta dissertação deve auxiliar um engenheiro civil na avaliação do potencial dos drenos existentes na delimitação dos poluentes que espalham com fontes pontuais e não pontuais.

- Em função do posicionamento, profundidade e permeabilidade do meio poroso, bem como a permeabilidade do material do dreno, o controle será mais efetivo, para aqueles drenos localizados mais próximos ao potencial maior, uma vez que a força dirigente provocaria os tubos do fluxo de maior potencial para menor potencial.

Porém, o controle efetivo dos poluentes depende das condições de contorno do domínio do fluxo e do dreno interceptor. Um conhecimento detalhado destes parâmetros físicos facilitará num modelo computacional mais eficaz que solucionará o problema individual.

Na margem no topo do modelo onde poderá ocorrer recarga a ou descarga da superfície freática, nas condições naturais que prevalecem na realidade, o estudo mostra que tais condições poderão ser simuladas no modelo, conhecendo a taxa de recarga e da descarga. Os resultados obtidos com descarga e recarga mostram que a



recarga efetivamente aumentaria a capacidade do dreno para drenar mais rapidamente a água contaminada. As tabelas e os gráficos apresentados mostram a escolha certa para uma determinada situação.

- A profundidade da linha que se divide as vazões e quantificaram ainda a profundidade de penetração da barreira hidráulica assim criada pelo dreno interceptor, a qual pode ser usada na determinação de efetividade do dreno. Embora as linhas de fluxo possam ser construídas graficamente baseada nas cargas de distribuição, é mais quantitativa e precisa determinar as linhas de fluxo a partir de solucionar a função de fluxo especialmente em aquíferos heterogêneos, como é o caso atual no qual o dreno ocupa algum espaço dentro do aquífero livre.

- O conceito de divisa subterrânea da linha de fluxo facilitaria a delinear o fluxo subterrâneo que será interceptado pelo dreno parcialmente penetrante. A profundidade de divisa é um indicador para quantificar o grau para que o dreno que se age como uma barreira hidráulica efetiva para limitar o espalhamento da água subterrânea contaminada nos aquíferos rasos sob condições/permanentes.

A finalidade desta Dissertação na avaliação da eficácia dos pequenos drenos parcialmente e totalmente penetrantes na contenção e na captura de água contaminada em aquíferos rasos e ainda identificar os fatores mais importantes que controlam esta eficácia foi realizada com sucesso, na identificação dos parâmetros que

influenciam a eficácia. A idéia de estabelecer uma aproximação que possa ser usada para expressar quantitativamente a habilidade de dreno interceptor na delimitação do movimento da água contaminada sobre várias condições hidrogeológicas foi realizada efetivamente.

## 7.2 - RECOMENDAÇÕES

- A equação de Dupuit é um artifício útil e uma ferramenta simples para ser usado pelos engenheiros em determinar as vazões dos aquíferos não confinados, sem ou com drenos. Porém, vale lembrar que a equação de Dupuit pressupõe declividades suaves da superfície freática, dentro do dreno em ambas as extremidades ou fora do mesmo.

- Embora a vantagem importante, empregada pelas suposições de Dupuit é que  $\theta = \theta(x,y,z)$ , tendo sido substituído pela expressão  $h = h(x,y)$ , em que  $z$  não aparece como uma variável independente, a medida em que em um ponto da superfície freática,  $p = 0$  ou  $p =$  pressão atmosférica e  $\theta = h$ , a linha vertical através deste ponto também é uma linha equipotencial em que  $\phi = h =$  constante. Mas, em maioria dos casos,  $h$  varia também com o tempo à medida em que  $h = h(x,y,t)$  e assim, o comportamento transitório da linha freática deve ser levado em consideração.

Quando os dados de campo são limitados, as formas geométricas complexas do fluxo em aquíferos não homogêneos, anisotrópicos e de multi camadas só podem ser estimados através de modelos de fluxo multi dimensionais. Porém, é suficiente que os pesquisadores usem modelos numéricos de fluxo bi-dimensional, para estudarem padrões de fluxo regional de água subterrânea sob condições geológicas simples.

- A anisotropia em sedimentos granulares é um assunto de interesse geólogos e devido a orientação dos minerais de argila que podem estar presente, e os sedimentos, se depositados em sistema de água corrente, devem orientar-se na direção da correnteza da água.

- Para simplicidade, neste estudo, as componentes de permeabilidade do solo ( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ) foram tratados como iguais num certo local. Porém, a realidade é outra. Numa formação homogênea também, a permeabilidade pode ser isotrópica ou anisotrópica, mas essa característica é invariável de um local para o outro em um aquífero, enquanto nas formações heterogêneas, a permeabilidade varia de um local para outro. Este é um fator que não pode ser desprezado nos estudos mais profundos e detalhados.

Nas pesquisas mais rigorosas, a solução de drenos interceptores deve relacionar a profundidade do dreno até o lençol freático, a diferença entre cargas de ambos os lados do dreno, a largura do dreno e a razão entre permeabilidades nas

direções verticais e horizontais. O papel da recarga sobre a heterogeneidade do aquífero e profundidade do dreno no controle da profundidade de divisa subterrânea é de interesse dos engenheiros e agrônomos e assim a efetividade do dreno interceptor deve ser estudado usando modelo numérico que abrange estes aspectos.

- Os casos de Recarga Subterrânea foram tratados com sucesso, que mostram que a recarga induziria ou provocaria acumulação das linhas ou tubos do fluxo, assim aumentando uma rápida retirada do fluxo contaminado pelo dreno interceptor. Vale estudar os efeitos de bombeamento no local do dreno e as consequências do mesmo, uma vez que esta prática está sendo empregada em alguns países do oeste desenvolvido.

**CAPÍTULO VIII**  
**BIBLIOGRAFIA**

## 8 - BIBLIOGRAFIA

- Batu, V.. 1987. Introduction of the stream function concept to the analysis of hydrodynamic dispersion in porous media. *Water Resour. res.*, 23(1): 1175-1184.
- Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier, New York, 1972.
- Bear, J. "Hydraulics of Groundwater". New York, McGraw-Hill Book Co., 1979. 567 p. Bear.
- Bear, J. & Verruijt, Arnold. "Modeling Groundwater Flow and Pollution". D. Reidel Publishing Co. Boston, 1987. p. 1-29.
- Bennet, G. D., A. L. Kontis, and S. P. Larson, Representation of multi-aquifer well effects in tri-dimensional groundwater flow simulation, *Ground Water*, 20(3), 334-341, 1982.(0770)
- Black, T. A., Gardner W. R., and Thurtell G. W., 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of America Proceedings*. v. 33, pp. 655-660.
- BLAKE, S.B. and Lewis. R.W., 1982. Underground oil recovery. *Proceedings of the Second National Symposium on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring*. pp. 69-76
- BOOHER, L.J.. 1974. Surface irrigation. *Agricultural development paper n° 95*. FAO, Rome. pp. 152.

Boulton, N. S. The Drawdown of the Water-Table under Non-Steay Conditions near a Pumped Well in an Unconfined Formation. In: "Proceedings of the Institution of Civil Engineer", 1954. Part 3, p. 564-579.

Boussinesq, J. Recherches th'eoriques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltr'ees dans le sol et sur le d'ebit des sources. "Journal de Math'ematics Pures et Applique'es", 1904. Vol. 10, p. 5-78 e p. 363-394.

Bouwer, H. "Groundwater Hydrology". New York, McGraw Hill Book Co., 1978. 480 p.

Briz Kishore, B. H., and R. V. S. S. Avadhanulu, A compact modified tri-dimensional aquifer simulation program for small computers, Ground Water, 20(3), 342-344, 1982.(0770)

Brown, S. M., 1984. Remedial action evaluation with simplified methods. Proceedings of the Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, pp. 162-172.

Canter, L. W. and R. C. Knox. 1986. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, MI. 526 pp.

CDRM, Companhia de Desenvolvimento de Rec. Minerais, (1987), Abastecimento D'Água, Juripiranga. Ribeiro, J.Pires. C. Grande, 10/1987. pp. 1-59.

- Cleary Robert W., Guiguer, Nilson Jr. & Rebouças, Aldo da Cunha Modelosa  
Matemáticos em Hidrogeologia com Aplicações em Microcomputadores. São  
Paulo-SP. Centro de Pesquisas de Água Subterrânea. Instituto de Geociências.  
USP. 1986.
- Cleary, R. W. & Cleary, T. "Aplicações de microcomputadores em hidrologia e  
poluição de águas subterrâneas". Publicado nos Anais do 5º Congresso Brasileiro  
de Água Subterrânea. São Paulo, ABAS, 1988. p. 186-195.
- Cohen, R. M. and Miller III, W. J., 1893. Use of analytical models for evaluating  
corrective actions at hazardous waste disposal facilities. Proceedings of the Third  
National Symposium on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, pp.  
85-97.
- Cooley, R. L., A method of estimating parameters and assessing reliability for  
models of steady state groundwater flow, 1. Theory and Numerical Properties,  
Water Resources Research, 13(2), 318-324, 1977.(0195)
- Cooper, H. H. & Jacob, C. E. "A generalized graphical method for evaluating  
formation constants and summarizing well-field history". Amer. Geophy. Union  
Transactions, 1946. Vol. 27, Nº 4, p. 526-534.
- Custódio, Emilio & LLamas, Manuel Ramón. Hidrologia Subterrânea Barcelona-  
Espanha. Ediciones Omega S.A. Tomo II. 1983. 1185 pp.



- Dagan, G. A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers, "Water Resources Research", 1967. Vol. 3, p. 1059-1071.
- Darcy, H.: Les fontaines publiques de la ville de Dijon, V. Dalmont, Paris, 1956.
- Daugherty, R. L. Franzine, J. B. Fluid Mechanics With Engineering Applications. McGraw-Hill. Rio de Janeiro. 1965. p. 1-574.
- Davis, J. M., Two-dimensional groundwater flow: A comparison of digital computer solutions, Rep. TR5, Water Research Centre, Medmenhan, U.K. 1975.(1150)
- Davis, L. A., Computer analysis of seepage and groundwater response beneath tailing impoundments, Rep. NSF/RA-800054, National Science Foundation, Washington, D.C., 1980.(2890)
- DAY, P.R., LUTHIN, J.N. 1954. Sand model experiments on the distribution of water-pressure under an unlined canal. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 18:133-136.
- De Marsily, G. "Quantitative Hydrogeology". Orlando, Florida, Academic Press, Inc., 1986. 440 p.
- Dumm, L.D. 1954. Drain spacing formula. Agr. Eng. 35:726-730.
- Dupuit, J. "Studes th'eoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux d'ecouvets et `a travers les terrains perm'eables". Paris, Ed. Dunod, 1863. 304 p.

- Egito, E. P. "Aspectos Técnicos dos Poços Usuais no Semi-Árido Paraibano".  
Dissertação de Mestrado submetida a Área de E.R.H. da UFPB., Campina Grande.  
1989. p. 1-138.
- EPA. 1985. Handbook for Remedial Action at Waste Disposal Sites. EPA-625/6-85  
006.
- Faust, Charles R. & Mercer, James W. Ground Water Modeling Recent  
Developments. USA. Vol. 18 No 6. Groundwater. November 1980. 569-577 pp.
- Faustini, J. M. 1985. Delineation of Groundwater flow Patterns in a Portion of the  
Central Sand Plain of Wisconsin. M. S. thesis. Uw-Madison. 107 pp.
- Fermanich, K. J., Daniel T. C., and Lowery B.; 1991. Microlysimeter soil columns  
for evaluating pesticide movement through the root zone. Journal of Environmental  
Quality. v. 20, pp. 189-195.
- Feth, J. H. Water facts and figures for planners and managers. "U.S. Geological  
Survey Circular 601-1", Washington, D.C., 1973. 30 p. Franciss, F. O. "Hidráulica  
de meios permeáveis: Escoamento em Meios Porosos". Rio de Janeiro, Interciência,  
São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1980. 169 p.
- Fogg, G. E. and Senger R. K. 1985. Automatic generation of flow nets with  
conventional ground-water modeling algorithms. Ground Water. v. 23, no. 3, pp.  
336-344.

Freeze, R.A. & Witherspoon, P.A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: I. Analytical and numerical solutions to the mathematical model "Water Resources Research", 1966. vol. 2, pp. 641-656.

Freeze, R. A. and Witherspoon, P.A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Effect of water table configuration subsurface permeability variation. Water Resour. Res., 3: 623-634.

Freeze, R. A. & Cherry, J. A. "Groundwater". Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc. 1979. 604 p.

Freeze, R. A., Tri-dimensional transient saturated-unsaturated flow in a groundwater basin, Water Resources Research., 7(2), 347-366, 1971.(1000)

Geraghty & Miller, Inc. "G & M Mathematical Modeling Group"(Charles F. McLane and Robert A. Mace responsible for RESSQ Simulations in Figures 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11). Reston, Virginia, 1989. Personal Communication.

Gilbert, S.G. and Gress, J.J., 1987. Interceptor trenches for positive groundwater water control. Ground Water Monit. Rev., 7(2): 55-59.

Hallberg, G. R. 1986. Overview of agricultural chemicals in groundwater.

Proceedings of Agricultural Impacts on Ground Water Conference, Omaha, NE.

Hantush, M. S. & Jacob, C. E. Non-stead radial flow in an infinite leaky aquifer.

"Amer. Geophy. Union Transactions", 1955. Vol. 36, N° 1, p. 95-100.

- Hantush, M. S. Hydraulics of Wells. In: Chow V. T. Ed. "Advances in Hydroscience", New York, NY, Academic Pres, 1964. Vol. 1, p. 281-432.
- Hazen, A.: Discussion of "Dams on Sand Foundation, by A. C. Koenig, "Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 73, 1911, p. 199. Hornberger, G. M., J. Ebert, and I. Remson, Numerical solution of the Boussinesq equation for aquifer-stream interaction, Water Resources Research, 6(2), 601-608, 1970.
- Homma F. : An Electrical Analogue to Design Subrrigation Systems., Technical bulletins., pp 321-333
- Hunt, B., Some computer models for groundwater flow, Rep. 76.11, Univ. of Canterbury, Dept. of Civil Eng., Christchurch, New Zealand, 1976. (6070-6071)
- Jacob, C.E., (1950), "Flow of Water", in H. House (ed.), Engineering Hydraulics, Wiley, New York, 1950, p. 321-386
- Kashef, A.I. (1986), Groundwater Engineering. McGraw-Hill, New York, p. 1-512.
- Kelly, W. E. & Frohlich, R. K. Relations between aquifer electrical and hydraulic properties. "Ground Water", 1985. Vol. 24, N° 2, p. 182-189.
- KESSLER, J. 1973. Field drainage crireta. pp. 132-164. Publication 16, vol. II. ILRI, Wageningen The Netherlands.

- Kinzelbach, Wolfgang. Groundwater Modelling - An Introduction With Sample Programs in Basic. Amsterdam. The Netherlands. Elsevier Science Publishers B. V. 1986. 333 pp.
- Kufs, C., Rogoshewski, P., Repa, E. and Barkley, E., 1982. Alternatives to ground water pumping for controlling hazardous waste leachates. Natl. Conf. Manage. Uncontrolled Hazardous Waste Sites. pp. 146-149.
- Kufs, C., Wagner, K., Rogoshewski, P., Kaplan, M. and Repa, E., 1983. Controlling the migration of leachate plumes. Proc. Ninth Annu. Res. Symp., EPA-600/9-83-018, pp. 87-113.
- Lee, D. R. & Crerry, J. A. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. "Journal of Geological Education", 1979. Vol 27, p. 6-10.
- Lohman, S. W.: "Groundwater Hydraulics," U.S. Geological Survey Professional Paper 708, Washington, 1972.
- Luthin, J. N. 1957. Drainage of agricultural lands. American Society of Agronomy Monograph N° 7, Madison, Wisc. pp. 610.
- Luthin, J. N. 1973. Drainage Engineering. Robert E. Krieger Publishing Co. 250 pp.
- Lvovitch, M.I. World water balance: general report. "Proc. Symposium World Water Balance". International Assoc. Sci. Hydrol. 2, 1970. p. 401-415. Maddock, T., III, The operation of a stream-aquifer system under stochastic demands, Water Resources Research, 10(1), 1-10, 1974.

Marino, M. A., Digital simulation model of aquifer response to stream stage fluctuation, *J. Hydrol.*, 25, 51-58, 1975.

McDonald, J. M. and Harbaugh A. W. 1983. A modular three-dimensional finite-difference flow model. U.S. Geol. Surv., Open-File Report 83-875, 528 pp.

Meier, Wolfgang. Modelagem Numérica de Fluxo de Água Subterrânea pelo Método de Diferenças Finitas - Uma Introdução. I Curso de Métodos Avançados em Hidrologia Aplicada. Campina Grande-PB. 1987. 1-60 pp.

Neuman, S. P. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response, "*Water Resources Research*", 1974. Vol. 10, Nº 2, p. 303-312.

Neuman, S. P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. "*Water Resources Research*", 1975. Vol. 11, Nº 2, p. 329-342.

Nace, R. L.: "Water Management, Agriculture, and Ground Water Supplies," U.S. Geological Survey Circular 415, Washington, 1960.

Oka, T., Two-dimensional analysis of groundwater flow in a wide alluvial fan by the technique of finite element studies on groundwater in the basin of River Ta (4)-  
Annals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., nº 22B  
(in Japanese with English Abstract), 1979.

- Oka, T., Method of numerical analysis for three dimensional unconfined seepage problem for river structure (3)-Annals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University., no. 14B (in Japanese with English abstract), 1971.(3003)
- Patrick E. M. and Birl Lowery : Monitoring Drainage Solution Concentrations and Solute Flux in Unsaturated Soil with a porous Cup Sampler and Soil Moisture Sensors., Ground Water, vol 32, n° 3, May-June 1994., pp 356-362.
- Pearson, F.J. Jr. & Write, D.E. Carbon 14 ages and flow rates of water in Carrizo Sand, Atascosa County, Texas. "Water Resources Research", 1967. Vol. 3, p. 251-261.
- Pinder, G. F., and C. I. Voss, AQUIFEM, A finite element model for aquifer simulation, Rep. 7911, Dept. of Water Resources Eng., Royal Inst. of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden, 1979. (0514)
- Pinder, G. F. & GRAY, W. G. Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology. New York. USA. Academic Press Inc. 1977. 1-295 pp.
- Prickett, T. A.: "Type-Curve Solution to Aquifer Test under Water-Table Conditions", Ground Water, Vol. 3, N° 3, 1965. pp. 5-14.
- Poiseuille, J. L. M.: "Rechearches experimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diam`etres", Acad. Sci., Paris, Comptes Rendus, 961-967, 1041-1048 (1840).

- Radam Brasil, Folha SB. 24/25, Jaguaribe/Natal Vol. 23 Levantamento de Reservas Naturais, MME.SG, 1981. pp. 570-572.
- Ramos, F. et ali. "Engenharia Hidrológica", Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Vol. 2. Rio de Janeiro, Ed. da EFRJ. 1989. p. 293- 404.
- Reddell, D. L., and D. K. Sunada, Numerical simulation of dispersion in ground water aquifers, Hydrology paper no. 41, Colorado State Univ., Fort Collins, 1970.(0215, 2540)
- REICHARDT, K. 1975. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Fundação Cargill, S. Paulo. pp. 286.
- Remson, I., G. M. Hornberger, and F. J. Molz, Numerical Methods in Subsurface Hydrology, 399 pp., Wiley Interscience, New York, 1971.
- Rothschild, E. R. 1982. Hydrogeology and contaminant transport modeling of the Central Sand Plain of Wisconsin. M. S. thesis, UW-Madison. 135 pp.
- Rushton, K. R., and S. C. Redshaw, Seepage and Groundwater Flow, Wiley, Whichester, UK, 339 pp., 1979. (1930, 6060, 6061, 6062, 6063, 6064)
- Sarma, S.V.K. e Egito, E. P. "O Conceito de Fator de Filtro a Respeito dos Poços Amazonas do Estado da Paraíba". II Encontro de Agropecuária da EMBRAPA, realizado na UFPB., Campina Grande. 1988. p. 72-94.



- Sarma, S.V.K. e Figueiredo, J.W.G., Investigação de Águas Subterrâneas no Semi-Árido Paraibano na MRH de Catolé do Rocha, Simpósio Internacional sobre Métodos e Instrumentos para Uso em Água Subterrânea, Holanda, 1983, pp. 232-242.
- Sarma, S.V.K. e Silva, T.C., Uso de Elementos Finitos em Modelos de Resistores-Capacitores em Barragens de Terra, VI Conf. Internacional de Elementos Finitos em Recursos Hídricos, Lisboa, 1985, p. 564-579.
- Sarma S.V.K. e Silva, T.C., Perdas da Água em Solos Extratificados, XII Congresso Latino Americano de Hidráulica, São Paulo, pp. 434-442.
- Sarma, S.V.K. e Silva, T.C., Respostas Hidráulicas do Aquífero ao bombeamento, ABAS, n. 11, 1987, pp. 26-32.
- Sarma, S.V.K. Mathematical Modelling of Aquifer Systems in the Sumé Valley. 4o Congresso Brasileiro de Água Subterrânea. Novembro 1986. Anais ABAS. São Paulo. 1986. 426-433 pp.
- SKAGGS, R.W., Tang, Y.K. 1977. Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. ASAE technical paper nº 77 - 2578. pp. 26.
- Sousa, Marcos Fernandes de. Aproveitamento dos Aquíferos Aluvionares - Conceitos e Metodologias Básicas. Campina Grande-PB. Divisão de Hidrogeologia e sondagem. Companhia de desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba. 1986. 1-86 pp.

- Stoertz, M. W. and Bradbury K. R. Delineation of ground-water recharge areas using a ground water flow model. In review for Ground Water.
- Stuyt L. C. P. M. : Developments in Research on Drainage Filter Materials in the Netherlands., Technical bulletins., pp 1-4.
- Theis, C. V.: "The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and Rate and Duration Discharge of a Well Using Groundwater Storage", Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 16, 1935. pp. 519-524.
- Thiem, A.: Hydrologist Methoden, Gebhardt, Leipzig, 1906.
- Todd, D. K. "Groundwater Hydrology". New York, NY. John Wiley and Sons, 1980. pp. 535.
- Taylor, D. K.: Fundamentals of Soil Mechanics, Wiley, New York, 1948.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1985. Handbook for Remedial Action at Waste Disposal Sites. U.S. Environ. Prot. Agency, EPA-625/6-8-006.
- U.S. Environmental Protection Agency. "Model Assessment for Delineating Wellhead Protection Areas", Office of Groundwater Protection, Washington, D.C. 1988. 210 p.
- UNEP, Programa das Nações Unidas para a Proteção do Meio Ambiente.
- Van der Veer, P., Calculation methods for two-dimensional ground water flow, Rijkswater staad Communications, no. 28 The Netherlands, 172 pp., 1978.

Verruijt, A., Theory of Groundwater Flow, 2nd ed., MacMillan, London,  
1982.(1850, 6030)

Zheng C. , Bradbury K. R. and Anderson M. P. : Role of Interceptor Ditches in  
Limiting the Spread of Contaminants in Ground Water, GROUND WATER vol.  
26, No. 6 - november-december 1988, pp 734-742.

Zheng C. , Wang H. F. , Bradbury K. R. and Anderson M. P : Analysis of  
Interceptor Ditches for Control of Groundwater Pollution. Journal of Hydrology.  
v. 98, pp 67-81.

Weeks, E. P. 1969. Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by  
aquifer test analysis. Water Resour. Res. v. 5, no. 1, pp. 196-214.

Weeks, E. P. and Stangland H. G. 1971. Effects of irrigation on streamflow in the  
Central Sand Plain of Wisconsin. USGS Open-file Report. 113 pp.

WESSELING, j., Van Wijk, W.R. 1955. Optimal depth of drainage. Neth. Jour. Agr.  
Sci. 3: 106-119

Wilsdon, j., Regional groundwater flow modeling by the finite element method,  
M.Sc., thesis, Univ. of Melbourne, Australia, 1976.(0960)

Wilson, L. G. 1990. Methods for sampling fluids in the vadose zone. In: D. M.  
Nielsen and A. I. Johnson (ed.), Ground Water and Vadose Zone Monitoring.  
American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. pp. 97-105.

Yer, G. T., and D. S. Ward, FEMWATER: a finite-element model of water flow through saturated-unsaturated porous media, ORNL-5567, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, Tn., 1980.(3370)

**ANEXOS**

**ANEXOS I**  
**BALANÇO HÍDRICO**

## ANEXOS I

QUADRO - BALANÇO HÍDRICO DO MUNICÍPIO DE SUMÉ\* (PB) PARA O ANO  
1982 SEGUNDO THORNTHWAITE (1948)

MESES	TEMPERATURA RA °C	i	E (mm dia)	C CORRELAÇÃO DE "E"	EP (mm)	P (mm)	P-EP	NEGATIVA ACUMULADA	ARM (mm)	ALT. (mm)	ER (mm)
Janeiro	26.3	12.37	13.27	32.0	137	0	(0)-137	-752	0	0	0
Fevereiro	24.7	11.21	117.9	28.5	120	64	(1)-119	-889	0	0	64
Março	25.3	11.62	110.2	31.11	110	1	(64)-46	-935	0	0	1
Abril	24.6	11.70	109.1	29.6	107	159	52	0	50	50	107
Maior	22.7	9.91	96.2	30.1	93	39	-54	-54	16	-34	73
Junho	22.2	9.53	80.0	28.9	77	20	-57	-111	05	-11	31
Julho	21.4	9.02	71.7	30.0	69	8	-61	-172	01	-4	12
Agosto	21.8	9.31	76.3	30.3	75	15	-60	-232	0	-1	16
Setembro	24.0	10.47	101.0	29.1	98	2	-96	-328	0	0	2
Outubro	24.7	11.23	110.2	31.6	112	30	-82	-410	0	0	30
Novembro	25.0	11.42	113.9	30.8	117	0	(29)-88	-498	0	0	0
Dezembro	24.9	11.36	112.7	32.1	117	29	(0)-117	-615	0	0	29

A correção C foi determinada pela equação  $C = DN / 12$  onde "D" é comprimento médio dos dias do mês, em unidades de 12 horas e "N" representa a média da insolação máxima. Tais cálculos são mostrados no quadro 8.

**ANEXOS II****ANÁLISE QUÍMICA DAS AMOSTRAS DO SOLO E DA ÁGUA**



## ANEXOS II

RODOVIA/TRECHO		INTERESSADO:			REGISTRO Nº	
UMIDADE (%)		0.6	0.7	ESPES. DO DIS. ESPACADOR	cm	
UMIDADE MEDIA (%)		0.7				

Pont o Nº	Peso Brut o Umíd o	Peso do Solo Umíd o	Dens do Solo Umíd o	Determinação da Umidade							Umíd Médi a	Dens do sol. Seco
				Cáps u. Nº	Peso Brut o Umíd o	Peso Brut o Seco	Peso da Caps u.	Peso da Água	P. do solo Seco	Umida %		
-	g	g	g/cm <sup>3</sup>	-	g	g	g	g	g	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1										3.0	3.0	1.797
										3.0		
2										4.2	4.3	1.868
										4.3		
3										7.7	7.8	1.885
										7.9		
4										8.7	9.3	1.916
										9.8		
5										12.1	12.0	1.911
										11.9		
6										15.1	15.1	1.818
										15.1		



ENSAIO : PERNEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL VERTICAL

AMOSTRA - 1

SUMÉ

$\gamma_{smax} = 1.925$  ;  $h_{ot} = 10.6$  ;  $h_i = 0.7$

VERIFICAÇÃO:  $\gamma_{smax} = 1.925$  ;  $h_{ot} = 10.6$

SEÇÃO DO TUBO PIEZOMÉTRICO UTILIZADA - a - (cm<sup>2</sup>) 0.454

SEÇÃO DA AMOSTRA UTILIZADO - A- (cm<sup>2</sup>) 80.12

TEMPO INICIAL

$t_0$  - (seg) ---

TEMPO FINAL

- t- (seg) 60 ---

CARGA NO TEMPO INICIAL

143.8 143.8 143.8 143.8 143.8 143.8 143.8 143.8 -  $h_0$  - (cm)

CARGA NO TEMPO FINAL

93.3 91.8 85.8 88.8 88.8 87.8 87.3 87.3 - h - (cm)

COEF. DE PERMEABILIDADE

3.47 4.00 3.73 3.73  $K_T$  - (cm/seg) \* 10<sup>-4</sup> 3.35

TEMPERATURA DA ÁGUA

- T - (°C)



CARGA NO TEMPO FINAL						- h - (cm)	
99.1	98.6	98.6	99.1	99.6	100.1	99.9	99.6
COEF. DE PERMEABILIDADE				K <sub>r</sub> - (cm/seg)*10 <sup>-4</sup>			3.89
3.95	3.94	3.89	3.84	3.79	3.81	3.84	
TEMPERATURA DA ÁGUA						- T - (°C)	
25	25	25	25	25	25	25	25
25							

### RESULTADOS FINAIS:

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE MÉDIO -  $K_{TM} = \underline{3.87 \cdot 10^{-4}}$  cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE A 20°C -  $K_{20} = K_{TM} \cdot C_v = \underline{3.43 \cdot 10^{-4}}$  cm/seg

COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DA ÁGUA -  $C_v = \underline{0.887}$

## ENSAIO : PERNEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

VERTICAL

AMOSTRA - 2

SUMÉ

 $\gamma_{smax} = 1.972$  ;  $h_1 = 11.5$  ;  $h_2 = 2.5$ VERIFICAÇÃO:  $\gamma_{smax} = 1.957$  ;  $h_1 = 12.0$ SEÇÃO DO TUBO PIEZOMÉTRICO UTILIZADA - a - (cm<sup>2</sup>) 0.454SEÇÃO DA AMOSTRA UTILIZADO - A- (cm<sup>2</sup>) 80.12

TEMPO INICIAL

t <sub>0</sub> - (seg)	0	0	0	0	0	0	0
	0	0					

TEMPO FINAL

- t- (seg)	300	300	300	300	300	300	300
	300						

CARGA NO TEMPO INICIAL

143.8	125.9	143.8	125.3	143.8	125.3	143.8	125.8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

- h<sub>0</sub>- (cm)

CARGA NO TEMPO FINAL

125.9	110.3	125.3	109.6	125.3	109.8	125.8	110.8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

- h - (cm)

COEF. DE PERMEABILIDADE

2.04	2.13	2.07	2.13	2.04	2.06	1.96
------	------	------	------	------	------	------

K<sub>T</sub>- (cm/seg)\*10<sup>-5</sup>

2.05

TEMPERATURA DA ÁGUA

25	25	25	25	25	25	25
25						

- T - (°C)

## RESULTADOS FINAIS:

$$\frac{2.06 \cdot 10^{-6}}{1.13} \text{ cm/seg}$$

$$= K_{20} \cdot C_v = \frac{1.83 \cdot 10^{-6}}{1.13} \text{ cm/seg}$$

$$\underline{0.887}$$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE MÉDIO -  $K_{TM} =$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE A 20°C -  $K_{20} =$

COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DA ÁGUA -  $C_v =$

## ENSAIO : PERNEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

HORIZONTAL

AMOSTRA - 2

SUMÉ

 $\gamma_{smax} = 1.972$  ;  $h_{ot} = 11.5$  ;  $h_i = 2.5$ VERIFICAÇÃO:  $\gamma_{smax} = 1.96$  ;  $h_{ot} = 12.0$ SEÇÃO DO TUBO PIEZOMÉTRICO UTILIZADA - a - (cm<sup>2</sup>) 0.454SEÇÃO DA AMOSTRA UTILIZADO - A- (cm<sup>2</sup>) 47.78

TEMPO INICIAL

$t_0$ (seg)	0	0	0	0	0	0	0
	0	0					

TEMPO FINAL

- t- (seg)	300	300	300	300	300	300	300
	300						

CARGA NO TEMPO INICIAL

145.9	127.1	145.9	128.2	145.9	128.6	145.9	129.5
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

-  $h_0$  - (cm)

CARGA NO TEMPO FINAL

127.1	111.9	128.2	113.4	128.6	114.2	129.5	115.4
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

- h - (cm)

COEF. DE PERMEABILIDADE

2.45	2.49	2.37	2.43	2.29	2.30	2.22	2.66
------	------	------	------	------	------	------	------

 $K_T$  - (cm/seg) \* 10<sup>-5</sup>

TEMPERATURA DA ÁGUA

25	25	25	25	25	25	25	25
----	----	----	----	----	----	----	----

- T - (°C)

25



**RESULTADOS FINAIS:**

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE MÉDIO -  $K_{TM} = \underline{2.40 \cdot 10^{-5}}$  cm/seg

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE A 20°C -  $K_{20} = K_{TM} \cdot C_v = \underline{2.12 \cdot 10^{-5}}$  cm/seg

COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DA ÁGUA -  $C_v = \underline{0.887}$

LAB DE SOLOS II  
RELACAO DOS ENSAIOS

AMOSTRA I  $\gamma_n$  Kn/m<sup>3</sup> 19.25

ho% 10.6

Kv cm/s  $3.38 \cdot 10^{-4}$

Kh cm/s  $3.43 \cdot 10^{-4}$

AMOSTRA 2

19.72

11.5

$1.83 \cdot 10^{-5}$

$2.12 \cdot 10^{-5}$

**ANEXOS III**  
**CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS**  
**FONTE CONAMA (1992)**

### ANEXOS III

Art. 1. São classificadas, segundo seus usos preponderantes, em nove classes, as águas doces, salobras e salinas no Território Nacional.

#### ÁGUAS DOCES:

##### I- Classe Especiais- águas destinadas:

- ao abastecimento doméstico sem prévia ou simples desinfecção.
- à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.

##### II- Classe I- águas destinadas:

- ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado.
- à proteção das comunidades aquáticas.
- à recreação de contato primário ( natação, esqui aquático e mergulho).
- à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película.
- à criação natural e/ou intensiva ( aquicultura) de espécie destinadas á alimentação humana.

##### III- classe 2- águas destinadas:

- ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional.
- à proteção das comunidades aquáticas.
- à recreação de contato primário ( aquicultura) de espécie destinadas á alimentação humana.

##### IV- classe 3- águas destinadas:

- ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional.
- à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.
- à dessedentação de animais.

##### V - classe 4- águas destinadas:

- à navegação.
- à harmonia paisagística.
- aos usos menos exigentes.

## AGUAS SALINAS:

### VI- classe 5 - águas destinadas:

- a recreação de contato primário.
- à proteção das comunidades aquáticas.
- à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécie destinadas à alimentação humana.

### VII- classe 6 - águas destinadas:

- à navegação comercial.
- à harmonia paisagística.
- à recreação de contato secundário.

### VIII- classe 7 - águas destinadas:

- a recreação de contato primário.
- à proteção das comunidades aquáticas.
- à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécie destinadas à alimentação humana.

### IX - CLASSE 8 - águas destinadas:

- à navegação comercial.
- à harmonia paisagística.
- à recreação de contato secundário.

art. 2º. Para efeito desta solução são adotadas as seguintes definições:

- a) CLASSIFICAÇÃO: qualidade das águas doces, salobras e salinas com base nos usos preponderantes ( sistemas de classes de qualidade).
- b) ENQUADRAMENTO: estabelecimento do nível de qualidade (classe) a ser alcançado e/ou mantido em um segmento de corpo de água ao longo do tempo.
- c) CONDIÇÃO: qualificação do nível de qualidade apresentado por um segmento de corpo de água, num determinado momento, em termos dos usos possíveis com segurança adequada.
- d) EFETIVAÇÃO DO ENQUADRAMENTO: conjunto de medidas necessárias para colocar e/ou manter a condição de um segmento de corpo de água em correspondência com sua classe.
- e) ÁGUAS DOCES: águas com salinidades igual ou inferior a 0,50‰.
- f) ÁGUAS SALOBRAS: águas com salinidades igual ou inferior a 0,50‰ e 30‰.
- g) ÁGUAS SALINAS: águas com salinidade igual ou superior a 30‰.

Art. 3º - Para as águas de Classe Especial, são estabelecidos os limites e/ou condições seguintes:

COLOFORMES: para uso de abastecimento sem prévia desinfecção os coliformes totais deverão estar ausentes em qualquer amostra.

Art. 4º - Para as águas de Classe 1, são estabelecido os limites e/ou condições seguintes:

- a) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausente.
- b) óleos e graxas: virtualmente ausente.
- c) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes.
- d) corantes artificiais: virtualmente ausentes.
- e) substâncias que formem depósitos objetáveis: virtualmente ausentes;
- f) coliformes: para o uso de recreação de contato primário deverá ser obedecido o Art. 26 desta resolução. As águas utilizadas para a irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas que se desenvolvam rentes ao solo e que são consumidas cruas, sem remoção de casca ou película, não devem ser poluídas por excremento humanos, para as demais usos, não deverá ser excedido em limite de 200 coliformes fecais por 100 litros em 80% ou mais de pelo 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês; no caso de não haver na região meios disponíveis para o exame de coliformes fecais, o índice limite será de 1.000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras colhidas em qualquer mês.
- g) DBO, dias a 20 graus até 3mg/l O<sub>2</sub>;
- h)OD em qualquer amostra, não inferior a 6mg/l O<sub>2</sub>.
- i) Turbidez: até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT);
- j) cor: nível de cor natural do corpo de água em mmPt/l;
- l) pH: 6,0 a 9,0;
- m) Substâncias potencialmente prejudiciais ( teores máximos):

TABELA

Substância	Teor (mg/l)	Substância	Teor (mg/l)	Substância	Teor (mg/l)
Alumínio	0.1	1,2 dicloroeta	0.01	Sulfatos sulfetos	250.0
Amônia não ionizável	0.02	Estanho	2.0	Tetracloroeteno	0.002
Bário	0.05	Índice de Fenóis	0.001	Tricloretano	0.01
Berílio	1.0	Ferro Solúvel	0.3	Tetracloroeto de carbono	0.03
Boro	0.1	Fluoreto	1.4	2,4,6 triclorofenol	0.003
Benzeno	0.75	Fosfato total	0.025	Urânio total	0.01
Benzo-a-pireno	0.01	Lítio	2.5	Vanádio	0.02
Cádmio	0.00001	Manganês	0.1	Zinco	0.1
Cianetos	0.001	Mercurio	0.002	Aldrin	0.18
Chumbo	0.03	Níquel	0.025	Clodarno	0.01
Cloretos	250.0	Nitrato	1.0	DDT	0.04
Cloro Residual	0.01	Nitrito	1.0	Dieldrin	0.002
Cobalto	0.2	Prata	0.01	Eldrin	0.005
Cobre	0.02	Pentaclorofenol	0.01	Endossul-fan	0.004
Cromo Trivalente	0.5	Selênio	0.01	Epóxido deHeptacloro	0.056
Cromo Hexavalent	0.05	Sólidos dissolvidototais	500.0	Heptacloro	0.01
1,1 dicloroto	0.0003	Substância tenso ativa reage com azul de metileno	0.5	Lindano (grama - BHC)	0.01
Metoxiclo-ro	0.03	Paration	0.04		
Dodecacio-ro + Nonacio-ro Bifenilas policloro-das PCB'S	0.001	Carbaril	0.02		
Toxafeno	0.01	Composto organofos-fosrato e carbanatos totais	10.0		
Demeton	0.1	2,4 D	4.0		
Gution	0.005	2,4,5 TP	10.0		
Malation	0.1	2,4,5 T	2.0		

**ANEXOS IV****MODELO CONCEITUAL DO ZHENG ET ALI, (1988)**



#### ANEXO: IV

### MODELO CONCEITUAL DO ZHENG ET ALI. 1988 PARA OBTER O PONTO DE ESTAGNAÇÃO EM DRENOS INTERCEPTORES

Considere o fluxo tridimensional no campo num aquífero não confinado interceptando o dreno parcialmente penetrante com mostra a figura 3.C, uma partícula que origina no lado montante do dreno pode entrar no dreno ou passar seguindo o gradiente hidráulico para lado jusante do dreno, dependendo do sistema de fluxo e a posição da partícula. Nas linhas de fluxo na rede mostrada algumas destas podem entrar totalmente e assim serem capturadas pelo dreno, mais, aquelas partículas abaixo da linha podem ficar fora do controle do dreno, e assim, se movimentam fora do dreno seguindo o gradiente hidráulico para jusante do dreno, caso a dispersão transversal é desprezível, esta superfície é referida como a superfície divisora, uma vez que esta superfície separa o fluxo interceptado da outra parte( underflow), figura 3.B.

Na quantificação da eficácia do dreno na interceptação de água subterrânea poluída, a profundidade da divisa subsuperficial é importante. Com esta profundidade da divisa subsuperficial, é possível prever que os poluentes da fonte do lado montante poderiam ser ou não interceptado pelo dreno, nos casos onde o efeito da dispersão é significativo, a divisa subsuperficial pelo menos providenciaria evidencia sobre a habilidade do dreno em delimitar o espalhamento da água poluída, além disso o conceito de dispersão hidrodinâmica como foi proposto por Batu, 1987, pode ser introduzido para contabilizar este efeito de dispersão.

Em geral a divisa subterrânea é complexa e tridimensional na vizinhança do dreno. Porém

nos casos onde os drenos são distintos nos aquíferos os componentes tridimensionais podem ser tratados aproximadamente como bidimensionais, assim reduzindo a complexidade do problema. Como uma primeira aproximação a análise desta concentração se limita ao estudo do fluxo bidimensional.

No campo do fluxo bidimensional a divisa subsuperficial pode ser representada como uma linha que se divide ao longo do fluxo regional (ou natural), sob condições permanentes, PATH LINES do fluxo subterrâneo se comportam como linha de fluxo. A linha divisora na realidade é uma linha especial que se separa o fluxo capturado com o under-fluxo ou sob-fluxo que flui abaixo desta linha, a posição desta divisa poderá ser determinada analiticamente ou numericamente. Uma solução analítica simples para o fluxo Bi-Dimensional sob o estado permanente que ocorre abaixo do dreno com declividade linear foi adotado seguindo as instruções de Slinhter, 1899. O aquífero é supostamente infinito em extensão espacial, isotrópico e homogêneo e situado no plano XY, onde Y representa a dimensão vertical com a carga ao longo de  $Y = 0$  é linear, representando o lençol freático ( $h = h_0 + I_x$ ) interceptado pelo dreno, o qual tem uma carga constante  $h_d$  e largura  $2a$  no intervalo de  $-a \leq x \leq +a$ .  $E$  é o gradiente uniforme do lençol freático  $\partial h / \partial x$  e  $h_0$  é a carga a no aquífero abaixo do dreno.

O problema foi resolvido pela superposição da condição de contorno da superfície.

$$h(x,0) = \begin{cases} h_0 & x < -a \\ h_d & -a \leq x \leq +a \\ h_0 & x > +a \end{cases} \text{----- (1a)}$$

é o fluxo uniforme horizontal no campo

$$h(x,y) = Ix \text{----- (1b)}$$

O problema do contorno (1a) para equação de Laplace é um problema padronizado na Teoria Potencial. A solução para fluxo horizontal no dreno foi proposto por Slichter, 1899. A superposição das soluções na equação de Laplace se resultaria em

$$h(x,y) = h_0 + Ix - \frac{1}{\pi}(h_0 - h_d) \left( \tan^{-1} \frac{a+x}{y} + \tan^{-1} \frac{a-x}{y} \right) \text{----- (2)}$$

A função do fluxo é

$$\psi(x,y) = K \left[ Iy - \frac{1}{2\pi}(h_0 - h_d) \ln \frac{(a+x)^2 + y^2}{(a-x)^2 + y^2} \right] \text{----- (3)}$$

onde  $K$  é condutividade hidráulica e  $\psi$  tem dimensões de  $L^2T^{-1}$ . O efeito da razão anisotrópica entre condutividades hidráulica horizontal ou vertical ( $r = K_x/K_y$ ) podem ser

incorporada na solução pela introdução de uma nova variável  $y' = y \sqrt{r}$ . A solução resultante é:

$$h(x, y') = h_0 + lx - \frac{1}{\pi} (h_0 - h_d) \left( \tan^{-1} \frac{a+x}{y'} + \tan^{-1} \frac{a-x}{y'} \right) \quad (4)$$

$$\psi(x, y') = \sqrt{K_x K_y} \left[ ly' - \frac{1}{2\pi} (h_0 - h_d) \ln \frac{(a+x)^2 + y'^2}{(a-x)^2 + y'^2} \right] \quad (5)$$

As equações 2 e 3 são os caso especiais das equações 4 e 5 no qual  $r = 1$  ou  $Y' = Y$ . A variável  $Y'$  será usada a partir daqui nas equações a serem derivadas para Meio Isotropico e Anisotropico.

O ponto de estagnação  $(X_{sp}, Y'_{sp})$  existe no lado jusante do dreno, a localização deste ponto é determinada pela condição que  $\partial\psi/\partial x \Big|_{X_{sp}, Y'_{sp}} = 0$  e  $\partial\psi/\partial x \Big|_{X_{sp}, Y'_{sp}} = 0$ . O resultado é:

$$X_{sp} = - \left\{ \frac{a^2}{2} + \frac{1}{2} \left[ a^2 + \frac{4a^2(h_0 - h_d)^2}{\pi^2 l^2} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$Y'_{sp} = \left[ X_{sp}^2 - a^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Após de localização o ponto de estagnação o valor de função de fluxo neste ponto  $\psi_{st}$  pode ser computado usando equação simples.

## ANEXOS V

1 - PROGRAMA DE APERFEIÇOAMENTO DE PHLPAS E PSLPAS

A - PROGRAMA EM PASCAL PARA OBTENÇÃO DAS LINHAS EQUIPOTENCIAIS,  $\Phi$

B - PROGRAMA EM PASCAL PARA OBTENÇÃO DAS LINHAS DE FLUXO,  $\psi$

C - PROGRAMA DE DRENOS INTERCEPTORES FEITO EM PASCAL

3 - REGRESSÃO LINEAR

4 - REGRESSÃO GEOMÉTRICA

3

1 : Na extremidade esquerda  
 3 : No centro  
 5 : Na extremidade direita

Localizacao do drenó:

PROGRAMA DE APERFEIÇADO DE PSI PHI

LEITURA DOS DADOS DE ENTRADA

ENTER NO OF ROWS: 14  
 ENTER NO OF COLUMNS: 78  
 ENTER INITIAL POTENTIAL, MAY BE 100: 100.4  
 ENTER VALUE OF DX: 3  
 ENTER VALUE OF M: 0.0134  
 Determine o valor de kx )  
 Determine o valor de ky )  
 Determine o fator de multiplicacao do drenó 1.02  
 Determine o fator de multiplicacao do drenó 1.02

PROGRAMA DE APERFEIÇADO DE PSI PHI

Esse programa gera pontos de dois vetores psi phi.  
 Primeiramente ele gera psi depois gera phi, seguidamente  
 logo apos, ele apresenta o vetor psi, seguido do vetor phi.  
 Para tanto, digite qualquer tecla e siga as instrucoes

PROGRAMA DE APERFEIÇADO DE PSI PHI

## PROGRAMA DE APERFEICADO DE PSI PHI

Determine a profundidade do dreno, sendo maior que zero e  
menor que 13  
R = 11

## PROGRAMA DE APERFEICADO DE PSI PHI

Aguarde um momento o resultado dos dados



ENTER NAME OF OUTPUT FILE OF PSI: PSIA  
ENTER NAME OF OUTPUT FILE OF PHI: PHIA

3 100.52 100.52 100.51 100.50 100.50 100.49 100.48 100.47 100.47100.46  
100.45 100.45 100.44 100.43 100.43 100.42 100.41 100.41  
100.42100.44 100.47 100.49 100.50 100.52 100.54 100.55 100.56 100.57 1  
00.58100.58 100.58 100.58 100.58 100.58 100.58 100.58 100.57 100.57 10  
0.57100.57 100.56 100.56 100.56 100.55 100.55 100.54 100.54 100.54 100.  
.53100.53 100.53 100.52 100.52 100.52 100.51 100.51 100.51 100.50 100.  
50100.50 100.49 100.49 100.48 100.48 100.48 100.47 100.47 100.47 100.4  
6100.46 100.46 100.45 100.45 100.45 100.45 100.44 100.44 100.43 100.43  
100.43 100.42 100.42 100.41 100.41 100.41 100.41 100.40

PROGRAMA DE APERFEIÇADO DE PSI PHI

Digite uma tecla, para conhecer o segundo vetor

40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40100.4  
0 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40100.40  
100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40  
100.53100.53 100.53 100.52 100.52 100.51 100.50 100.49 100.48 100.47 1  
00.46100.45 100.44 100.44 100.43 100.42 100.42 100.41 100.41 100.41 10  
0.41100.41 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.  
.40100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.  
40100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.4  
0100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40  
100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40 100.40

PROGRAMA DE APERFEIÇADO DE PSI PHI

## ANEXO V

A. PROGRAMA EM PASCAL PARA OBTENÇÃO DAS LINHAS EQUIPOTENCIAIS,  $\Phi$ 

```

PROGRAM POTENTIALS_phiPAS;
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..30,1..30] OF REAL;
VAR
  H:VECTOR;
  R,C,NUMIT,NUM,J,I,t,u:INTEGER;
  CO,AMAX,dx,OLDVAL,RRE,MIN,MAX,INITIAL:REAL;
  A:CHAR;
PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR
M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PHIPAS:text;
  NAME_OUTPUT_FILE:STRING[14];
  I,J,C:INTEGER;
  AR:REAL;
BEGIN
  WRITE ('ENTER NAME OF OUTPUT FILE ');
  READLN (NAME_OUTPUT_FILE);
  ASSIGN (PHIPAS,NAME_OUTPUT_FILE);
  REWRITE (PHIPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (PHIPAS,M,' ');
  WRITELN (PHIPAS,C,' ');
  WRITELN (PHIPAS,MAX,' ');
  WRITELN (PHIPAS,MIN,' ');
  WRITELN (PHIPAS,DX,' ');
  WRITELN (PHIPAS,DX,' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        WRITELN (AR); {Removing this line, the matrix in vertical form does not appear}
        WRITELN (PHIPAS,AR:10:6,' ');
      END;
    CLOSE (PHIPAS)
  END;
END;
BEGIN

```

```

CLRSCR;
NUM:=0;
WRITE('ENTER NO OF ROWS ,may be any number:');
READLN (R);
WRITE('ENTER NO OF COLUMNS ,Better an odd no. & < No. of Rows for Top
Line to be Symmetric about C/Line:');
READLN (C);
WRITE ('ENTER INITIAL VALUE OF POTENTIAL , may be 100 volts, put as 100:');
READLN (INITIAL);
WRITE ('ENTER VALUE OF DX=DY: ');
READLN (DX);
WRITE('ENTER VALUE OF C, being the gradient in whole no of decimal,not as 1/6 :
);
READLN (CO);
FOR J:=1 TO R DO
  FOR I:=1 TO C DO
    H[I,J]:=INITIAL;
  FOR I:=2 TO (C-1) DO
    H[I,1]= CO*DX*(I-2)+INITIAL;
  NUMIT:=0;
  AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO {the more the decimals, more the accuracy, and more the
no.of iterations }
    BEGIN
      NUMIT:=NUMIT + 1;
      AMAX:=0;
      FOR J:=1 TO (R-1) DO
        BEGIN
          H[1,J]:= H[3,J];
          H[C,J]:= H[C-2,J]
        END;
      FOR I:=2 TO (C-1) DO
        H[I,R]:=H[I,R-2];
      FOR J:=2 TO (R-1) DO
        BEGIN
          FOR I:=2 TO (C-1) DO
            BEGIN
              OLDVAL:=H[I,J];
              H[I,J]:=(H[I-1,J]+H[I+1,J]+H[I,J-1]+H[I,J+1])/4;
              RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
              IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
              IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
            END
          END;
        END;
      WRITELN ('NO OF ITERATIONS WAS :',NUMIT);

```

```
WRITELN ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX,' C=',CO);
MIN:=H[2,1];
MAX:=H[2,1];
FOR J:=1 TO (R-1) DO
BEGIN
  WRITELN;
  FOR I:=2 TO (C-1) DO
  BEGIN
    IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
    IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
    WRITE (H[I,J]:7:2) {if you desire to have 3 decimals,use 8:3}
  END
END;
for u:=1 to 200 do
  for t:=1 to 20 do;{if no. is < or > than 200, screen moves faster or slower}
WRITELN;
END;
WRITELN;
WRITELN;
RECORD_FILE (H,J,I,DX,MAX,MIN);
a:=READkey {Press any key, it shows the matrix will be shown a being a variable}
END.
```

## B. PROGRAMA EM PASCAL PARA OBTENÇÃO DAS LINHAS DO FLUX, $\Psi$

```

PROGRAM POTENTIALS_INVERSE_ENGINGERPAS;
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..30,1..30] OF REAL;
VAR
  II:VECTOR;
  L,C,P,MO,NUMIT,J,I,t,u:INTEGER;
  CO,AMAX,OLDVAL,RRE,MIN,MAX,INITIAL,dx,W:REAL;
  A:CHAR;
PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR
M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  ENGINGERPAS:text;
  NAME_OUTPUT_FILE:STRING [14];
  I,J,c:INTEGER;
  AR:REAL;
BEGIN
  WRITE ('ENTER NAME OF OUTPUT FILE ');
  READLN (NAME_OUTPUT_FILE);
  ASSIGN (ENGINGERPAS,NAME_OUTPUT_FILE);
  REWRITE (ENGINGERPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (ENGINGERPAS,M,' ');
  WRITELN (ENGINGERPAS,C,' ');
  WRITELN (ENGINGERPAS,MAX,' ');
  WRITELN (ENGINGERPAS,MIN,' ');
  WRITELN (ENGINGERPAS,DX,' ');
  WRITELN (ENGINGERPAS,DX,' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        WRITELN (ENGINGERPAS,AR:10:6,' ');
      END;
  CLOSE (ENGINGERPAS)
END;

BEGIN
  CLRSCR;
  WRITE('ENTER NO OF ROWS ');

```

```

READLN (L);
WRITE('ENTER NO OF COLUMNS ');
READLN (C);
WRITE ('ENTER INITIAL VALUE OF POTENTIAL, MAY BE 100 ');
READLN (INITIAL);
WRITE ('ENTER VALUE OF DX ');
READLN (DX);
WRITE ('ENTER VALUE OF C ');
READLN (CO);
FOR J:=1 TO L DO
  FOR I:=1 TO C DO
    H[I,J]:=INITIAL;
W:=DX*CO*(C-3);
P:=(C-2) DIV 2;
MO:=(C-2) MOD 2;
IF MO=1 THEN
  BEGIN
    P:=P+1;
    FOR I:=2 TO (P+1) DO
      H[I,1]:=INITIAL+W*(I-2)/((P+1)-2);
    FOR I:=(P+1) TO (C-1) DO
      H[I,1]:=(INITIAL+W)-W*(I-(P+1))/((C-1)-(P+1));
    END
  ELSE
    BEGIN
      FOR I:=2 TO (P+1) DO
        H[I,1]:=INITIAL+W*(I-2)/((P+1)-2);
      FOR I:=(P+2) TO (C-1) DO
        H[I,1]:=(INITIAL+W)-W*(I-(P+2))/((C-1)-(P+2));
      END;
  NUMIT:=0;
  AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO
    BEGIN
      NUMIT:=NUMIT + 1;
      AMAX:=0;
      FOR J:=2 TO (L-1) DO
        BEGIN
          FOR I:=2 TO (C-1) DO
            BEGIN
              OLDVAL:=H[I,J];
              H[I,J]:=(H[I-1,J]+H[I+1,J]+H[I,J-1]+H[I,J+1])/4;
              RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
              IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
              IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
            END
          END
        END
      END
    END
  END

```

```

    END
  END;
  WRITELN ('NO OF ITERATIONS WAS ',NUMIT);
  WRITELN ('COLUMNS=',C,' ROWS=',L,' DX=',DX,' C=',co);
  MIN:=H[2,1];
  MAX:=H[2,1];
  FOR J:=1 TO (L-1) DO
  BEGIN
    WRITELN;
    FOR I:=2 TO (C-1) DO
    BEGIN
      IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
      IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
      WRITE (H[I,J]:7:2)
    END
  END;
  for t:=1 to 200 do
    for u:=1 to 20 do; {If 20 or 2000, screen ill be slower}
    WRITELN;
  END;
  WRITELN;
  WRITELN;
  RECORD_FILE (H,J,I,DX,MAX,MIN);
  a:=READkey
END.

```

---

### C..PROGRAME DE DRENS INTERCEPTORES - FEITO EM PASCAL)

```

PROGRAM POTENTIALS_INVERSE_PROBLEM_PSIPAS PARA DRENO
INTERCEPTOR;
{$n+,e+}
{ POTENTIAL (AND FLUX) DISTRIBUTION PROBLEM

IN TWO-D RECTANGULAR DOMAIN USING FINITE DIFFERENCES SCHEME}

{WHAT ARE PHILINES ON ONE PLOT ARE PSILINES ON ANOTHER PLOT,
WITH PROPER
BOUNDARY AND INITIAL CONDITIONS AND VICE VERSA. THE PHI AND PSI
FUNCTIONS
OR CURVES ARE INTERCHANGEABLE}

USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..50,1..50] OF real;
VAR

```

```

H:VECTOR;
P,R,C,MO,NUMIT,J,I:INTEGER;
kx, ky, m,AMAX,OLDVAL,RRE,dx,MIN,MAX,INITIAL,W:REAL;
A:CHAR;
PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR
M,N:INTEGER,dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
PSIPAS:text;
NAME_OUTPUT_FILE:STRING [14];
I,J,c:INTEGER;
AR:real;
BEGIN
WRITE ('ENTER NAME OF OUTPUT FILE: ');
READLN (NAME_OUTPUT_FILE);
ASSIGN (PSIPAS,NAME_OUTPUT_FILE);
REWRITE (PSIPAS);
C:=N-1;
WRITELN (PSIPAS,M,' ');
WRITELN (PSIPAS,C,' ');
WRITELN (PSIPAS,MAX,' ');
WRITELN (PSIPAS,MIN,' ');
WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
FOR I:=1 TO M DO
FOR J:=2 TO N DO
BEGIN
AR:=F[J,I];
WRITELN (PSIPAS,AR:10:6,' ');
END;
CLOSE (PSIPAS)
END;

BEGIN

CLRSCR;
WRITE('ENTER NO OF ROWS: ');
READLN (R);
WRITE('ENTER NO OF COLUMNS: ');
READLN (C);
WRITE ('ENTER INITIAL VALUE OF POTENTIAL, MAY BE 100: ');
READLN (INITIAL);
WRITE ('ENTER VALUE OF DX :');
READLN (DX);
WRITE ('ENTER VALUE OF M :');

```



```

READLN (m);
FOR J:=1 TO R DO
  FOR I:=1 TO C DO
    H[I,J]:=INITIAL;

```

```

W:=DX*m*(C-3);

```

Alterando o valor de P, na equação abaixo, você altera a localização do dreno;

```

P:= 18;

```

```

FOR I:=2 TO p DO
  H[I,1]:=INITIAL+W*((i-2)/(p-2));
FOR I:=p TO (p+2) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w;
FOR I:=p+2 TO (C-1) DO
  H[I,1]:=(initial+w)-W*((i-p-2)/(c-3-p));
NUMIT:=0;

```

```

AMAX:=1;

```

```

WHILE AMAX > 0.001 DO

```

```

  BEGIN

```

```

    NUMIT:=NUMIT + 1;

```

```

    AMAX:=0;

```

```

    FOR J:=2 TO (R-1) DO

```

```

      BEGIN

```

```

        FOR I:=2 TO (C-1) DO

```

```

          BEGIN

```

```

            {h[7,1] :=120; maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

```

            {h[13,1] :=120; maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

```

            { h[19,1] :=120; } {maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

COM UMA MAIOR TAXA DE RECARGA DE 150m, OS SEGUINTE DADOS DE ENTRADA PODEM SER USADOS

```

{h[7,1] :=150; maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

```

{h[13,1] :=150; maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

```

{h[19,1] :=150; maior de 120 para recarga, menor de 90 p/- descarga}

```

```

  OLDVAL:=H[I,J];

```

```

  kx:=1;

```

```

  ky:=1;

```

```

  { if (i=p+1) and (j<1)

```

```

    then h[i,j]:= kx*1.2*h[i,1]; } {TENTE 2 e 4 TABMBEM}
    H[I,J]:=(kx*(h[1-1,J]+H[1+1,J])+ky*(h[1,J-1]+H[1,J+1]))/4;
    RRE:=H[1,J]-OLDVAL;
    IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
    IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
  END
END
end;
Writeln ('NO OF ITERATIONS WAS ',NUMIT);
Writeln ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
MIN:=H[2,1];
MAX:=H[2,1];
FOR J:=1 TO (R-1) DO
  BEGIN
    Writeln;
    FOR I:=2 TO (C-1) DO
      BEGIN
        { ALTERANDO O VALOR DE j PODEMOS CONSEGUIR A VARIACAO DO
TAMANHO
DO DRENO NO SENTIDO VERTICAL}

        { Na seguinte linha, com j < 5 o dreno vai ate 5 }
        if (i=p+1) and (j=1)
          then h[i,j]:= kx*1.2*h[i,1];
        IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
        IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
        WRITE (H[I,J]:7:2)
      END
    END;
    Writeln;
    Writeln;
    Writeln;
    RECORD_FILE (H,J,I,DX,MAX,MIN);
    a:=READkey;
    CLRSCR;
    WRITE('ENTER NO OF ROWS: ');
    READLN (R);
    WRITE('ENTER NO OF COLUMNS: ');
    READLN (C);
    WRITE ('ENTER INITIAL VALUE OF POTENTIAL, MAY BE 100: ');
    READLN (INITIAL);
    WRITE ('ENTER VALUE OF DX: ');
    READLN (DX);
  END
END

```

```

WRITE ('ENTER VALUE OF M :');
READLN (m);
FOR J:=1 TO R DO
  FOR I:=1 TO C DO
    H[I,J]:=INITIAL;
    W:=DX*m*(C-3);
    { ALTERANDO O VALOR DE P PODEMOS CONSEGUIR O DESLOCAMENTO
DO DRENO AO LONGO DO GRAFICO, PARA ISSO ALTERE O FATOR DE DIVISAO, OU ENTAO
ATRIBUA DIRETAMENTE UM VALOR PARA p. POR EXEMPLO, AO INVES DE p+1 FACAMOS
p+4, OU p+5
    ENTAO OBTEREMOS UM DESLOCAMENTO PARA AS POSICOES, 1,4,5,
RESPECTIVAMENTE
    AS PROXIMAS TRES LINHAS CORRESPONDEM AO DESLOCAMENTO DO
DRENO}
      { fechamos a linha seguinte e colocamos 3 em lugar de
p + 1, para obtermos a posicao na coluna 3 }

{ P:=(C-2) DIV 3;}

{ Alterando o valor de P, na equacao abaixo, voce altera a localizacao
do dreno}
P:= 9; (ESTA POSICAO DO DENO FOI MUDADO PARA UM DOS CASOS.)

FOR I:=2 TO p DO
  H[I,1]:=INITIAL {+W*((i-2)/(p-2))};
FOR I:=p TO (p+1) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w;
FOR I:=p+1 TO (C-1) DO
  H[I,1]:=INITIAL {+w}-W*((i-p-2)/(c-3-p));
NUMIT:=0;

AMAX:=1;
WHILE AMAX > 0.001 DO
  BEGIN
    NUMIT:=NUMIT + 1;
    AMAX:=0;
    FOR J:=1 TO (R-1) DO
      BEGIN
        H[1,J] := H[3,J];
        H[C,J] := H[C-2,J];
      END;
    FOR I := 2 TO (C-1) DO
      begin

```

```

H[I,R] := H[I,R-2];
end;
FOR J:=2 TO (R-1) DO
  BEGIN
    FOR I := 2 TO (C-1) DO
      BEGIN
        OLDVAL:=H[I,J];

        {Kx e Ky, abaixo, referem-se aos valores de permeabilidade da matriz}

        kx:=1;
        ky:=1;

        {Alterando o valor de J, na equacao abaixo, voce altera a profundidade
        do dreno}

        {
          if (i=p+1) and (j<1)
            then h[i,j]:= kx*1.2*h[i,1];}
        H[I,J]:=(kx*(h[I-1,J]+H[I+1,J])+ky*(h[I,J-1]+H[I,J+1]))/4;
        RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
        IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
        IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
        END
      END
    end;
    WRITELN ('NO OF ITERATIONS WAS ',NUMIT);
    WRITELN ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
    MIN:=H[2,1];
    MAX:=H[2,1];
    FOR J:=1 TO (R-1) DO
      BEGIN
        WRITELN;
        FOR I:=2 TO (C-1) DO
          BEGIN

            { ALTERANDO O VALOR DE j PODEMOS CONSEGUIR A VARIACAO DO
            TAMANHO
            DO DRENO NO SENTIDO VERTICAL}

            { Na seguinte linha, com j < 5 o dreno vai ate 5 }

            if (i=p+1) and (j<1)

```

{Kx abaixo, refere-se ao valor de permeabilidade do dreno }

```
      then h[i,j]:= kx*1.2*h[i,1];  
      IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];  
      IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];  
      WRITE (H[I,J]:7:2)  
      END  
      END;  
      WRITELN;  
      WRITELN;  
      WRITELN;  
      RECORD_FILE (H,I,J,DX,MAX,MIN);  
      a:=READkey;  
      END.
```

```
PROGRAM POTENTIALS_INVERSE_PROBLEM_PSIPIAS;  
USES CRT,  
TYPE
```

149

```
VECTOR = ARRAY [1..80,1..65] OF REAL;  
VAR  
phi_vector, psi_vector: VECTOR;  
profundidade, temp, P, R, C, MD, NUMIT1, numit2, J, I: INTEGER;  
fal_x, fal_y, kx, ky, m, min, max,  
AMAX1, amax2, dx, INITIAL, W: REAL;  
A: CHAR;
```

```
PROCEDURE TELA;
```

```
var  
  TL, LL : integer;  
begin  
  CLRSKR;  
  WINDOW (1,1,80,25);  
  TEXTBACKGROUND (1);  
  CLRSKR;  
  TEXTCOLOR (15);  
  FOR ET:=1 TO 24 DO  
  BEGIN  
    FOR IL:=1 TO 80 DO  
      WRITE (CHR (178));  
    END;  
    GOTOXY (1,1);  
    WRITELN ('PROGRAMA DE APERFEICOADO DE PSI PHI');
```

```
PROCEDURE WINDOWS(Z, Z1, Z2, Z3, Z4: WORD);
```

```
var  
  TL, LL : integer;  
begin  
  WINDOW (Z, Z1, Z2, Z3);  
  CLRSKR;  
  TEXTBACKGROUND(Z4);  
  CLRSKR;  
  GOTOXY(1,1);  
  WRITE ('F');  
  GOTOXY(2,1);  
  FOR TL:=1 TO (Z2-Z1) DO  
    WRITE ('-');  
  GOTOXY(2, Z3-Z1+1);  
  FOR LL:=1 TO (Z2-Z-2) DO  
    WRITE ('-');  
  GOTOXY(1,2);  
  FOR TL:=1 TO (Z3-Z1-1) DO  
    WRITELN ('|');  
  GOTOXY(Z2-Z,2); Z4:=2;  
  FOR LL:=1 TO (Z3-Z1-1) DO  
  BEGIN  
    GOTOXY(Z2-Z, Z4);  
    WRITELN ('|');  
    Z4:=Z4+1;  
  END;  
  GOTOXY(Z2-Z,1);  
  WRITE ('-');  
  GOTOXY(1, Z3-Z1+1);  
  WRITE ('-');  
  GOTOXY(Z2-Z, Z3-Z1+1);  
  WRITE ('-');  
  WINDOW (1,1,80,25);  
  WINDOW (Z4, Z1+1, Z2-2, Z3-1);  
  GOTOXY(1,1);  
end;
```

```

procedure define_tela(x1,x2,x3,x4,x5 : integer);
begin
  clrscr;
  tela;
  windows(x1,x2,x3,x4,x5);
end;

```

```

procedure apresenta_programa;
begin
  writeln;
  writeln(' Esse programa gera pontos de dois vetores psi phi');
  writeln(' Primeiramente ele gera psi depois gera phi, seguidamente');
  writeln(' Logo apos, ele apresenta o vetor psi, seguido do vetor phi');
  writeln(' Para tanto, digite qualquer tecla e siga as instrucoes');
  a := readkey;clrscr;
end;

```

```

procedure le_valores(var rr,cc:integer; var initiall,ddx,mm,kkx,kky,
  fatorx,fatory : real);
begin
  WRITE('ENTER NO OF ROWS: ');READLN (rR);
  WRITE('ENTER NO OF COLUMNS: ');READLN (cC);
  WRITE ('ENTER INITIAL POTENTIAL, MAY BE 100: ');READLN (INITIAL1);
  WRITE ('ENTER VALUE OF DX :');READLN (dDX);
  WRITE ('ENTER VALUE OF M :');READLN (mM);
  write ('Determine o valor de kx ');readln(kkx);
  write ('Determine o valor de ky ');readln(kky);
  write ('Determine o fator de multiplicacao do dreno');readln(fatorx);
  write ('Determine o fator de multiplicacao do dreno ');readln(fatory);
  clrscr;
end;

```

```

procedure inicia_vetor(rr, cc : integer; initiall : real; var ps_vet : vecto;
var
  ii, jj : integer;
begin
  FOR jj:=1 TO Rr DO
    FOR ii:=1 TO Cc DO
      ps_vet[ii,jj]:=INITIAL1;
end;

```

```

procedure longitudinalidade_dreno(cc : integer; var pp : integer);
var
  aux_pp : integer;
begin
  REPEAT
    WRITELN(' Localizacao do dreno:');
    writeln;
    writeln(' 1 : Na extremidade esquerda');
    writeln(' 3 : No centro');
    writeln(' 5 : Na extremidade direita');
    READLN(pp);
    aux_pp := pp;
    IF (pp<>1) and (pp<>3) and (pp<>5)
      THEN begin
        WRITELN('Voce digitou um valand inconveniete, aguarde um momento ');
        delay(800);
      end
    else
      case pp of
        1 : pp := 2;

```

```
3 : pp := {(cc)div(2)} 6;  
5 : pp := cc-2;
```

151

```
end;  
UNTIL (aux_pp=1) or (aux_pp=3) or (aux_pp=5);  
end;
```

```
procedure profundidade_dreno(rr : integer; var prof_dreno : integer);  
begin  
  writeln(' Determine a profundidade do dreno, sendo maior que zero e');  
  writeln(' menor que ',rr-1);write(' R = ');  
  readln(prof_dreno);  
  while(prof_dreno < 0) or (prof_dreno > rr) do  
    begin  
      writeln('Voce digitou um numero ou menor que zero ou maior que ',  
              rr);  
      writeln('Digite outro numero');  
      readln(prof_dreno);  
    end;  
  end;  
end;
```

```
procedure condicoes_contorno(pp, cc : integer; var ww : real; initi, ddx,  
                             mm : real; var ps_vet, ph_vet : vector );  
var  
  ii : integer;  
begin  
  ww:=ddx*mm*(cc-3);  
  
  FOR ii:=2 TO pp DO  
    begin  
      ps_vet[ii,1]:=INITI;  
      ph_vet[ii,1]:=INITI+ ww*((ii-2)/(pp-2));  
    end;  
  
  FOR ii:=pp TO (pp+1) DO  
    ps_vet[ii,1]:=INITI+ww;  
  FOR ii:=pp TO (pp+2) DO  
    ph_vet[ii,1] := initi+ww;  
  
  FOR ii:=pp+1 TO (cc-1) DO  
    ps_vet[ii,1]:= (initi);  
  FOR ii:=pp+2 TO (cc-1) DO  
    ph_vet[ii,1]:= (initi+ww) - ww*((ii-pp-2)/(cc-3-pp));  
end;
```

```
PROCEDURE INTERAGE_VALORES(rr,cc : integer; kxx, kky : real;  
                             var amaxx : real; var ps_vet : vector);  
var  
  jj, ii : integer;  
  pre, oldval : real;  
BEGIN  
  FOR JJ:=2 TO (RR-1) DO  
    FOR II := 2 TO (CC-1) DO  
      BEGIN  
        oldval := ps_vet[II,JJ];  
        ps_vet[ii,jj]:=(kxx*(ps_vet[ii-1,jj]+ps_vet[ii+1,jj])+  
                        kky*(ps_vet[ii,jj-1]+ps_vet[ii,jj+1]))/4;  
        RRE:=ps_vet[ii,jj]-OLDVAL;  
        IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);  
        IF RRE > AMAXx THEN AMAXx:=RRE;  
      END  
    END  
  END;  
END;
```



```

procedure gera_pontos(rr, cc, flag : integer; var numitt : integer;
                    kxx, kky : real; var amaxx : real; var ps_vet : vector);
var
  ii, jj : integer;
begin
  WHILE AMAXX > 0.001 DO
    BEGIN
      inc(NUMITT);
      AMAXX:=0;
      if (flag = 1)
        then begin
          FOR jj:=1 TO (rR-1) DO
            BEGIN
              ps_vet[1,jj] := ps_vet[3,jj];
              ps_vet[cc,jj] := ps_vet[cc-2,jj];
            END;
          FOR ii := 2 TO (cc-1) DO
            ps_vet[ii,rR] := ps_vet[ii,rR-2];
          end;
          {inc(NUMITT);
          AMAXX:=0;}
          interage_valores(rr,cc,kxx,kky,amaxx,ps_vet);
        end;
      end;
end;

```

```

procedure apresenta_resultados(rr,cc,pp,profundi,numitt:integer; var mmin,
                               mmax:real; fatorx,fatory,ddx,mm,kxx,kky:real; var ps_vet : vector)
var
  flag1, ii, jj : integer;
begin
  flag1 := 0;
  WRITELN (' NO OF ITERATIONS WAS :',NUMITT);
  WRITELN (' COLUMNS=',cc-2,' ROWS=',rR-1,' DX=',dDX:6:2,' C=',mm:6:2);
  mMIN:=ps_vet[2,1];
  mMAX:=ps_vet[2,1];

  clrscr;
  writeln(' VETOR GERADO');
  FOR jj:=1 TO (rR-1) DO
    BEGIN
      WRITELN;
      FOR ii:=2 TO (cc-1) DO
        BEGIN
          inc(flag1);
          if (ii=pp+1) and (jj<profundi)
            then begin
              ps_vet[ii,jj]:= kxx*fatorx*ps_vet[ii,1];
              ps_vet[ii,jj]:= kky*fatory*ps_vet[1,jj];
            end;
          IF ps_vet[ii,jj] < mMIN THEN mMIN:=ps_vet[ii,jj];
          IF ps_vet[ii,jj] > mMAX THEN mMAX:=ps_vet[ii,jj];
          if flag1 = 11
            then begin
              WRITE (ps_vet[ii,jj]:6:2);
              flag1 := 0;
            end
          else WRITE (ps_vet[ii,jj]:6:2,' ');
        END
      END;
    END;
  end;
end;

```

```
PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR; M,N, flag:INTEGER; ddx,mMAX,mMIN:REAL);  
VAR
```

153

```
  PSIPAS:text;  
  NAME_OUTPUT_FILE:STRING [14];  
  i,j:INTEGER;  
BEGIN
```

```
{Nao ha necessidade de inserir a terminacao .dat, pois o computador  
ja o inseri}
```

```
  if (flag = 1)  
    then WRITE ('ENTER NAME OF OUTPUT FILE of psi: ');  
    else WRITE ('ENTER NAME OF OUTPUT FILE of phi: ');  
  READLN (NAME_OUTPUT_FILE);  
  NAME_OUTPUT_FILE := NAME_OUTPUT_FILE + '.dat';  
  ASSIGN (PSIPAS,NAME_OUTPUT_FILE);  
  REWRITE (PSIPAS);  
  WRITELN (PSIPAS,M,' ');  
  WRITELN (PSIPAS,n-1,' ');  
  WRITELN (PSIPAS,mMAX,' ');  
  WRITELN (PSIPAS,mMIN,' ');  
  WRITELN (PSIPAS,ddx,' ');  
  WRITELN (PSIPAS,ddx,' ');  
  FOR ii:=1 TO M DO  
    FOR jj:=2 TO N DO  
      WRITELN (PSIPAS,f[jj,ii]:10:6,' ');  
  CLOSE (PSIPAS)  
END;
```

```
BEGIN
```

```
  define_tela(6,7,70,14,6);  
  NUMIT1:=0; AMAX1:=1; NUMIT2:=0; AMAX2:=1;  
  apresenta_programa;  
  define_tela(6,5,65,22,6);  
  writeln('          LEITURA DOS DADOS DE ENTRADA');  
  le_valores(r,c,initial,dx,m,kx,ky,fat_kx,fat_ky);  
  inicia_vetor(r,c,initial,psi_vetor);  
  inicia_vetor(r,c,initial,phi_vetor);  
  define_tela(6,4,73,16,6);  
  longitudinalidade_dreno(c,p);clrscr;  
  profundidade_dreno(r,profundidade);  
  clrscr;  
  writeln;writeln;writeln;  
  writeln('          Aguarde um momento o resultado dos dados');  
  delay(500);  
  condicoes_contorno(p,c,w,initial,dx,m,psi_vetor,phi_vetor);  
  gera_pontos(r,c,1,numit1,kx,ky,amax1,psi_vetor);  
  gera_pontos(r,c,2,numit2,kx,ky,amax2,phi_vetor);  
  define_tela(1,4,80,18,6);  
  clrscr;  
  writeln('          DADOS E O VETOR PSI');  
  apresenta_resultados(r,c,p,profundidade,numit1,min,max,  
    fat_kx,fat_ky,dx,m,kx,ky,psi_vetor);  
  writeln;writeln;  
  writeln('          Digite uma tecla, para conhecer o segundo vetor');  
  a := readkey;  
  clrscr;  
  writeln('          DADOS E O VETOR PHI');  
  apresenta_resultados(r,c,p,profundidade,numit1,min,max,  
    fat_kx,fat_ky,dx,m,kx,ky,phi_vetor);  
  WRITELN;WRITELN;WRITELN;  
  temp := c-1;  
  RECORD_FILE (psi_vetor,r,temp,1,DX,MAX,MIN);  
  RECORD_FILE (phi_vetor,r,temp,2,DX,MAX,MIN);
```

**ANEXOS VI****MODELO DE DIFERENÇA FINITA**

## ANEXOS VI

### MODELO MATEMÁTICO ADOTADO

### DIFERENÇAS FINITAS APLICADAS AO CASO DE DRENO INTERCEPTOR

### HISTÓRICO

Os métodos numéricos são comuns hoje em dia, os quais virtualmente são desconhecidos nos anos 1950 e as máquinas/computadores mais velozes facilitaram os cientistas e engenheiros resolver problemas mais complexos. Assim foi estimulada a pesquisa sobre análise numérica nas áreas relevantes de matemática. As Diferenças Finitas para derivadas foram aplicadas inicialmente para sistemas Uni-Dimensionais, mas esta atualmente sendo usadas para problemas envolvendo duas e três dimensões também.

surtem em 1908 usou a solução numérica para a equação de Poisson,  $u_{xx} + u_{yy} = f(x,y)$  e Richardson em 1910 introduziu o método iterativo na resolução deste tipo de problemas (Ames, 1983. Resolver a equação de Laplace significa identificar os potenciais em função de  $x$  e  $y$  a Eq. de Laplace diz que a soma dos derivativos parciais da função do potencial,  $\phi$  (Phi), a respeito de  $x$  e  $y$  é zero. A solução de Eq. de Laplace exige conhecimento das condições de contorno nas margens do domínio do fluxo. O teorema de UNIQUENESS diz que as soluções para as duas funções  $\phi$  e sua função conjugal,  $\psi$  (Psi), são únicos.

Equações elípticas tais como a de Laplace descrevem fenômenos que não mudam de um momento para outro, como é no caso atual, enquanto nas equações

hiperbólicas e parabólicas dadas pelas equações,  $u_{tt}-u_{xx}=0$  e  $u_{xx}+u_{yy}=u_t$  e  $u_t=u_{xx}$  (os quais pertencem a mecânica das ondas e o fenômeno de difusão e dinâmica dos gases), a condição é não-permanente. A equação diferencial parcial é quasi-linear, caso seja escrita com duas variáveis independentes em x e y. Tais equações podem escritas como:

$$u_{xx} + 2 B u_{xy} + C u_{yy} = f(x,y,u,u_x,u_y) \quad (1)$$

onde  $u_{xx} = \partial^2 u / \partial x^2$ ,  $u_{xy} = \partial^2 u / \partial x \partial y$  e  $u_{yy} = \partial^2 u / \partial y^2$ .

A, B e C a Eq.(1) são funções de x e y.

A equação é chamada uma equação de tipo:

Elíptica	quando $(AC-B^2)>0$	(Equação de Laplace)
Parabólica	quando $(AC-B^2)=0$	(Equação de Calor)
Hiperbólica	quando $(AC-B^2)<0$	(Equação de Ondas)

Os métodos de iteração são trabalhosos. Com uma rede de quatro colunas e quatro linhas no campo de estudo, os potenciais poderão ser resolvidos até com uma calculadora. Mas quando a rede é de ordem de  $14 \times 28$  ou  $14 \times 53$  ou  $14 \times 78$ , o use de computador será essencial, devido o número das iterações envolvidas. Kreiszig, 1983<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Kreiszig. Erwin, Advanced Engineering Mathematics, John Wiley, New York, 5th Ed. 1983, pp.1-988

## METODOLOGIA ADOTADA

O presente estudo é baseado na construção de um modelo matemático em solucionar a Equação de Laplace. A região do estudo é tratada como homogênea e isotropica para a parte da matriz do aquífero, enquanto a parte do dreno também foi tratada como isotropica e homogênea, mas com valores diferentes de permeabilidade, assim a região inteira se torna como anisotropica. O procedimento de Gauss-Seidel foi usado para o processo de iteração e os programas foram escritos na linguagem de Pascal, cujo objetivo é de criar o dados de saída em termos de arquivos chamados como Phi.dat e Psi.dat. E os dois arquivos vão servir como dados de entrada para os Programas de Kinzelbach para fim de traçar as Isolinhas. Estes dois arquivos resultarão na representação gráfica da rede do fluxo, isto é nas linhas equipotenciais e da corrente ou fluxo. Esta família das linhas interceptam ortogonalmente formando "quadrados". Mais próximos estas linhas um com outro, maior será a concentração dos potenciais e vice-versa.

A finalidade deste estudo é de demonstrar a utilidade do computador e a linguagem de PASCAL em solucionar as equações lineares parciais de segundo ordem utilizando o artifício de Diferenças Finitas, com condições impostas de Dirichlet e Neumann.

Teste estudo enfoca o uso de PASCAL na obtenção de solução da Eq. de Laplace em resolver o problema de Drenos Interceptores como meios mais eficientes da descontaminação dos poluentes. A equação foi usada na forma discretizada, com a facilidade de adicionar ou diminuir as linhas do fluxo ou equipotenciais de acordo de necessidade de usuário.

### **A IMPORTANCIA DO USO DA LINGUAGEM DE PASCAL**

TURBO PASCAL (TP) é uma linguagem extremamente rápida, no tempo de compilação, bem como na execução dos programas. O TP editor é ligado diretamente para manipulação dos erros do compilador. O controle é automaticamente transferido ao editor. TP permite a utilização dos recursos de hardware de Microcomputador. O uso de tais parâmetros como VAR e VALUE, e Procedures facilitarão rápida execução dos programas.

A versão gráfica de TP 5.5 e 6.0 do TURBO PASCAL usado aqui é de patente de Borland International Inc.

## ISOLINHAS QUE PRODUZEM LINHAS DE $\Phi$ e $\Psi$

### A TEORIA DENTRO DE TESE CSSO VEM AQUI

A matriz consiste de 14x27 das linhas, com a valor inicial de potencial na ordem de 100.4 metros , o valor discretizado de dx e dy ( $\Delta x$  ou  $\Delta y$ ) sendo igual atualmente. O gradiente de potencial M, ao longo de topo AB = 0.0134. Caso a matriz seja de ordem de 14X28, na realidade este retângulo representa no campo uma área de 12 espaços x 25 espaços. Assim os pontos efetivamente se reduzem para 312. Os dois programas geram dados para matriz em questão.

O Programa de Isolinhas.pas o qual deve ser usado subseqüentemente traçara a família dos potenciais que formam uma grade de "quadrados". O termo "quadrados" não significa literalmente quadrados geométricos, mas se formam ângulos iguais de 90 graus com lados iguais medidas no meio da figuras assim formadas. A interseção ortogonal é assegurada, assim as distâncias as meio das figuras se medem  $m=n$ .

Estes programas para Phi.pas e Psi.pas, com ou sem a presença do dreno foram adotados e modificados por Dr. Sarma e Sr. Alex Neyves aperfeiçoa estes programas para introduzir o dreno, no determinado local, com determinada profundidade e largura, com permeabilidades de matriz e do dreno variando de caso a caso.



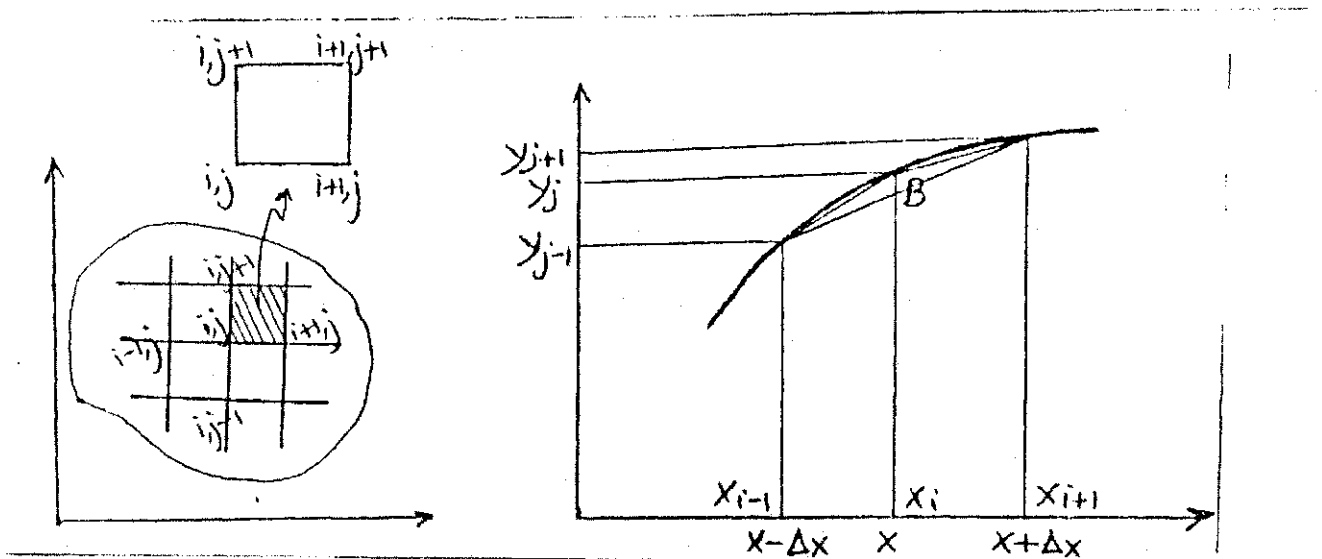


Fig. Esquema de Diferenças Finitas Segundo Bear( 1982).

### Aproximações Implícita, Explícita e Centrais

Para  $\phi = \phi(x)$ , a expansão de serie de Taylor para  $x$  na direção positiva:

$$\phi(x+\partial x) = \phi(x) + \frac{\partial \phi}{\partial x} (\partial x) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \frac{(\partial x)^2}{2!} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \frac{(\partial x)^3}{3!} + \dots + O[(\partial x)^4]$$

onde foi usada a notação  $f(x) = f|_x$ . Esta expressão resultaria em:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi(x+\partial x) - \phi(x)}{\partial x} + O[\partial x]$$

(3)

onde  $O(x)$  representa os demais series.

O primeiro termo do lado direito forma como derivado em ponto x:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi(x+\partial x) - \phi(x)}{\partial x}$$

(4)

O erro no uso deste análogo e de ordem de primeiro termo quando foi truncado,

$$\frac{(\partial x)^2}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$$

(5)

Eq.4 e a aproximação de Método Explícito, usando do derivado de  $\partial \phi / \partial x$ .

Assim, A serie de Taylor sobre x na direção negativa se torna como:

$$\phi(x-\partial x) = \phi(x) - \frac{\partial \phi}{\partial x} (\partial x) + \frac{\partial^2 \phi (\partial x)^2}{2!} - \frac{\partial^3 \phi (\partial x)^3}{3!} + O[(\partial x)^4]$$

(6)

o qual representa a aproximação Implícita de Diferenças.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi(x) - \phi(x-\partial x)}{\partial x}$$

(7)

onde o erro de truncamento é:

$$O[(\partial x)].$$

(8)

Subtraindo um de outro, o análogo de Diferenças Centrais é obtido. Para obter os derivados de segunda ordem, soma-se as duas expressões  $\phi(x+\partial x)$  e  $\phi(x-\partial x)$

a fim de obter a expressão como é na Eq.(9) com o erro de truncção,  $O(\partial x)^2$

$$\phi(x+\partial x) + \phi(x-\partial x) = 2\phi(x) + 2 \frac{\partial^2 \phi (\partial x)^2}{\partial x^2 2!} + O[(\partial x)^4]$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\phi(x+\partial x) - 2\phi(x) + \phi(x-\partial x)}{(\partial x)^2} =$$

$$= \frac{\phi(i+1,j) - 2\phi(i,j) + \phi(i-1,j)}{(\partial x)^2}$$

(9)

Aplicando uma análise semelhante para direção y, obtermos :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\phi(y+\partial y) - 2\phi(y) + \phi(y-\partial y)}{(\partial y)^2} =$$

$$= \frac{\phi(i,j+1) - 2\phi(i,j) + \phi(i,j-1)}{(\partial y)^2}$$

(10)

Estas duas aproximações da Eq. de Laplace,  $\partial^2 \phi / \partial x^2$

$+ \partial^2 \phi / \partial y^2 = 0$ , que descrevam o fluxo no meio homogêneo e isotropico, o análogo numérico foi usado, com simulação das Diferenças Finitas, com  $\Delta x = \Delta x$  para todos os espaços para todos os i, e  $\Delta y = \Delta y$  para todos os j

Assim,

$$\frac{\phi(i+1,j) - 2\phi(i,j) + \phi(i-1,j)}{(\Delta x)^2} + \frac{\phi(i,j+1) - 2\phi(i,j) + \phi(i,j-1)}{(\Delta y)^2} = 0 \quad (11)$$

Para  $\Delta x = \Delta y$ , teremos:

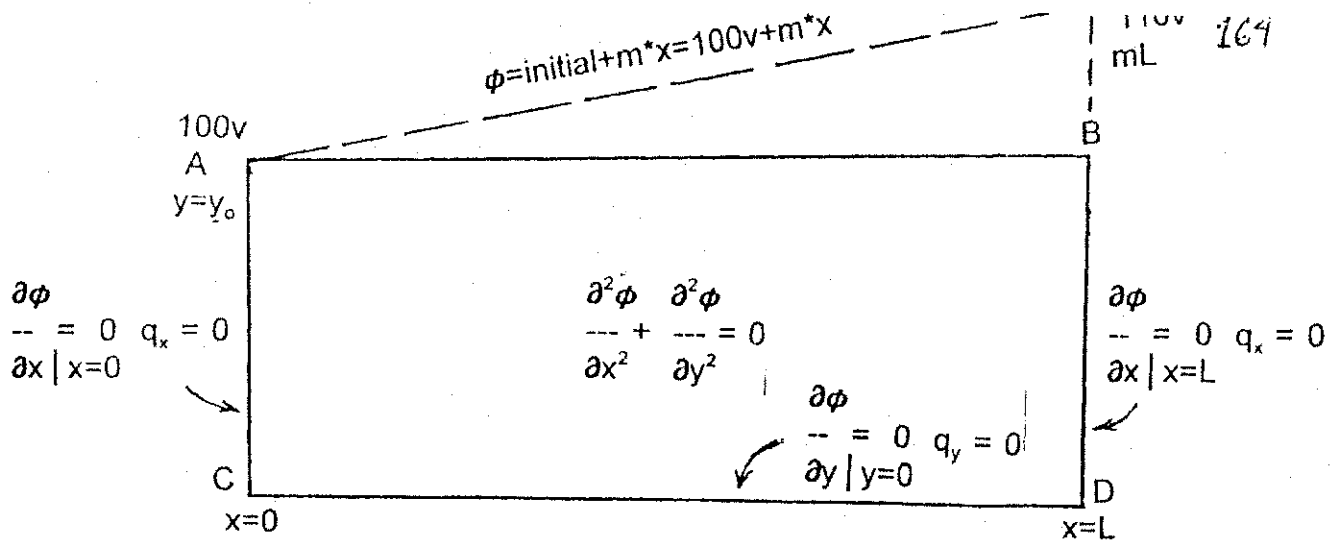
$$\phi(i,j) = \frac{\phi(i+1,j) + \phi(i-1,j) + \phi(i,j+1) + \phi(i,j-1)}{4} \quad (12)$$

**Fig. . Modelo Matemático para Estudar os Drenos Interceptores**

No atual estudo,  $L = 75\text{m}$  e  $m = 0.0134$  metro/metro.

As condições de contorno serão:

No Topo:	$\phi(x, y^0) = y^0 + m \cdot x = \text{Initial} + m \cdot x$	$0 \leq x \leq L$	
No Fundo:	$\partial\phi/\partial y$ (at $y=0$ ) = 0	$0 \leq x \leq L$	
No Lado Esquerdo:	$\partial\phi/\partial x$ (at $x=0$ ) = 0	$0 \leq y \leq y^0$	
No Lado Direito:	$\partial\phi/\partial x$ (at $x=L$ ) = 0	$0 \leq y \leq y^0$	(13)



O potencial ou carga hidráulica a (i,j) eh  $\phi(i,j)$ . Ao longo da linhas

$y=y_0$ , o perfil do potencial tem valore sucessivos de:

$$\phi(i-1,j), \phi(i,j), \text{ and } \phi(i+1,j).$$

i->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
J=1	1,1	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1	13,1
J=2	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2
J=3	1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3
J=4	1,4	2,4	3,4	4,4	5,4	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4	13,4
J=5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5
J=6	1,6	2,6	3,6	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6	13,6
J=7	1,7	2,7	3,7	4,7	5,7	6,7	7,7	8,7	9,7	10,7	11,7	12,7	13,7

Fig.4 Arranjo e Nós nas duas direções i e j para o domínio retangular escolhido

ESQUEMA BÁSICO DE DIFERENCAS FINITAS

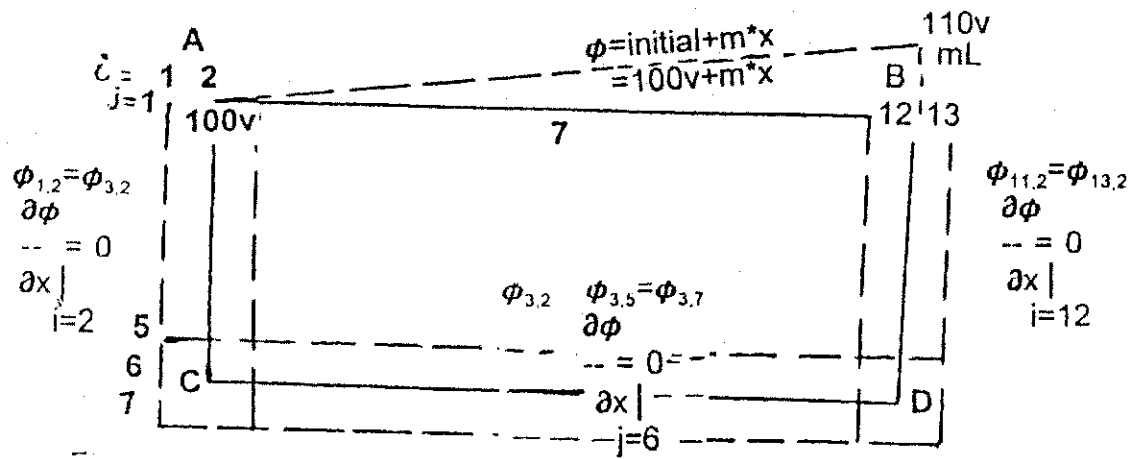
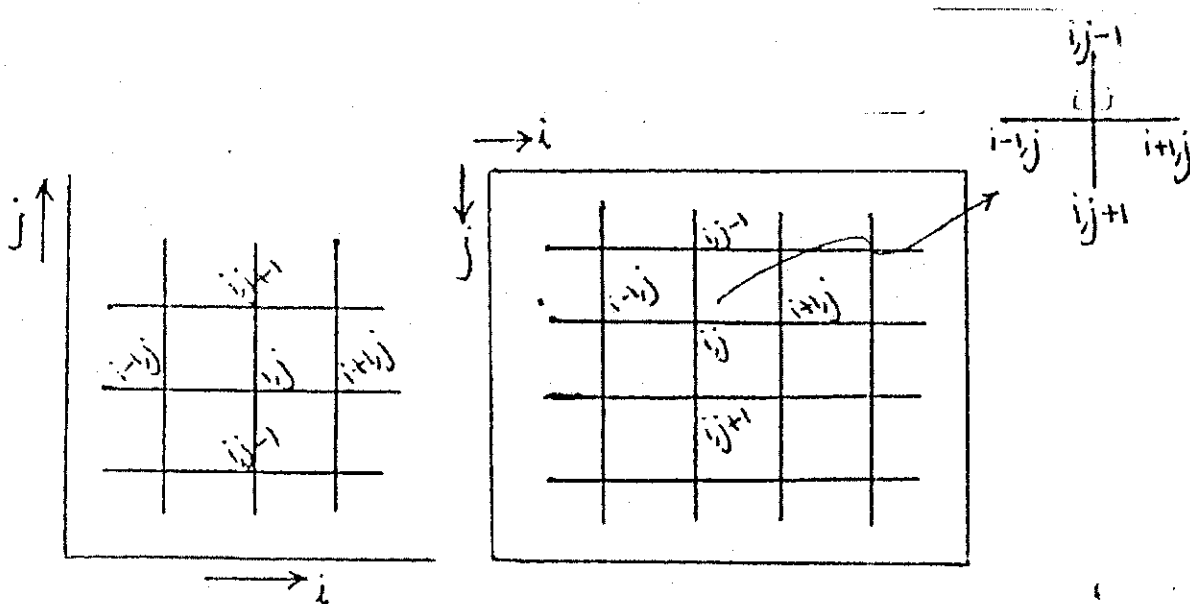


Fig. Convenção Adotada para Molécula de 5-Pontos



**Fig. 5: Domínio Retangular mostrando Nos Fictícios que representam Margens Impermeáveis**

Referente as Figuras (4 e 5), da para definir os potenciais em todos os pontos de domínio do retângulo em questão:

C=13	R=7	R=7	
Ao longo do fundo DC	Ao longo de Lado AD	Ao longo do Lado BC	

For I= 2 to C or = 2 to 13	For J= 1 to R-1 or = 1 to 6	For J= 1 to R-1 or = 1 to 6	
Phi(I,R)=Phi(I,R-2)	Phi(I,J)=Phi(3,J)	Phi(C,J)=Phi(C-2,J)	
=====	=====	=====	===== Phi(1,1)=Phi(3,1)      Phi(13,1)=Phi(11,1)
Phi(2,7)=Phi(2,5)	Phi(1,2)=Phi(3,2)	Phi(13,2)=Phi(11,2)	
Phi(3,7)=Phi(3,5)	Phi(1,3)=Phi(3,3)	Phi(13,3)=Phi(11,3)	
Phi(4,7)=Phi(4,5)	Phi(1,4)=Phi(3,4)	Phi(13,4)=Phi(11,4)	
Phi(5,7)=Phi(5,5)	Phi(1,5)=Phi(3,5)	Phi(13,5)=Phi(11,5)	
Phi(6,7)=Phi(6,5)	Phi(1,6)=Phi(3,6)	Phi(13,6)=Phi(11,6)	
Phi(7,7)=Phi(7,5)			
Phi(8,7)=Phi(8,5)	Phi(2,i) e Phi(12,i) sao feitos impermeaveis		
Phi(9,7)=Phi(9,5)	A condicao de Dirichlet foi imposto no Topo		
Phi(10,7)=Phi(10,5)	AB do Retangulo		
Phi(11,7)=Phi(11,5)			
Phi(12,7)=Phi(12,5)			
=====			

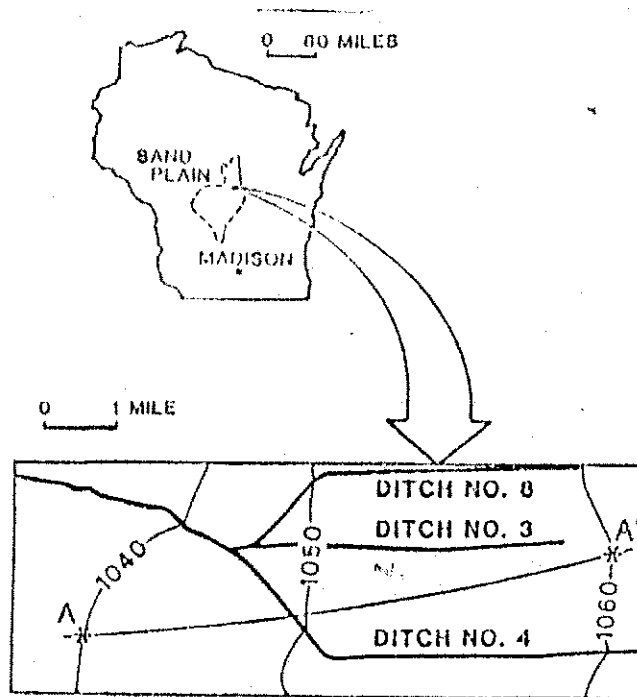
Phi(1,1)= Inicial + m*Δ x *(I-2)
Phi(1,1)= 100.4 + 3 * 0.0134* (I-2)
Phi(2,1)= 100.4+ 3*0.0134*(2-2) = 100.4000 m
Phi(3,1)= 100.4+ 3*0.0134*(3-2) = 100.4402 m
Phi(4,1)= 100.4+ 3*0.0134*(4-2) = 100.4804 m
Phi(5,1)= 100.4+ 3*0.0134*(5-2) = 100.5206 m
Phi(6,1)= 100.4+ 3*0.0134*(6-2) = 100.5608 m
Phi(7,1)= 100.4+ 3*0.0134*(7-2) = 100.6010 m
Phi(8,1)= 100.4+ 3*0.0134*(8-2) = 100.6412 m
Phi(9,1)= 100.4+ 3*0.0134*(9-2) = 100.6814 m
Phi(10,1)=100.4+3*0.0134*(10-2) = 100.6814 m
Phi(11,1)=100.4+3*0.0134*(11-2) = 100.7216 m
Phi(12,1)=100.4+3*0.0134*(12-2) = 100.8020 m

ANEXOS VII  
FIGURAS



# PLANICE CENTRAL DE WISCONSIN

## LUTHIN, 1973



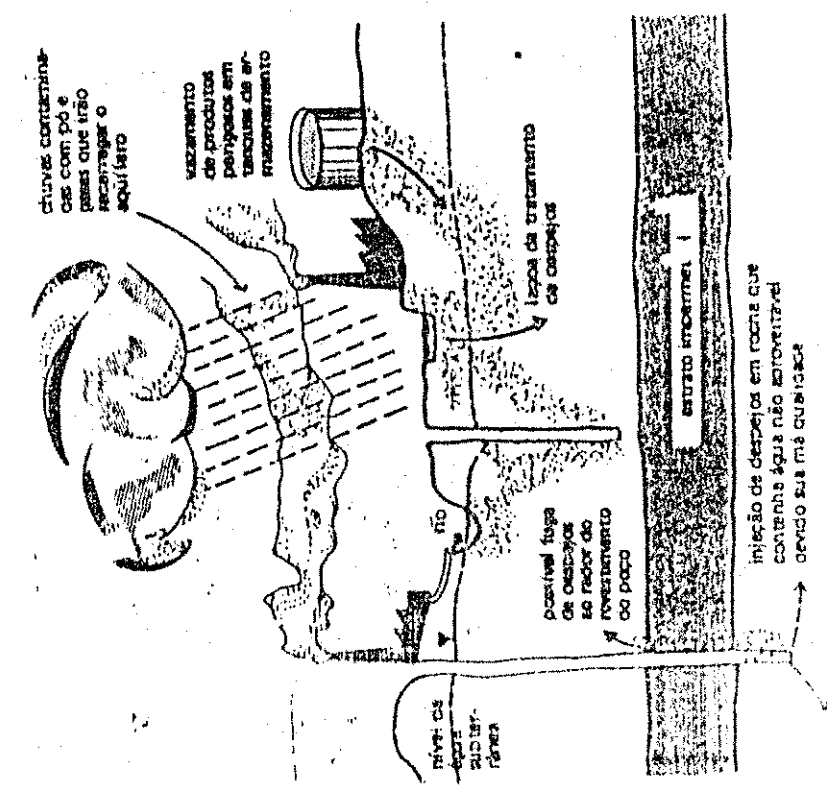
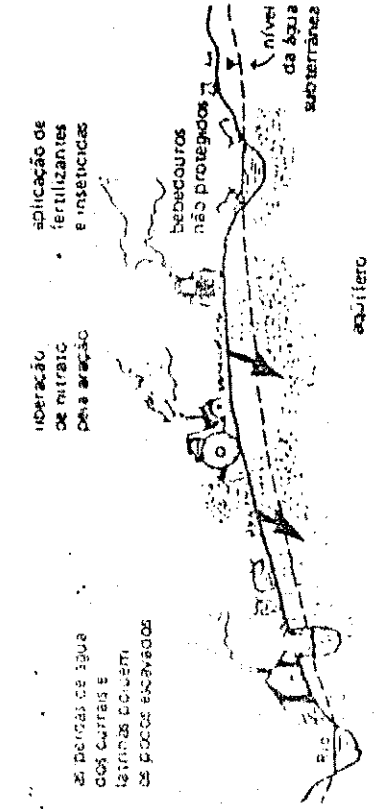
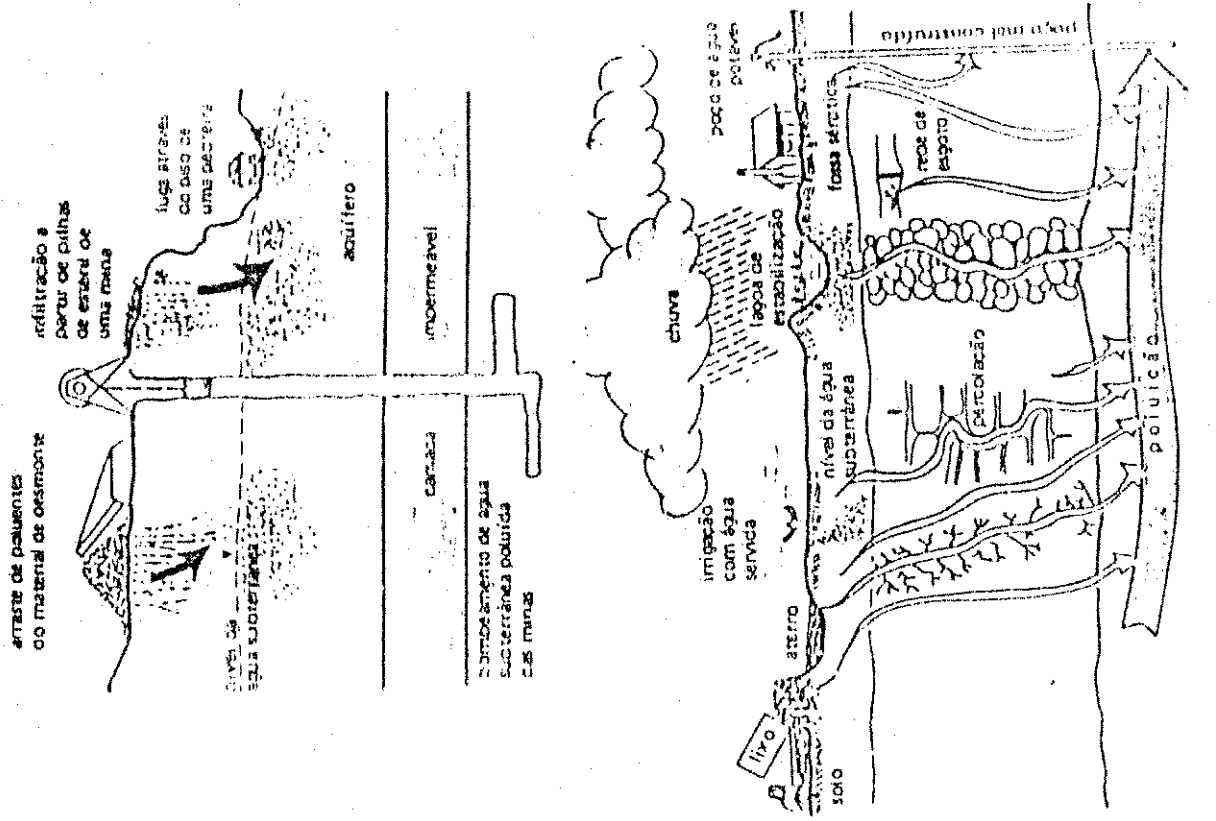


Fig. 1. As Principais Fontes de Contaminação

# NÍVEL DA ÁREA SUMÉ-PB

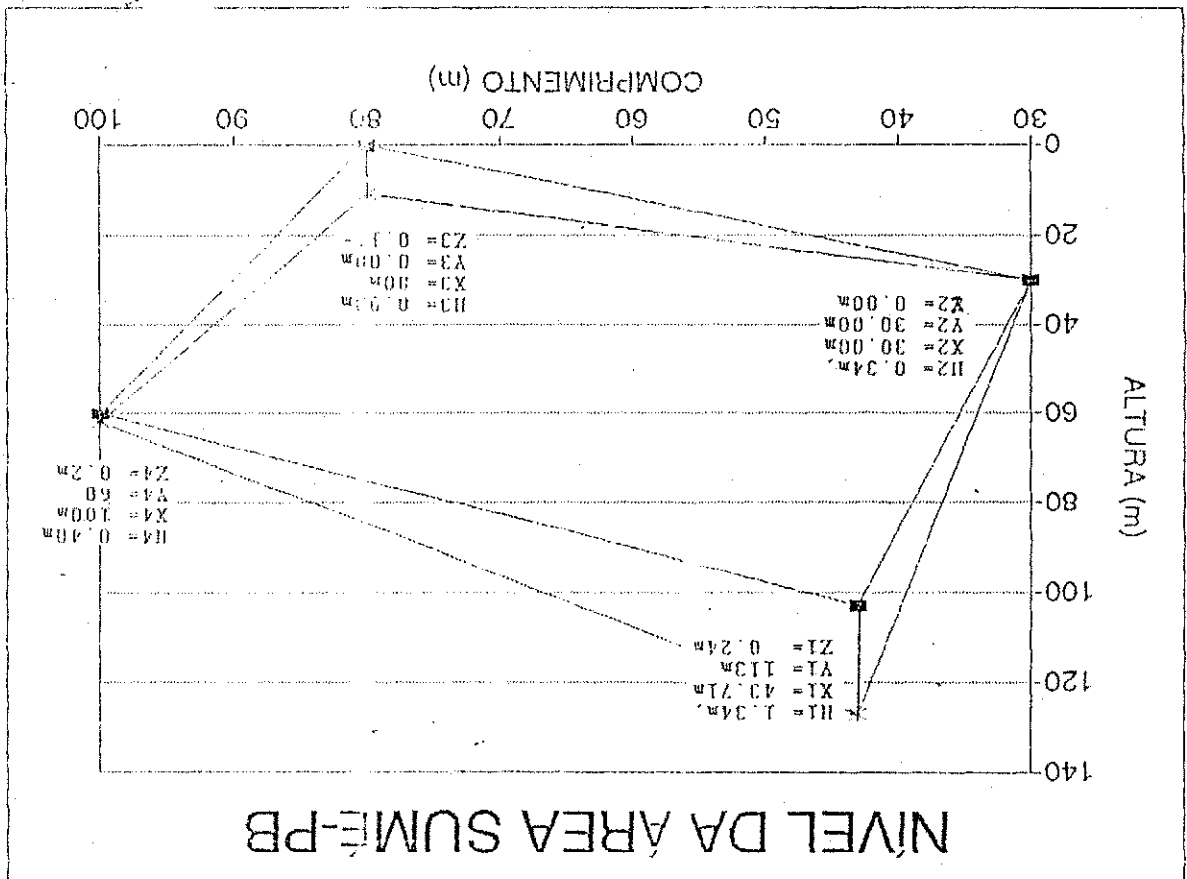


Fig. 2 - Área de estudo em Sumé mostrando a extensão da mesma e as coordenadas X, Y, Z e H para as quatro esquinas

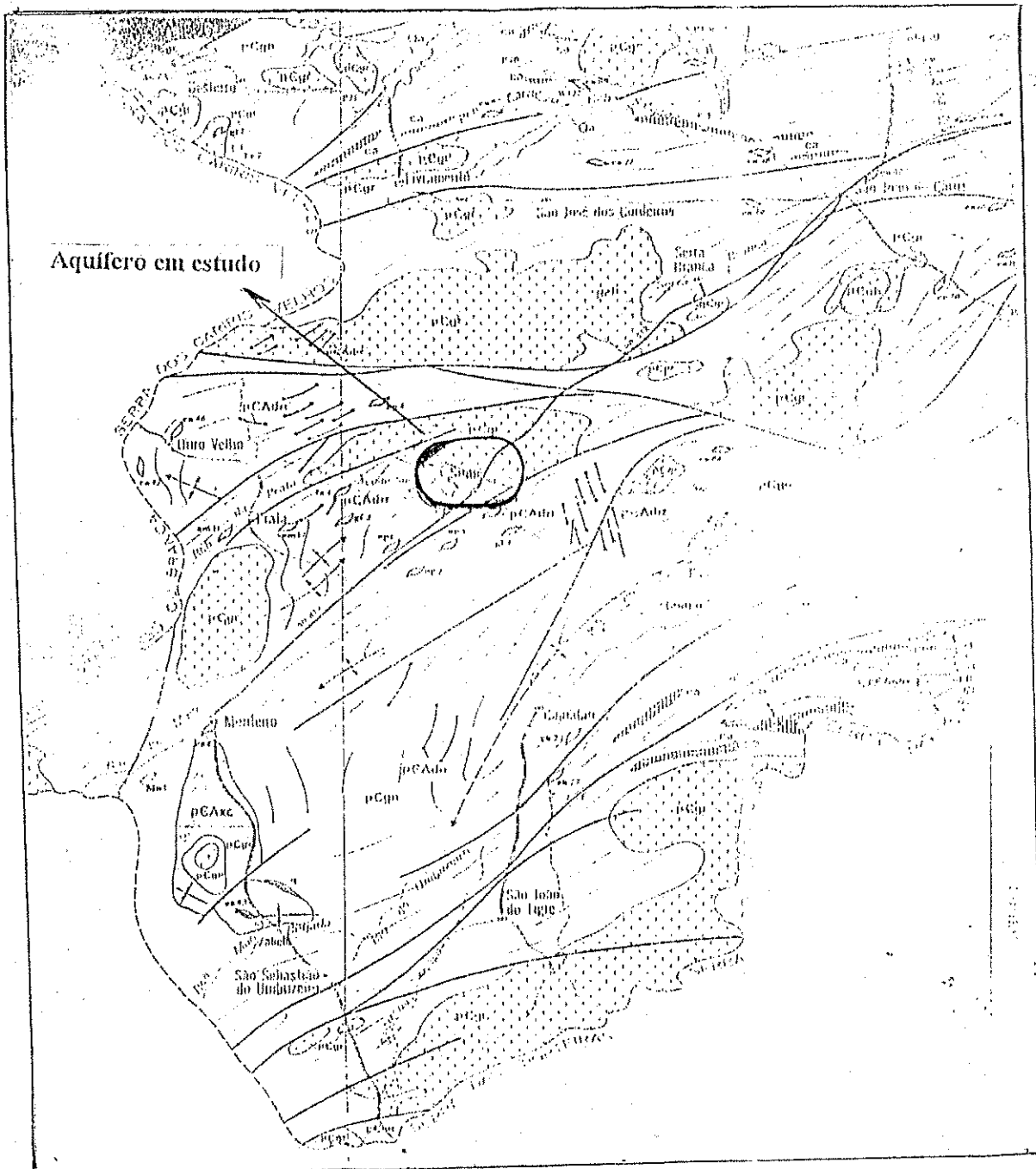
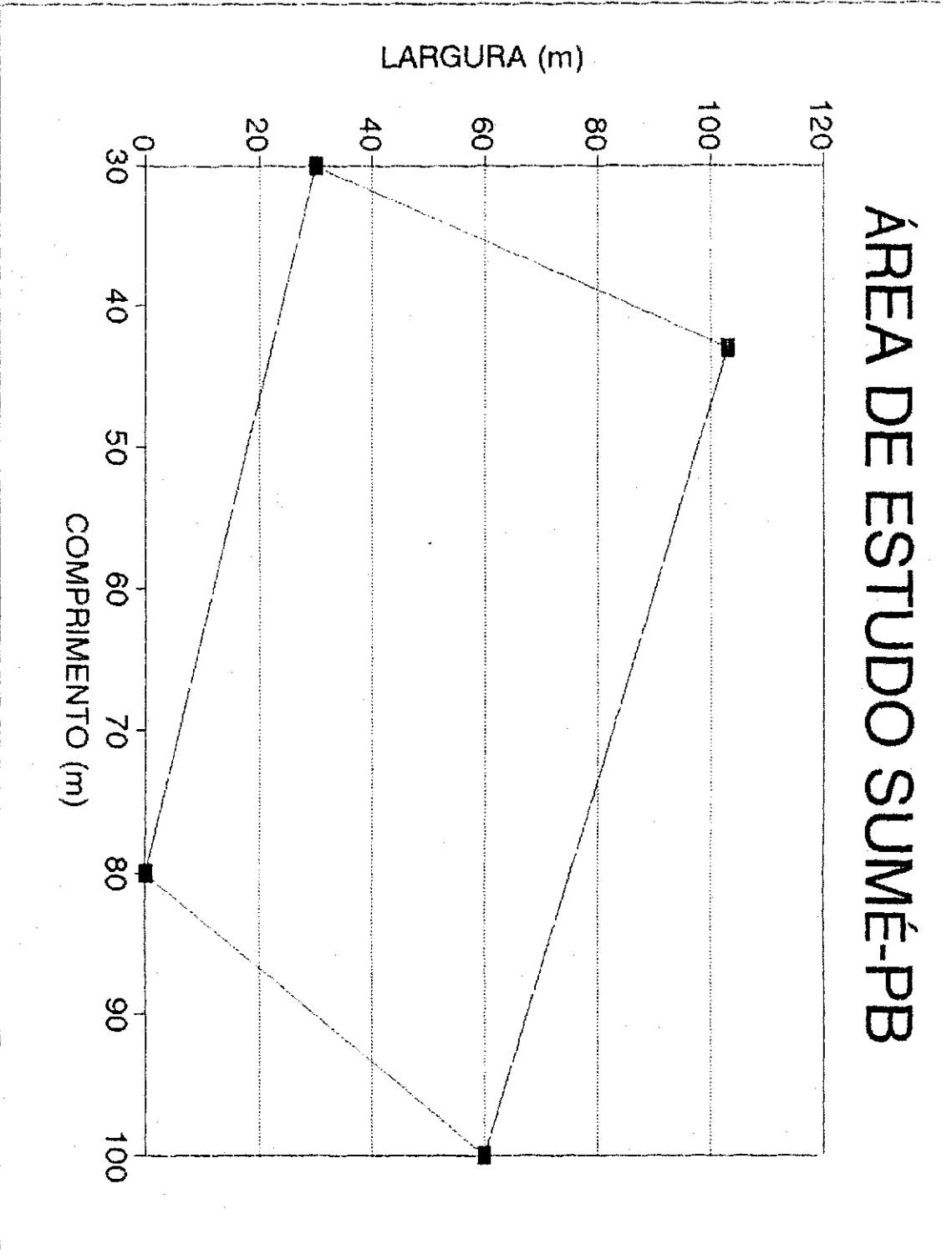


Fig. 3 - Mapa de Sumé na escala 1:500.000 (1982) - Mapa Geológico

Fig. 4



Estado da Paraíba —

Bacias Fluviais

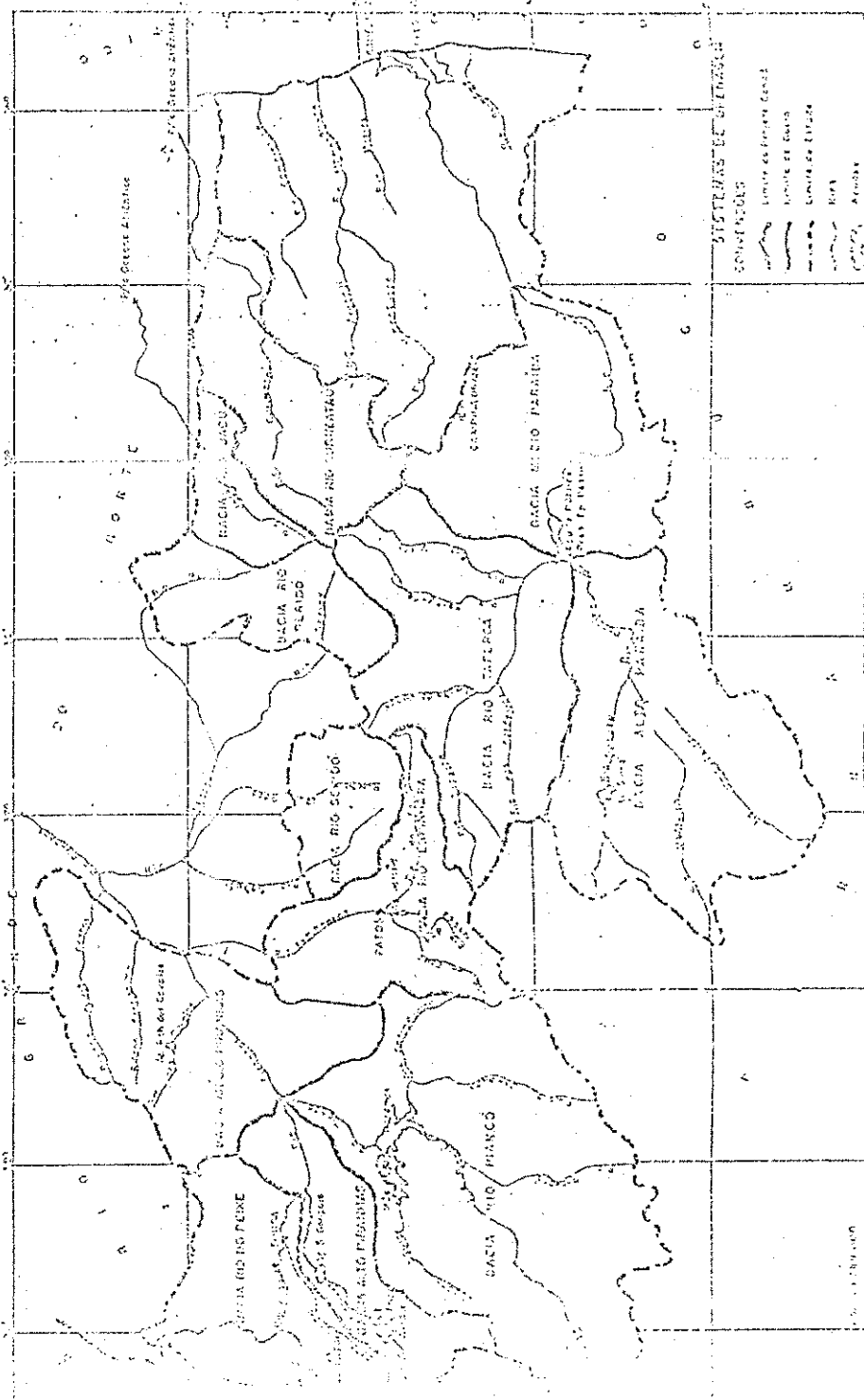


Fig. 5 BACIAS FLUVIAIS DO ESTADO DA PARAÍBA

## POSTO SUMÉ-PB

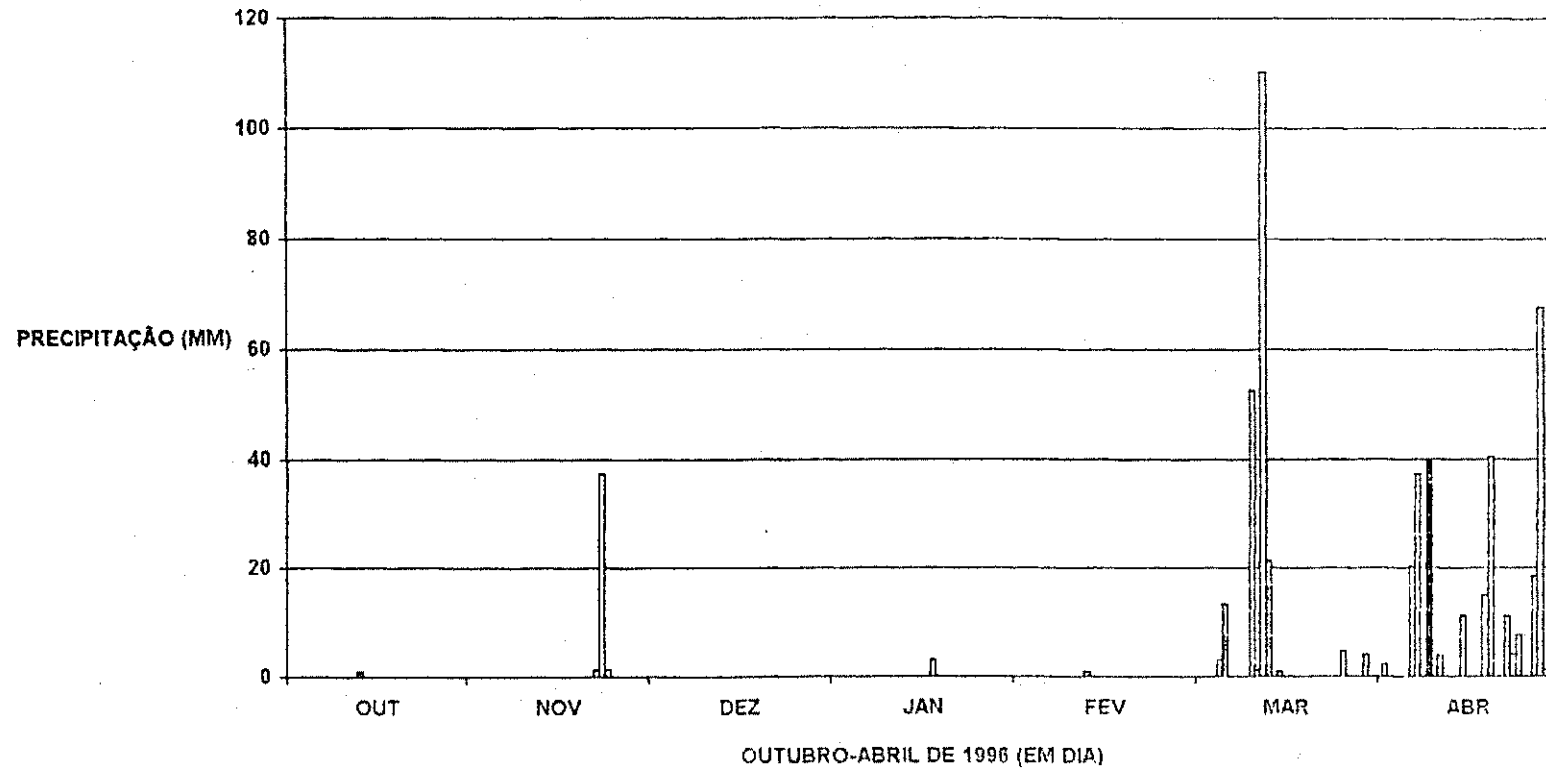


Fig. 6 - As precipitações registradas durante os meses de Outubro de 1995 à Abril no posto Sumé, PB

# POSTO SUMÉ-PB

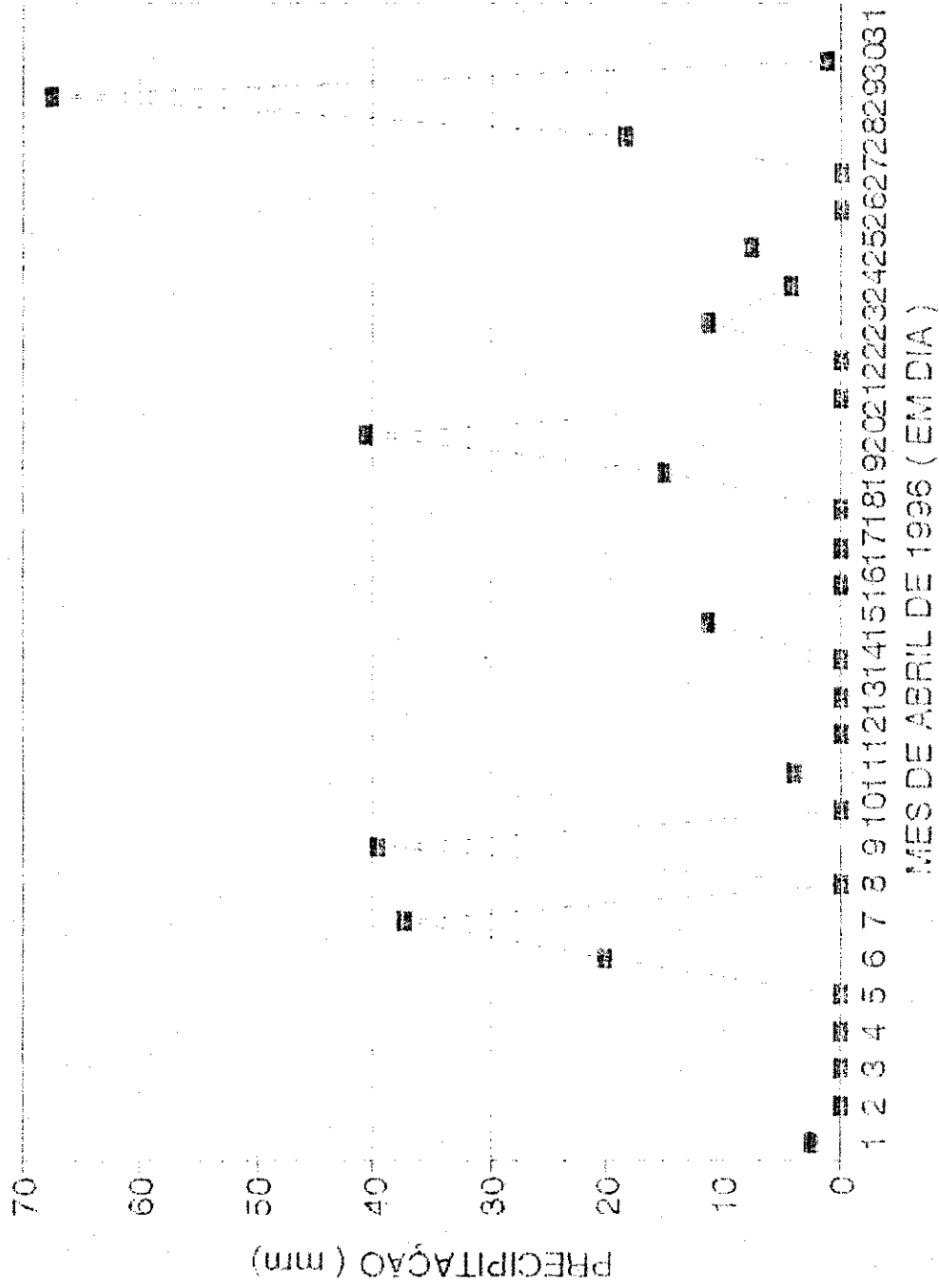


Fig. 8 - As precipitações registradas durante o mês Abril



Fig. 10 - Comportamento do Lençol Freático ao longo do tempo de 05/03 à 03/05

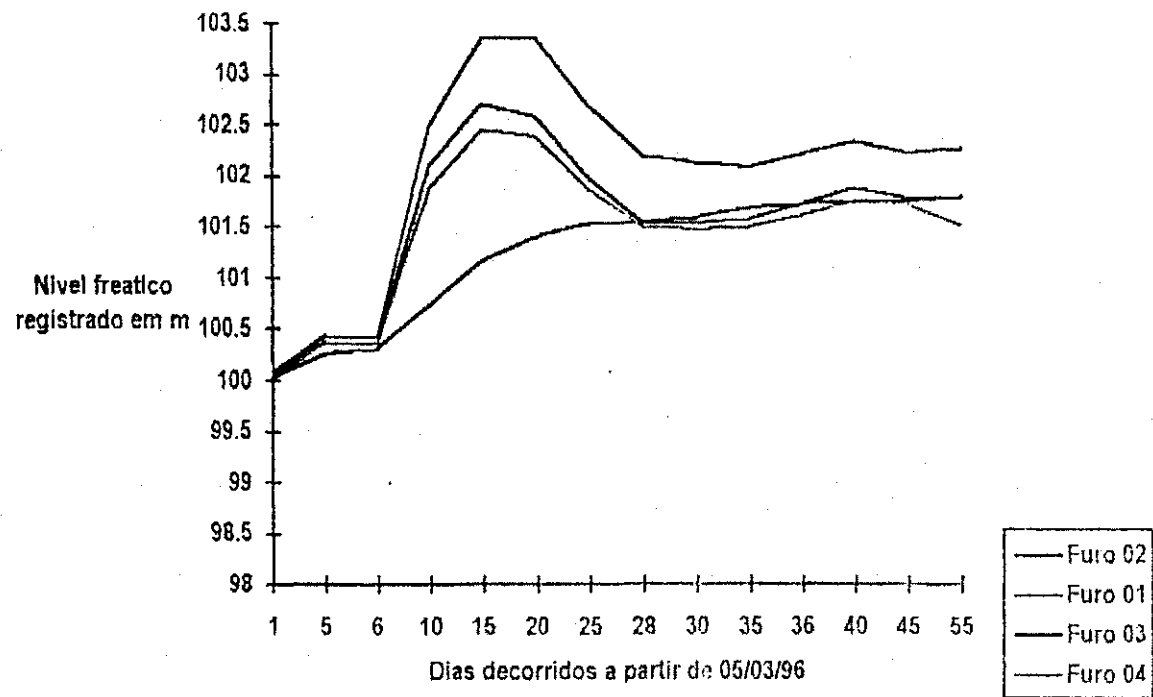
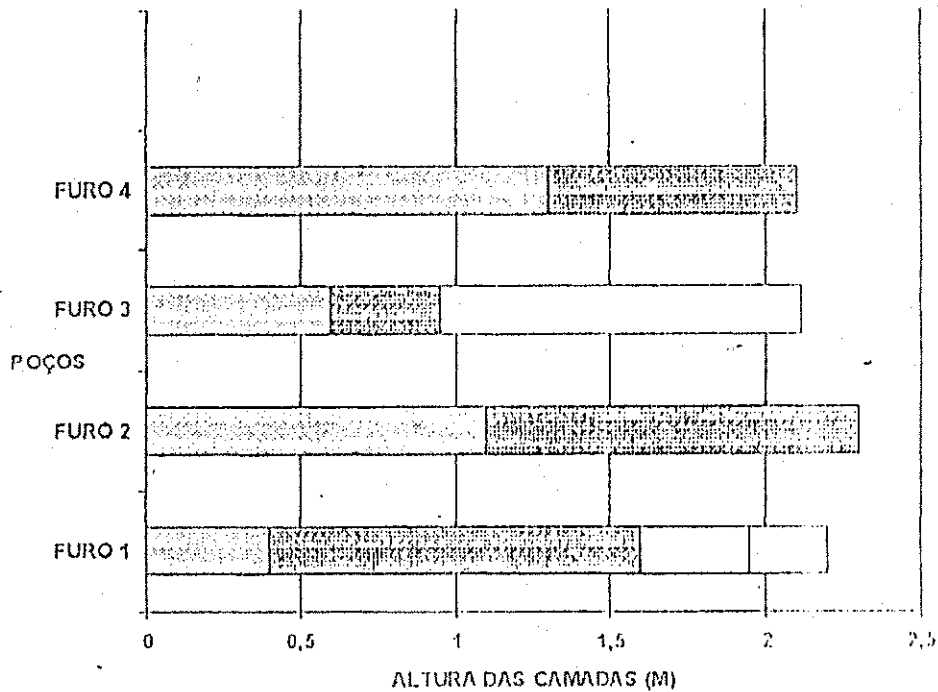


Fig. 9 - A Litologia do solo nos quatro furos feito na área de estudo



### LITOLOGIA DOS QUATRO FUROS

	FURO 1	FURO 2	FURO 3	FURO 4
	0.40m	1.1m	0.60m	1.30m
	1.20m	1.2m	0.35m	0.80m
	0.35m	ROCHA	1.17m	ROCHA
	0.25m		ROCHA	
	ROCHA			

**Figura 11 - Litologia dos Furos ( 1 a 4 ), Mostrando as Camadas de Solo Diferentes Encontradas**

LOTOLÓGIA DOS FUIROS (1 a 4)

FURO 1	FURO 2	FURO 3	FURO 4
A	D	A	A
B	B	C	B
C	-	B	-
B	-	-	-

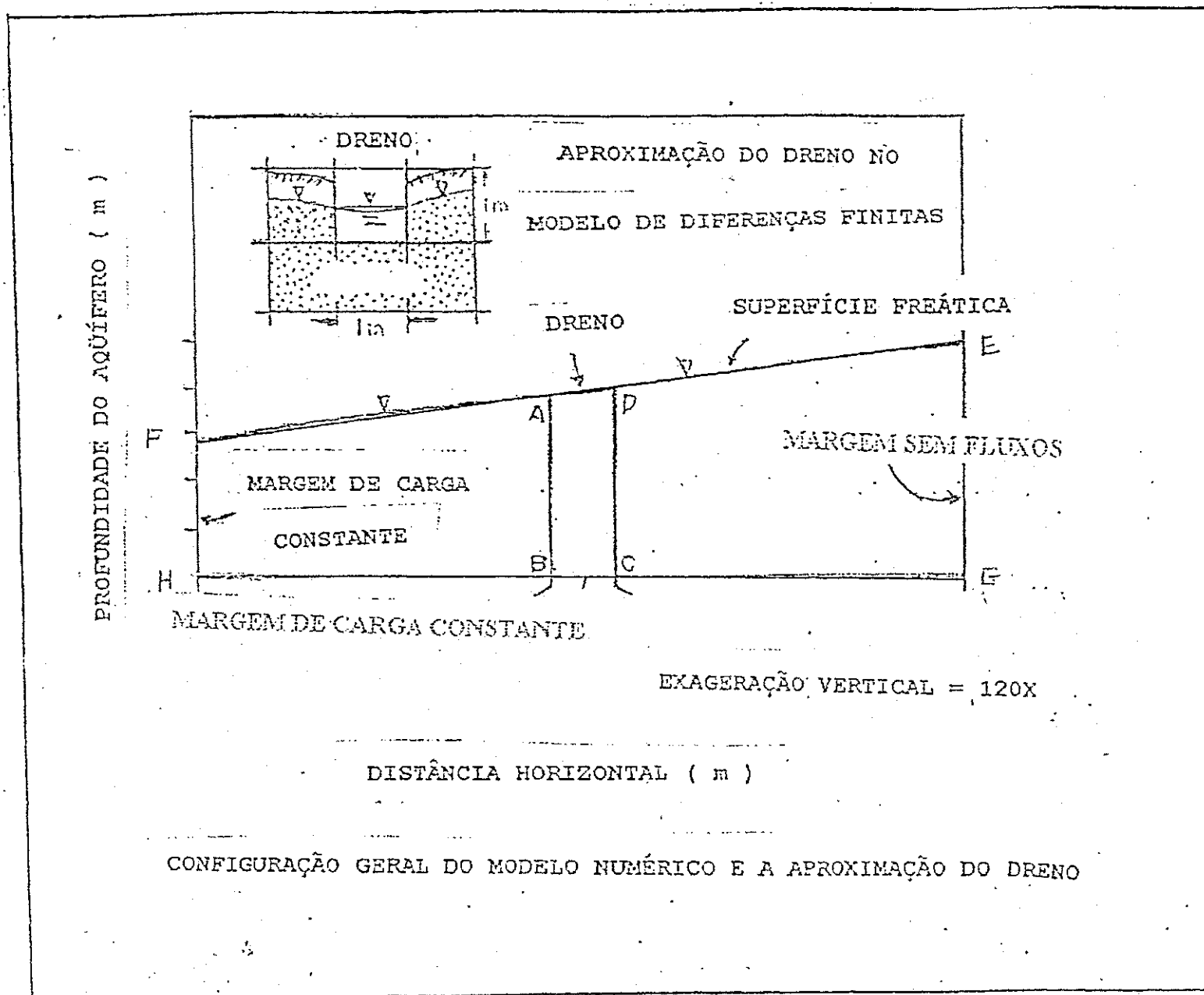
ROCHA SÃ

Comentários: Rocha Sã, A = Argila Arenosa, B = Argila, C = Argila, D = Argila + Pedregulho

**Tabela 12-b - Mostrando os dias das Visitas e os Níveis Freáticos Registrados bem como a Chuva Acumulada ( mm )**

Poços	2	1	3	4	
NIVEIS DA BASE	100	100.24	100.15	100.2	
NIVEIS DO TERRENO	102.3	102.34	102.27	102.30	
Dias de Ensaio no Campo:	Chuva Acumulada (mm)				
MES DE MARÇO DE 1996					
Dia 5/3	100.08	100.04	100.035	100.04	16.6
11/3	100.43	100.36	100.31	100.36	53.8
15/3	102.5		102.1	101.79	101.88 131.6
MES DE ABRIL DE 1996					
3/4	102.2	101.84	101.56	101.51	11.4
11/4	102.22	102.02	101.72	101.61	97.0
22/4	102.23	101.94	101.76	101.71	66,8
3/5	102.28	102.18	101.80	101.52	107

FIG. 3.A - Aproximação do Dreno no Modelo de Diferença Finita



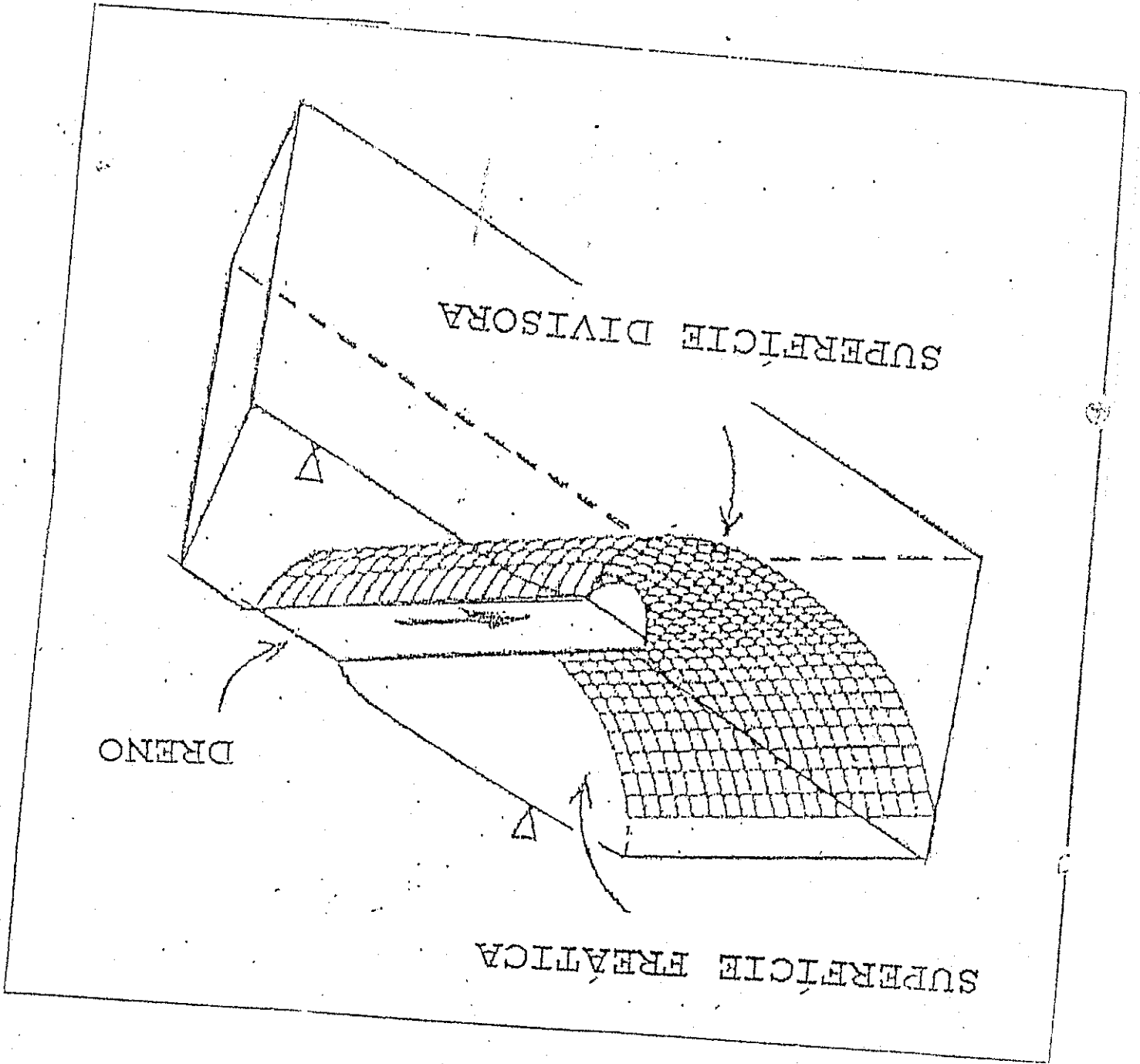
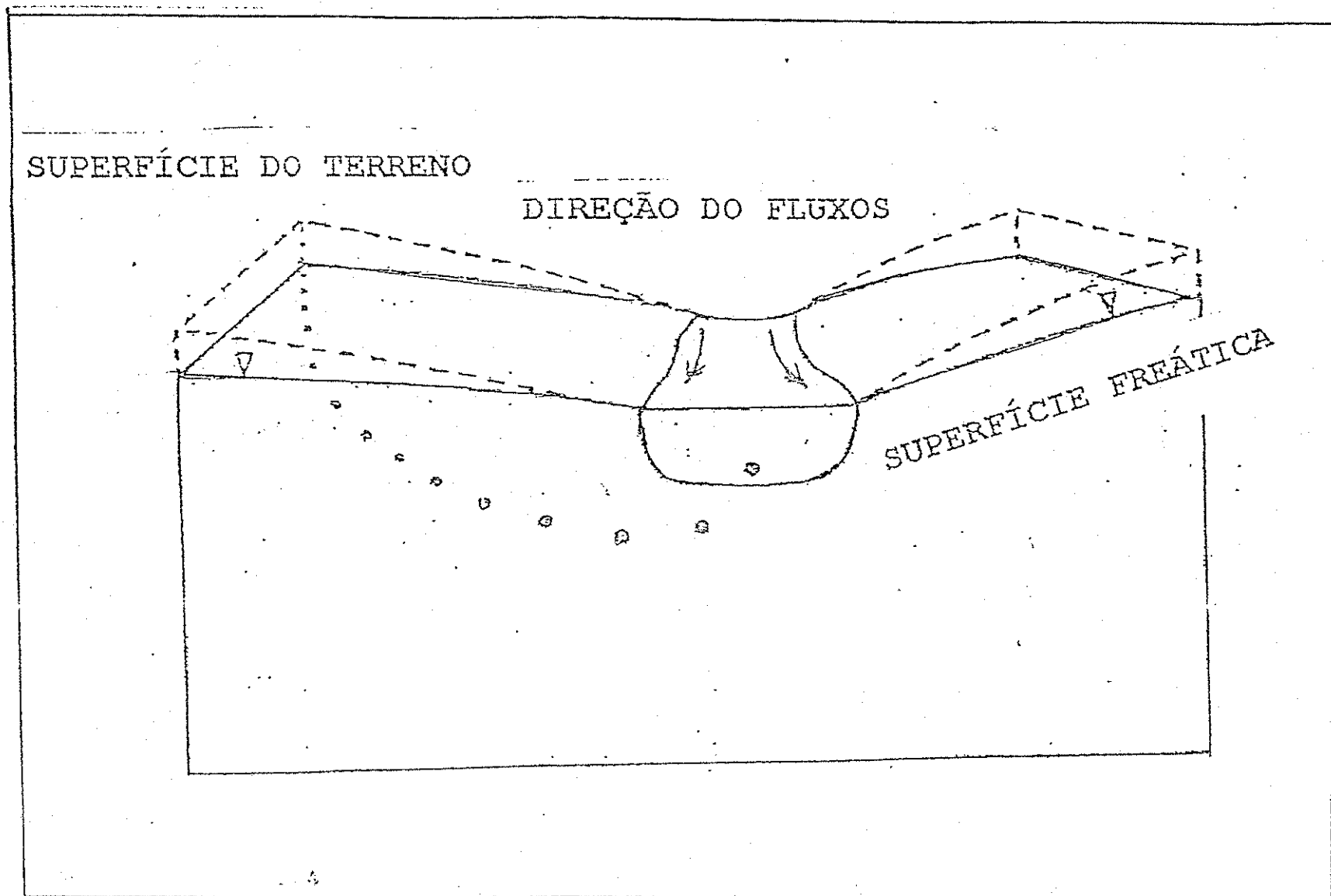
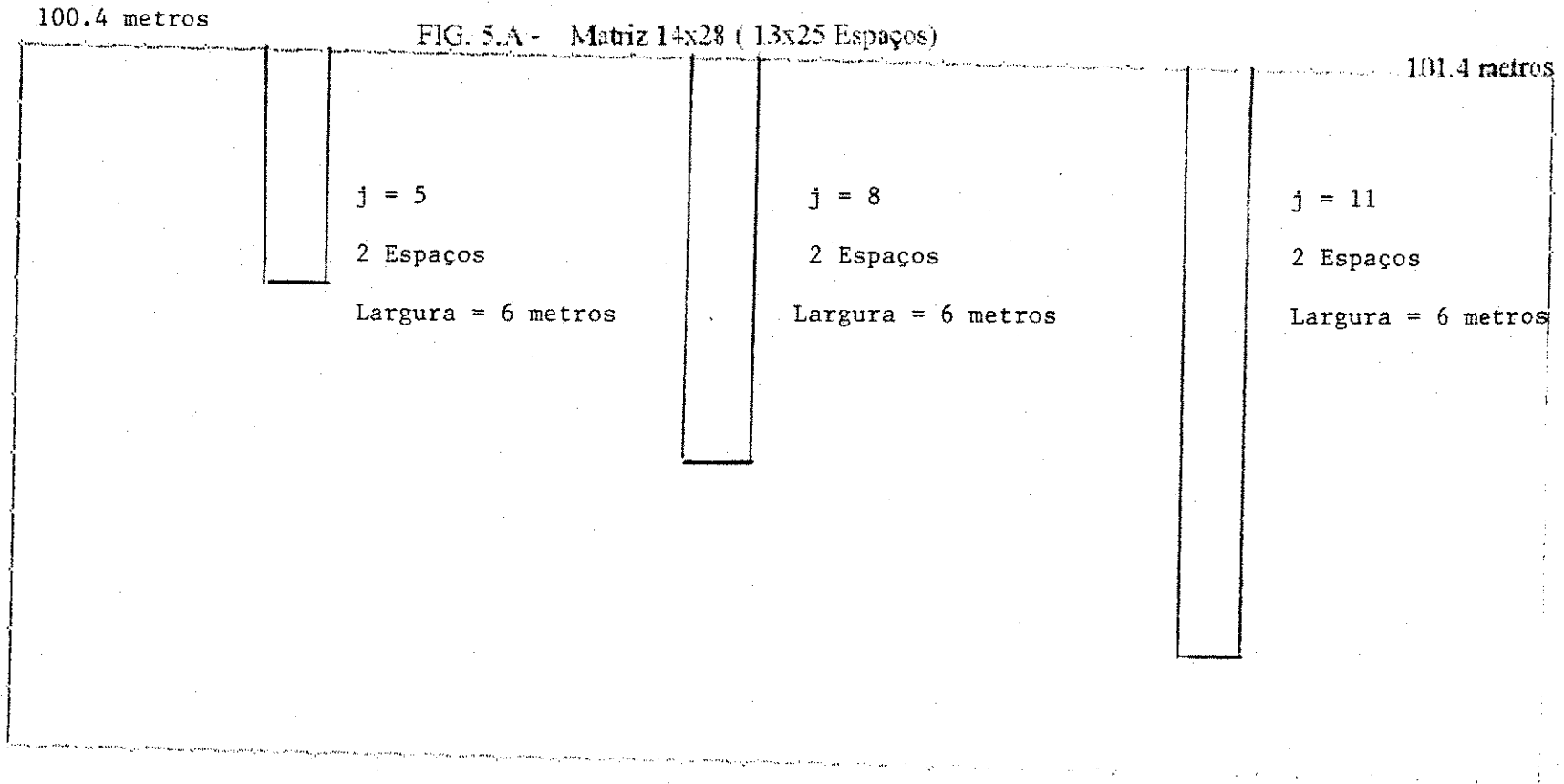


FIG. 3 B - Rede de Superfície Divisora

FIG. 3 C - Sistema de Fluxo em Três Dimensões

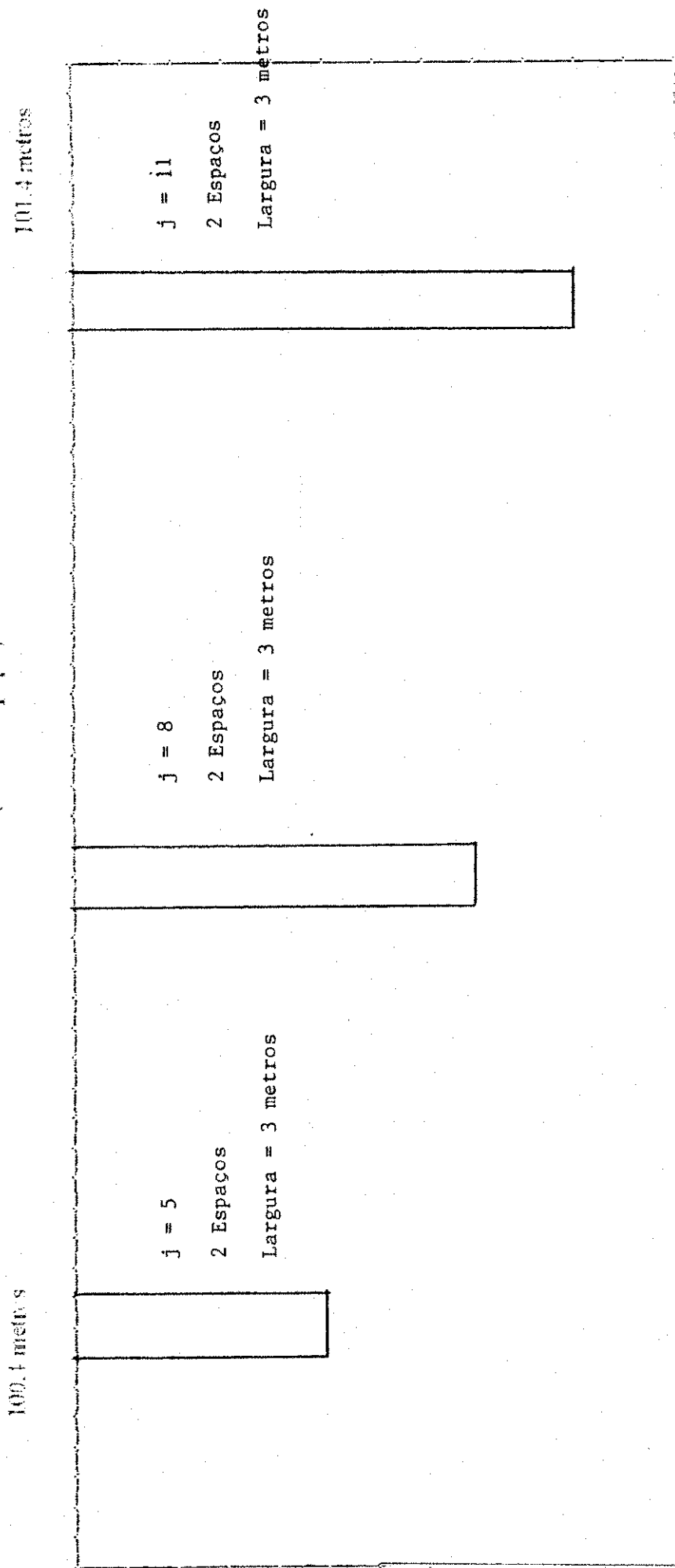


ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO



# 8 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

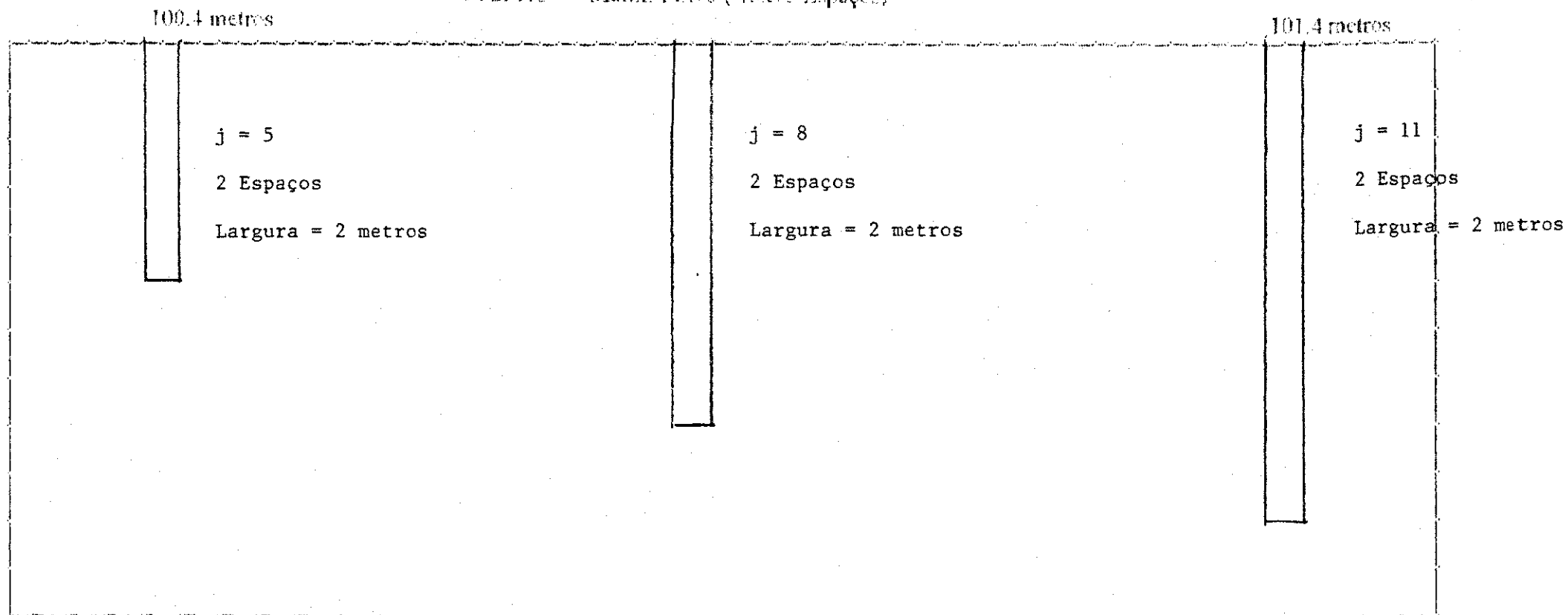
FIG. 5.B - Matriz 14x53 (13x50 Espaços)





ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.C - Matriz 14x78 (13x75 Espaços)

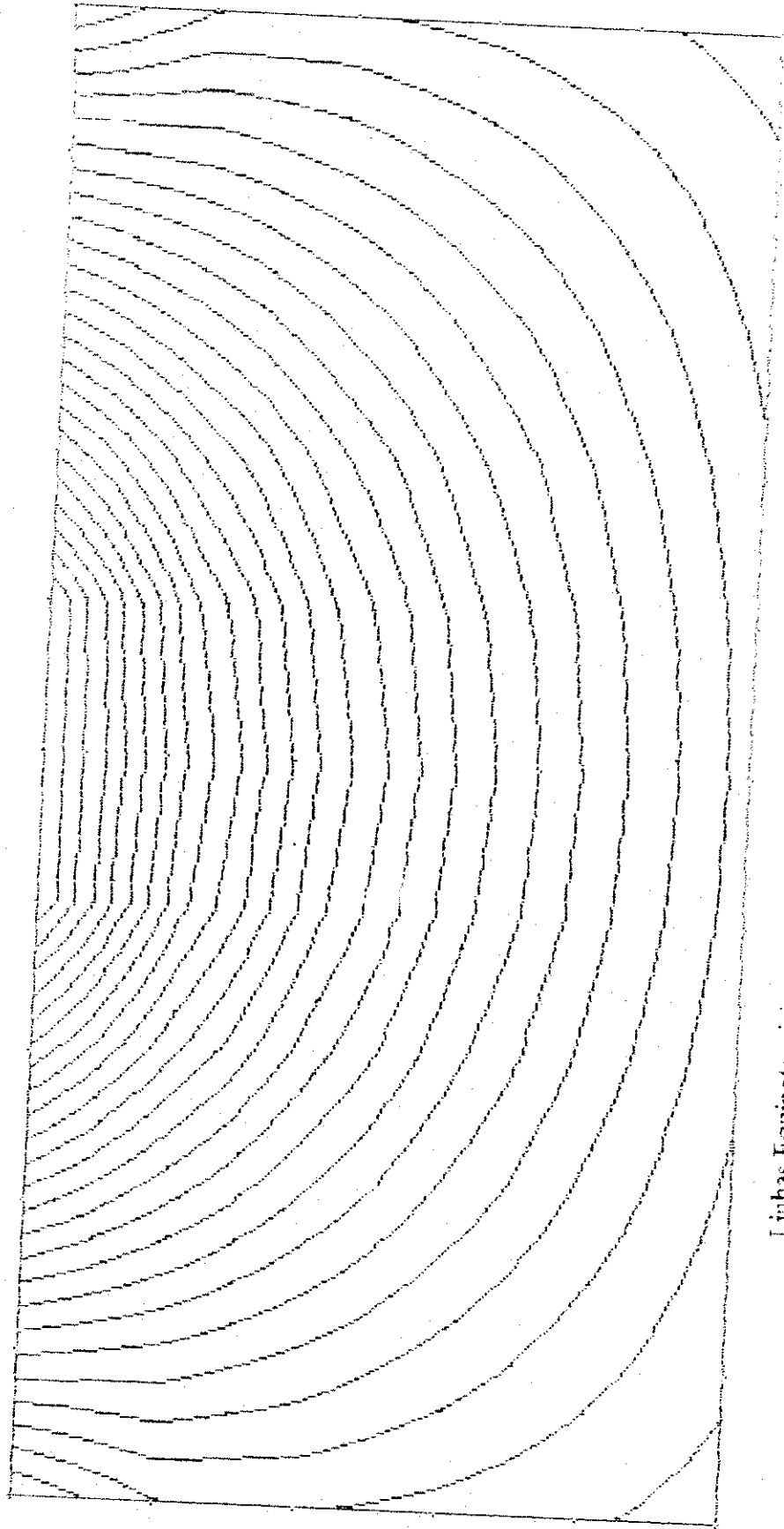


ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

100.4 metros

FIG. 5.D - As Linhas de Equipotenciais no Meio Homogêneo sem Efeito do Diâmetro

101.4 metros



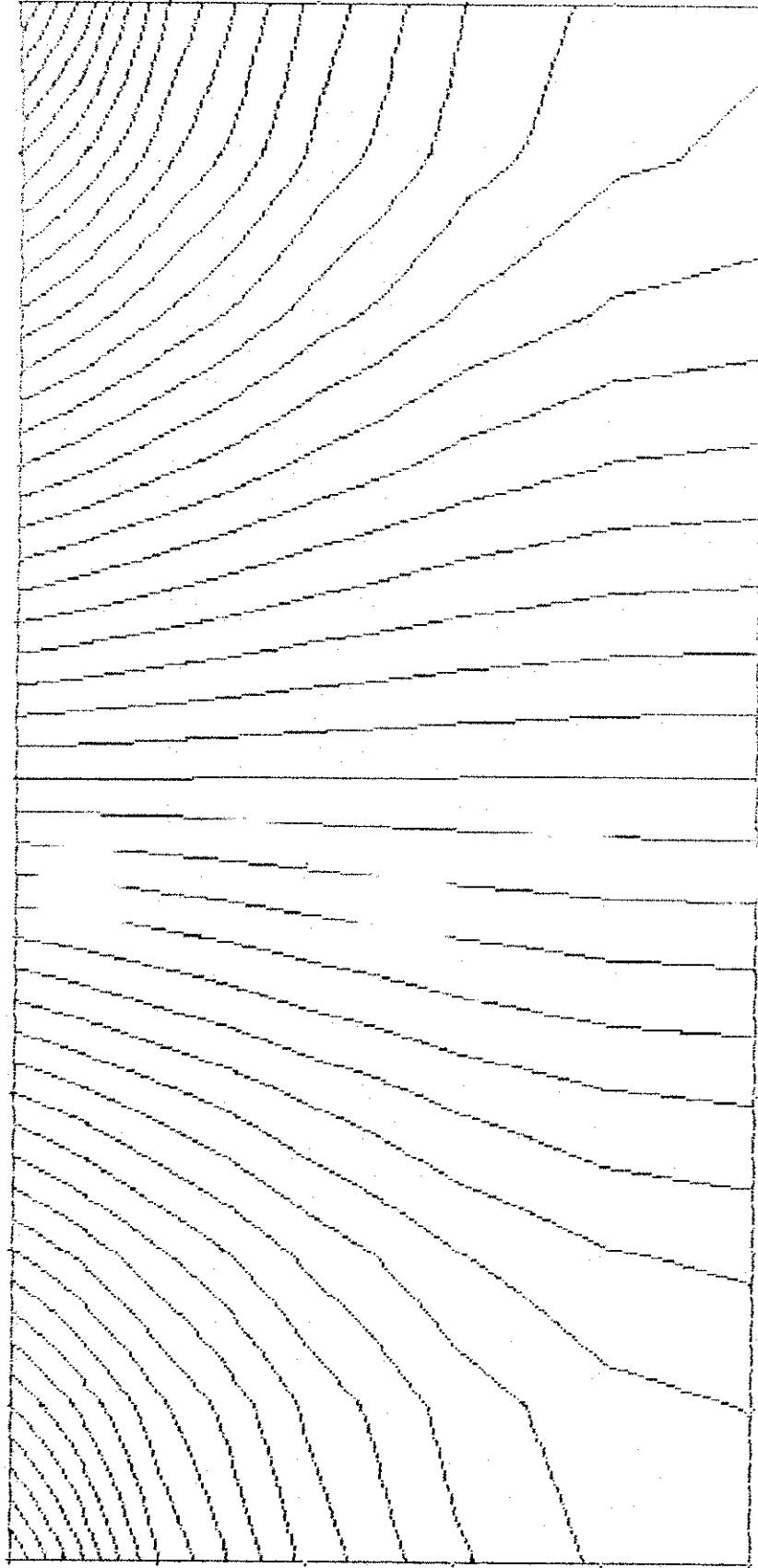
Linhas Equipotenciais  
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x28 ( 13x25 Espaços)

0.2 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.2 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.E - As Linhas de Fluxo no Meio Homogêneo sem Efeito do Diâmetro

101.4 metros

100.4 metros



Linhas de Fluxo

$K_{matriz} = 1.0$

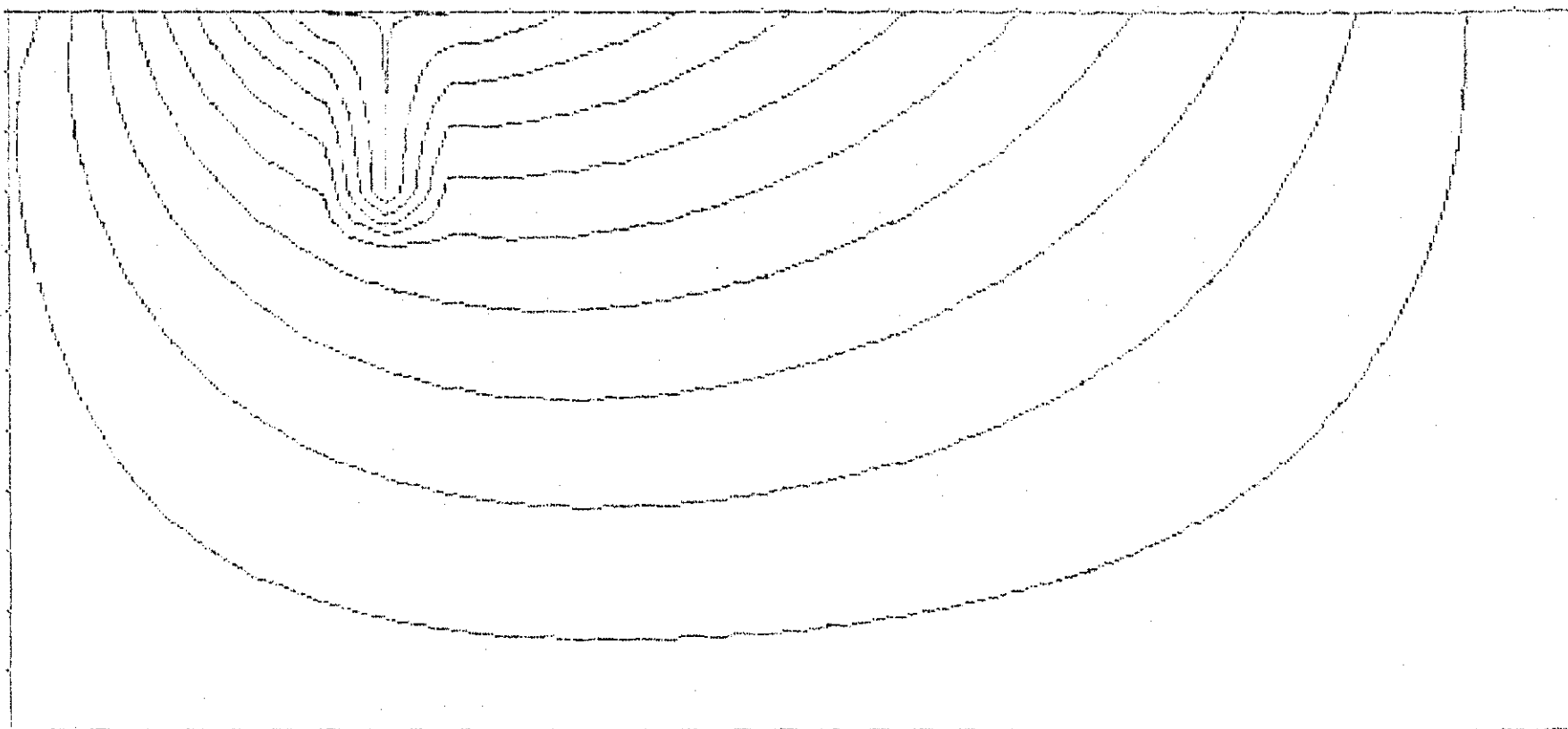
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.F.1 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

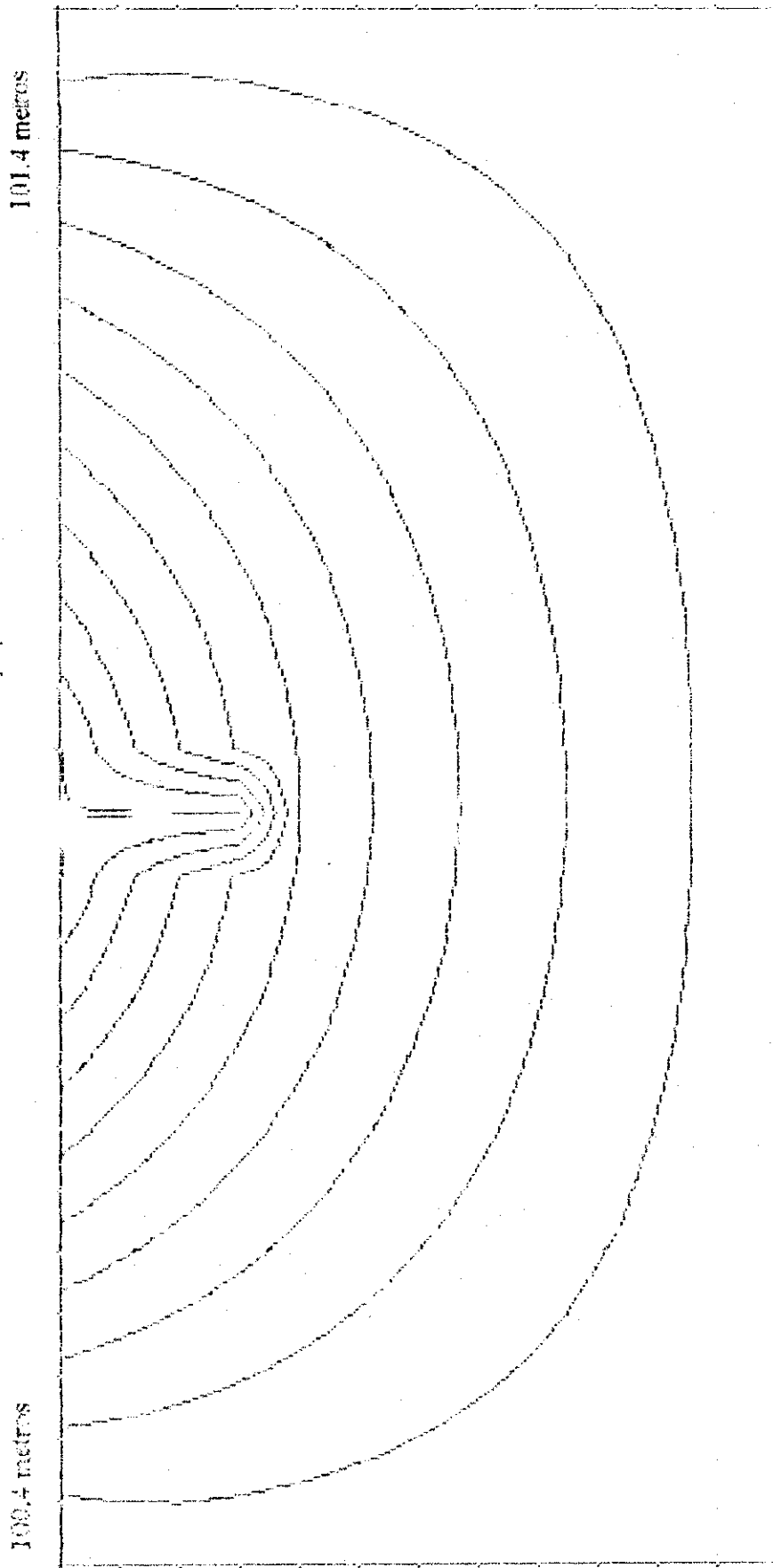
101.4 metros



J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $N_{\text{total}} = 1.0005$   
 $N_{\text{uniz}} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

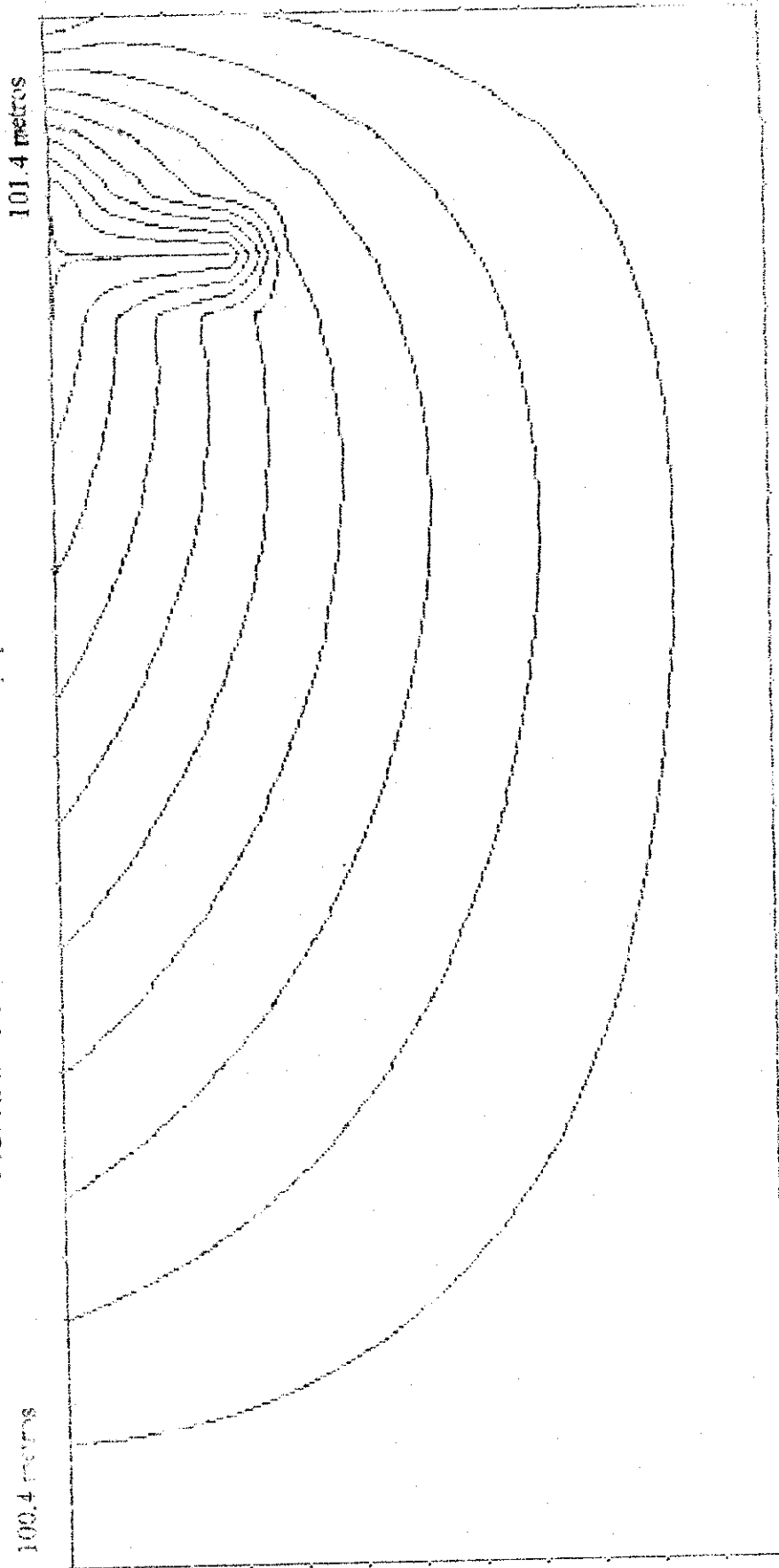
FIG. 5.F.2 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços



- 1 - 5 Espaços
- 2 - Espessos
- Comprimento de Cada Espaço - 3 metros
- $N_{ca} = 1.0605$
- $N_{dreno} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

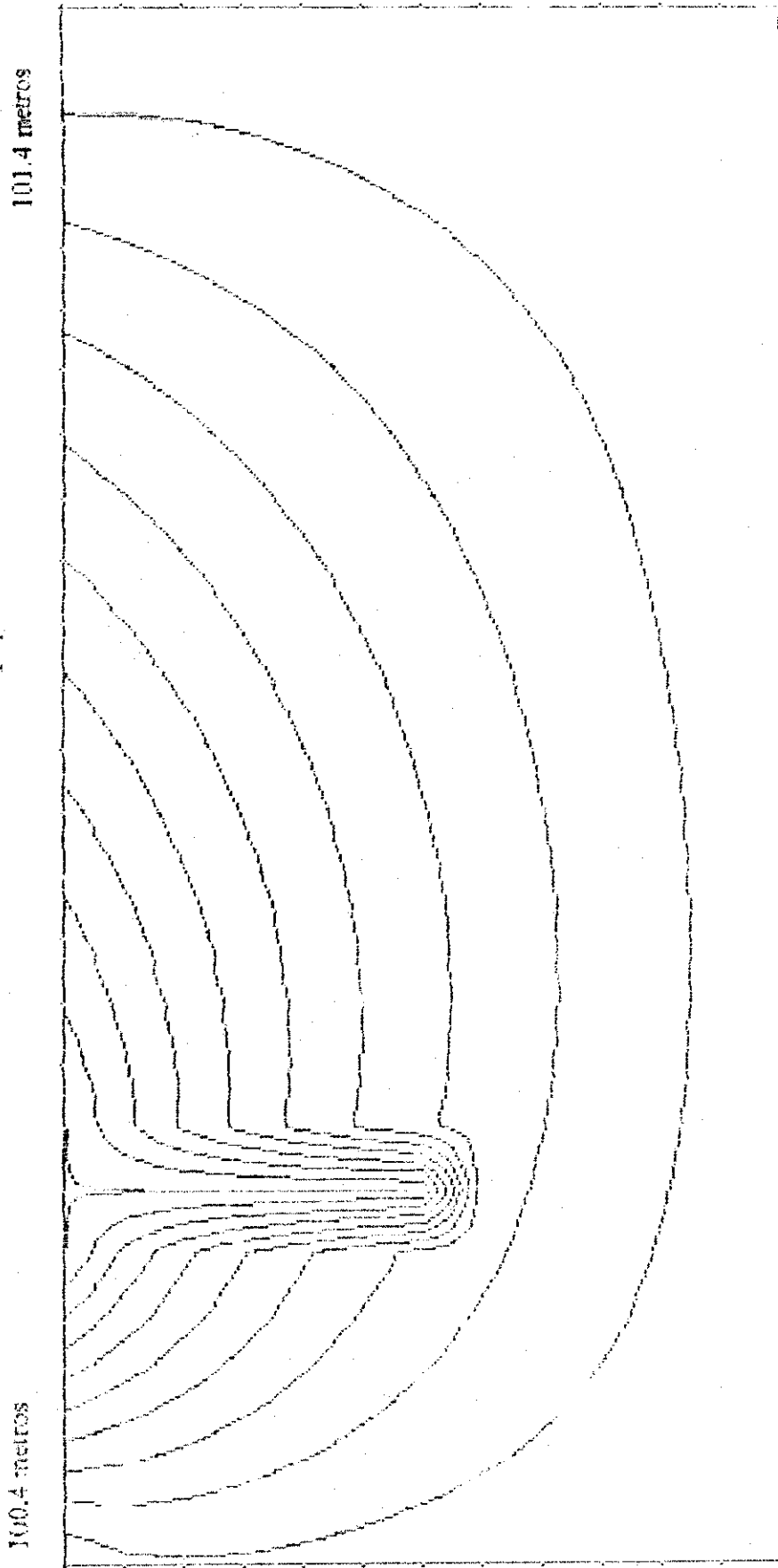
FIG. 5.F.3 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços



J = 5 Espaços  
 L = 5 Espaços  
 Largura de Cada Espaço = 3 metros  
 $K_{canal} = 1.0005$   
 $K_{solo} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.G.1 - Dreno de Profundidade  $J=8$  Espaços



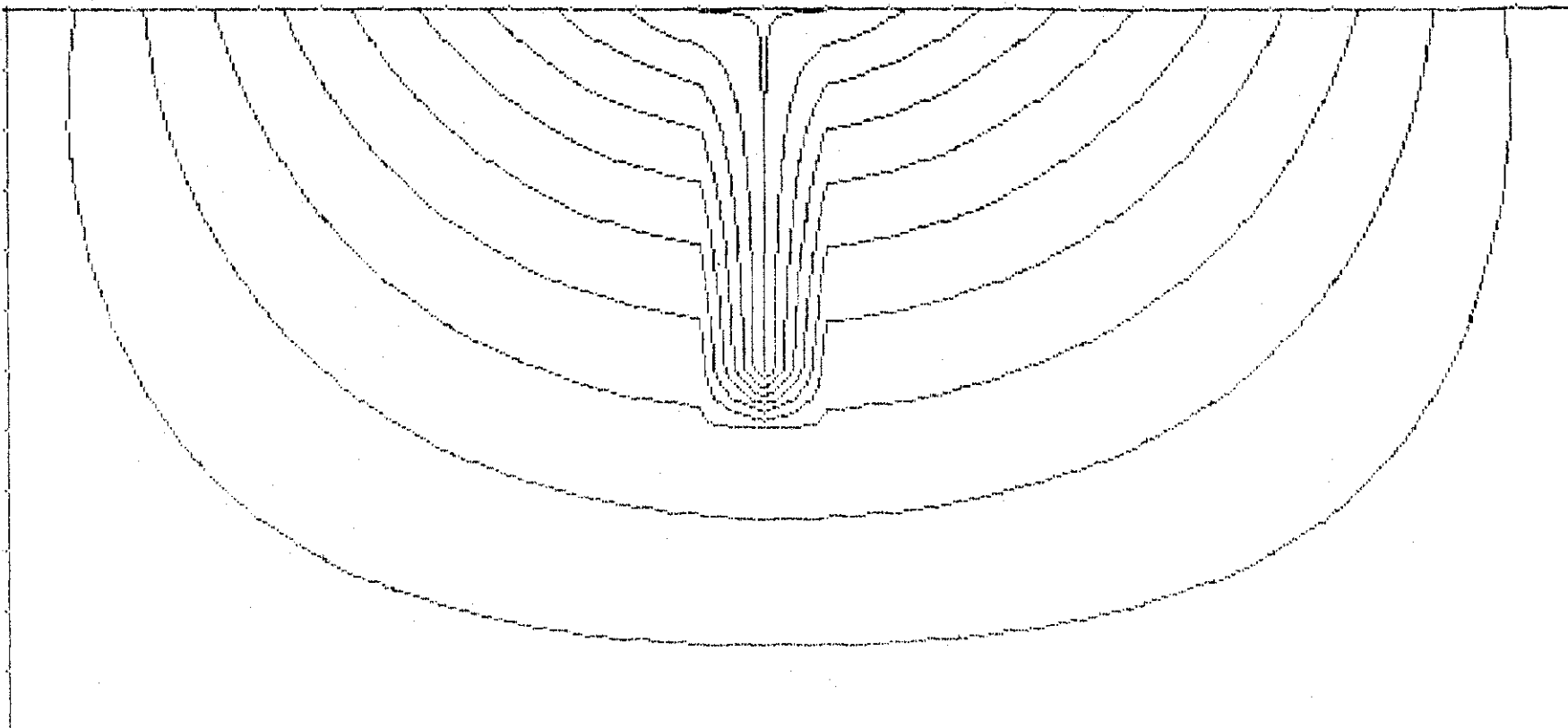
- 1 - 8 Espaços
- 2 - Espaços
- 3 - Largura de Cada Espaço - 3 metros
- 4 -  $N_{\text{esco}} = 1.0005$
- 5 -  $N_{\text{esco}} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.G.2 - Dreno de Profundidade J=8 Espaços

100.4 metros

101.4 metros

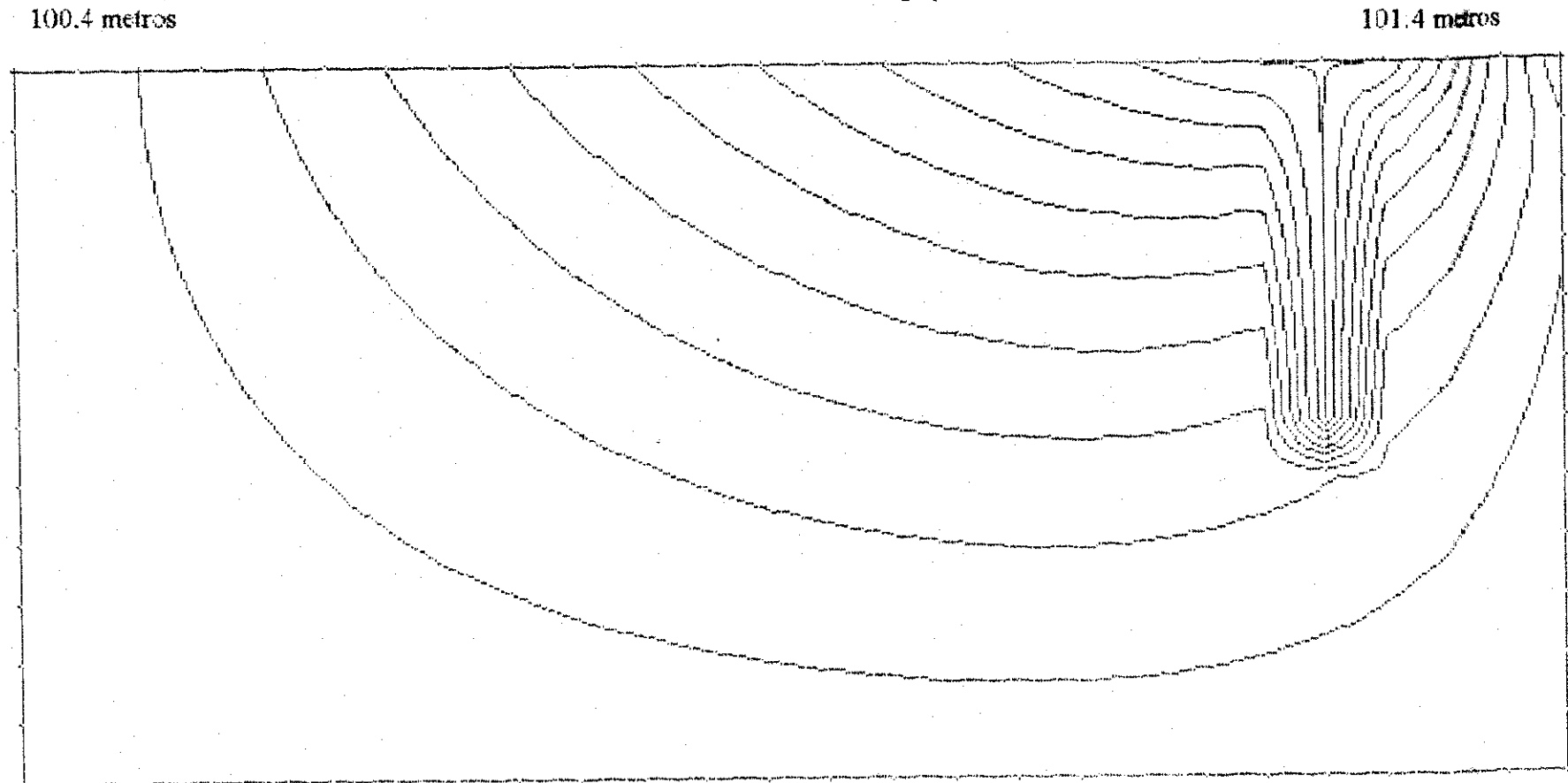


J - 8 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$



0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.G.3 - Dreno de Profundidade J=8 Espaços



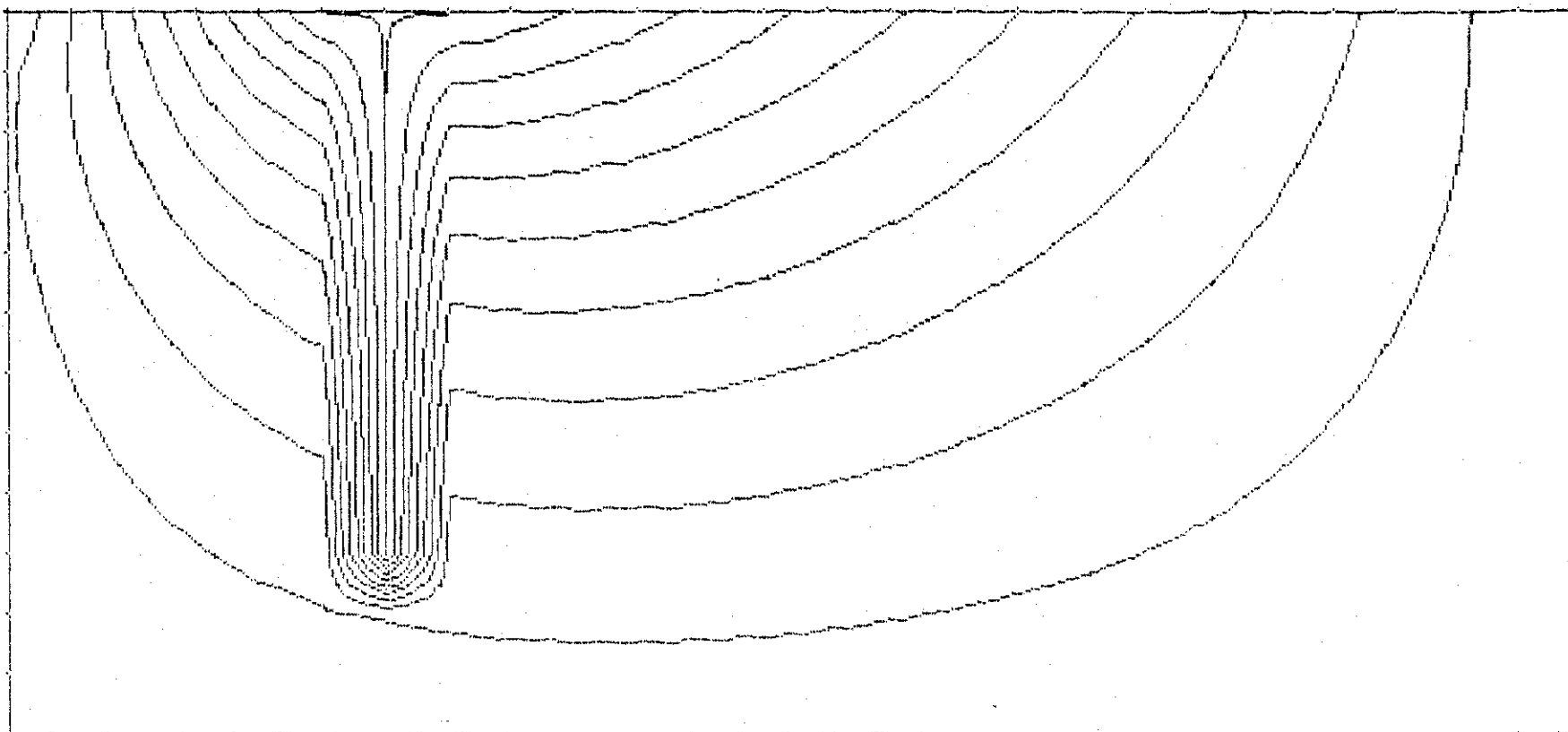
J - 8 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.H.1 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



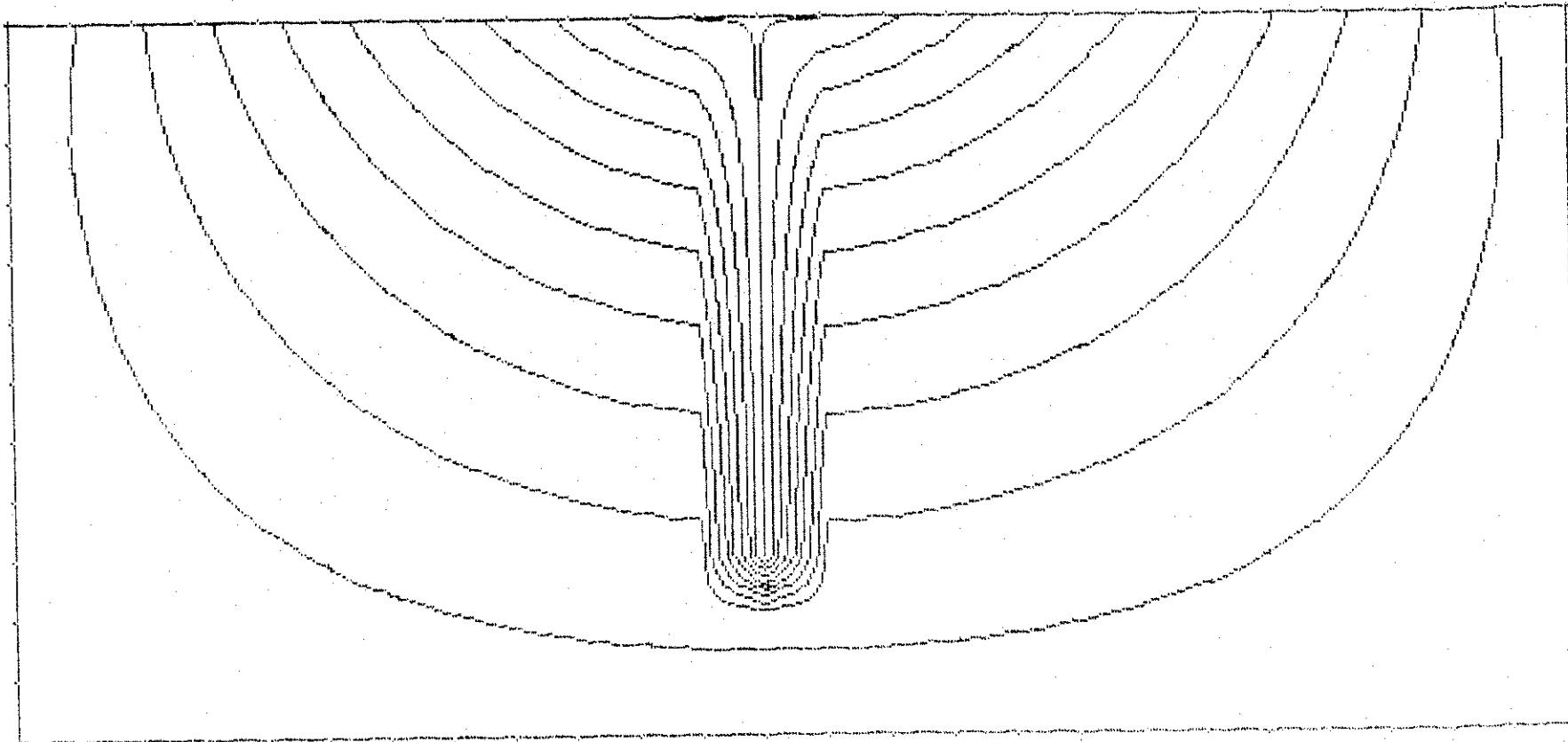
J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 7 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.H.2 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



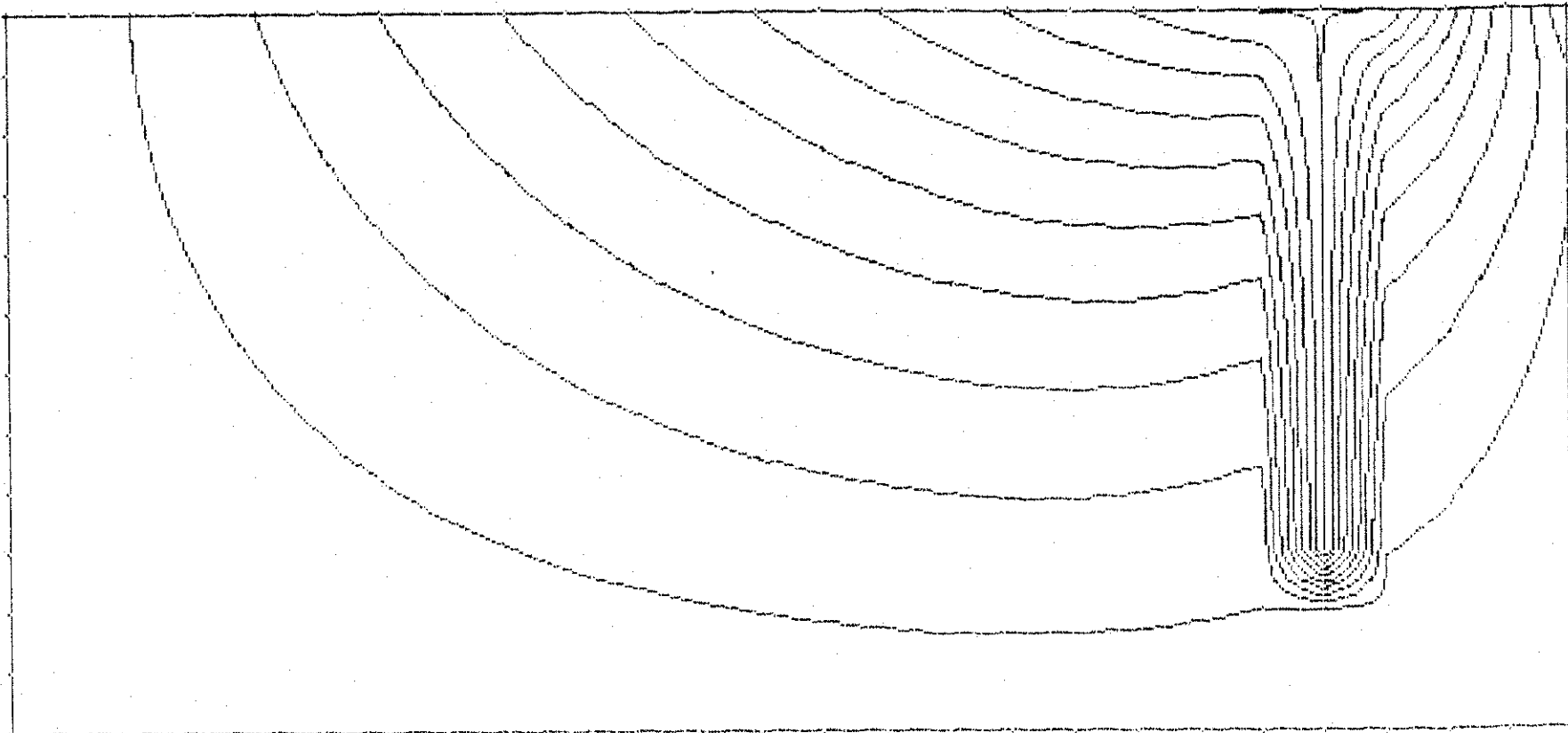
J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço = 2 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matiz} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.H.3 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



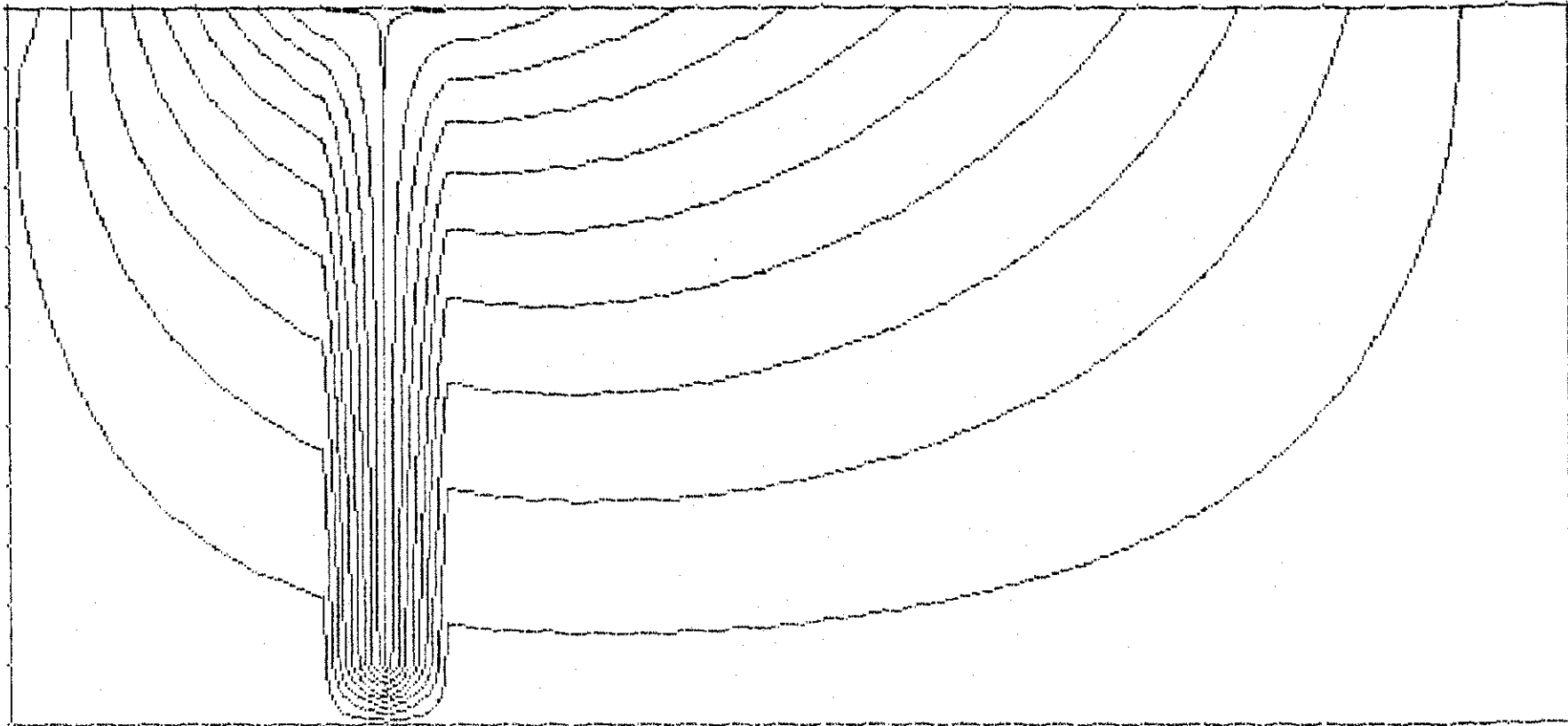
J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura do C. de 1.7 p. 4 - 2.1 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matiz} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
 0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.1.1 - Dreno de Profundidade J=13 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



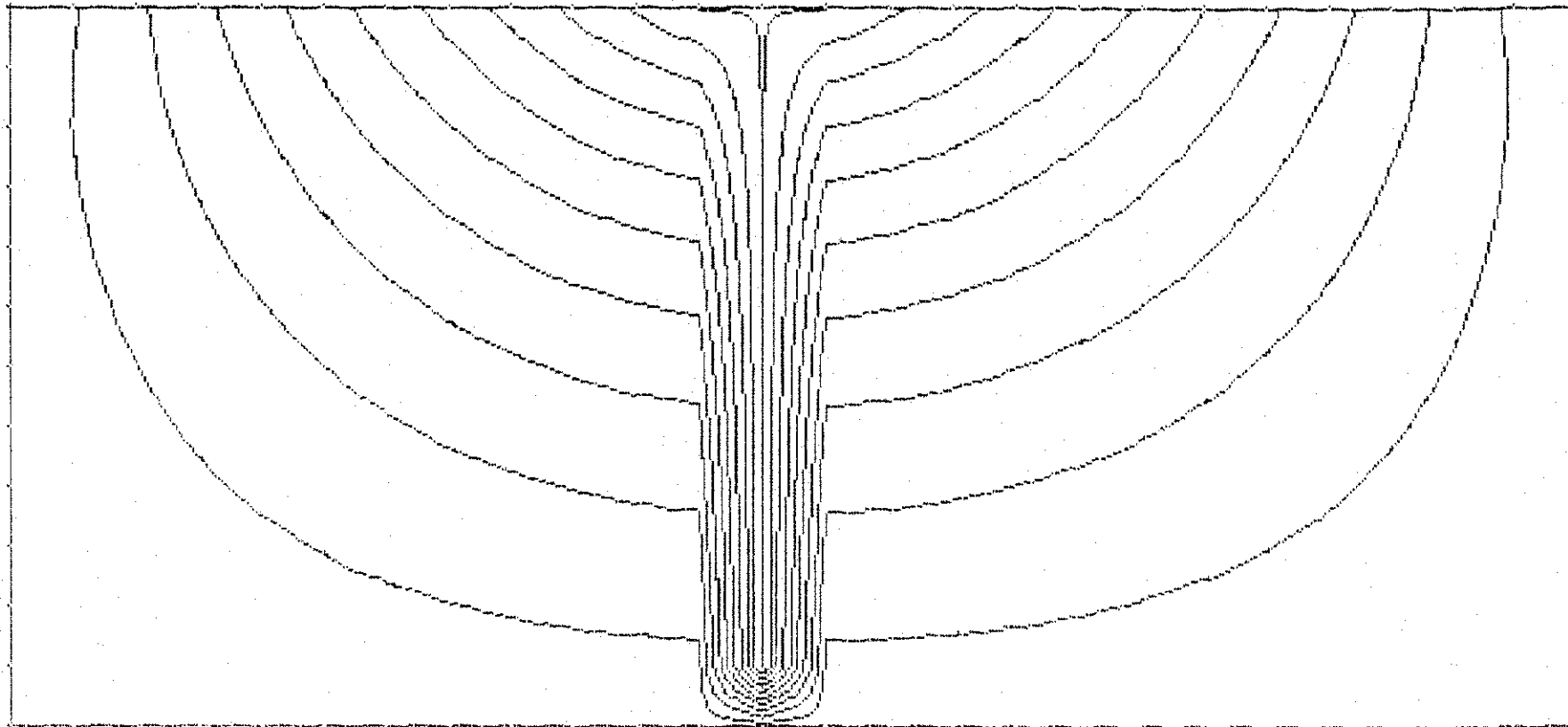
J - 13 Espaços  
 2 - Espaços  
 Lugar de Cada Espaço - 2 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{cunha} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.1.2 - Dreno de Profundidade J=13 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



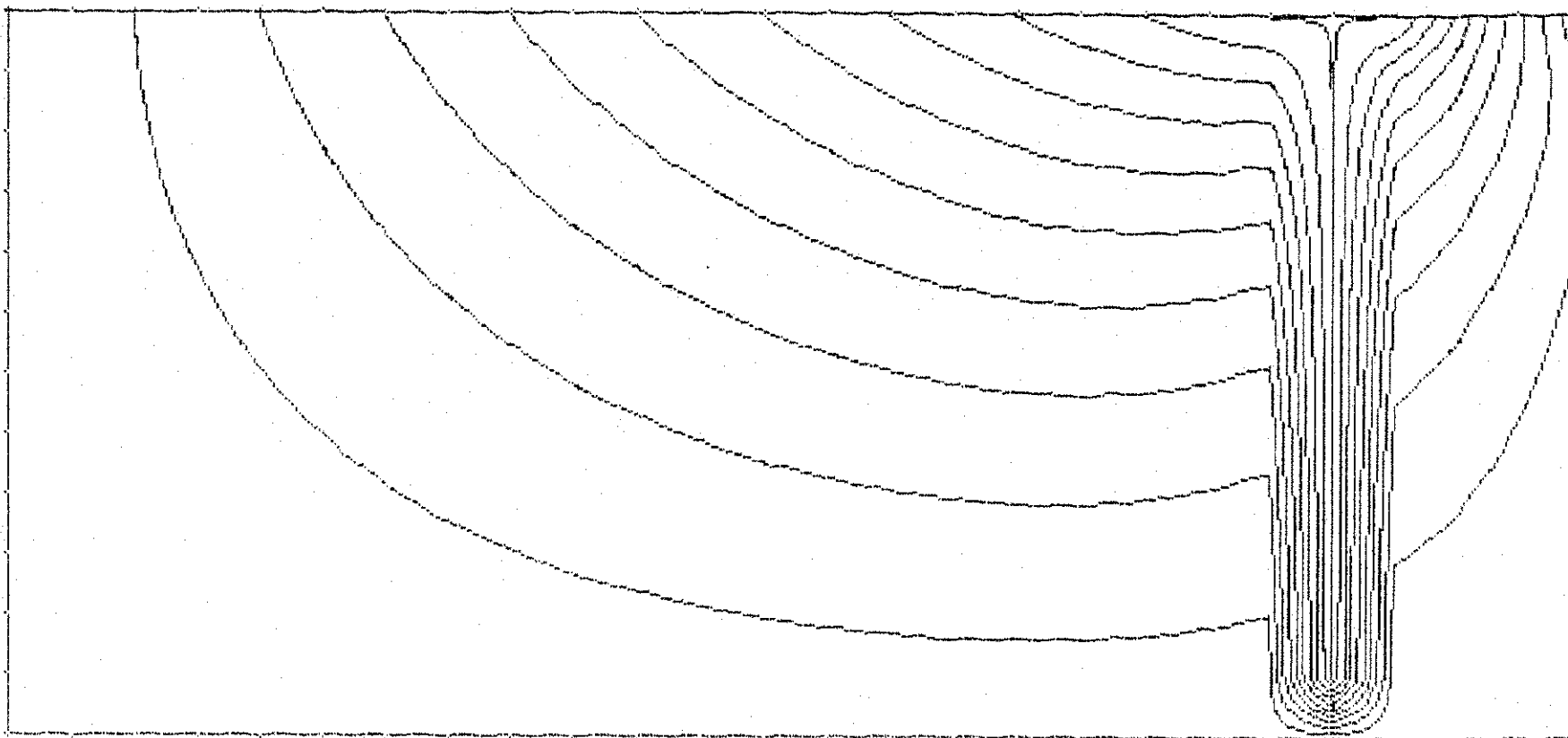
J - 13 Espaços  
2 - Espaços  
Comprimento de Cada Espaço - 2 metros  
 $K_{d=2.0} = 1.0005$   
 $K_{d=1.0} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.1.3 - Dreno de Profundidade J=13 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



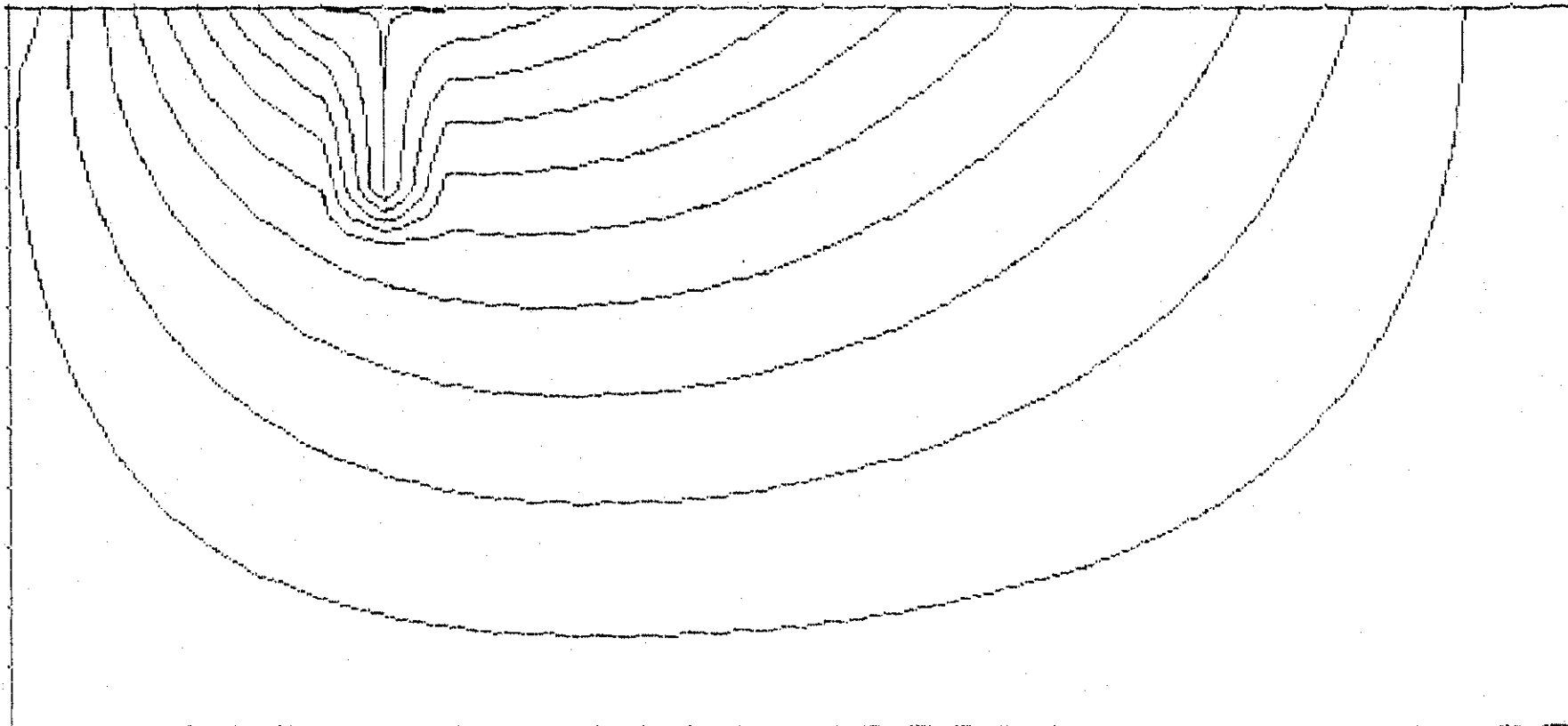
J - 13 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço 2 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matiz} = 1.0$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.J.1 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

101.4 metros

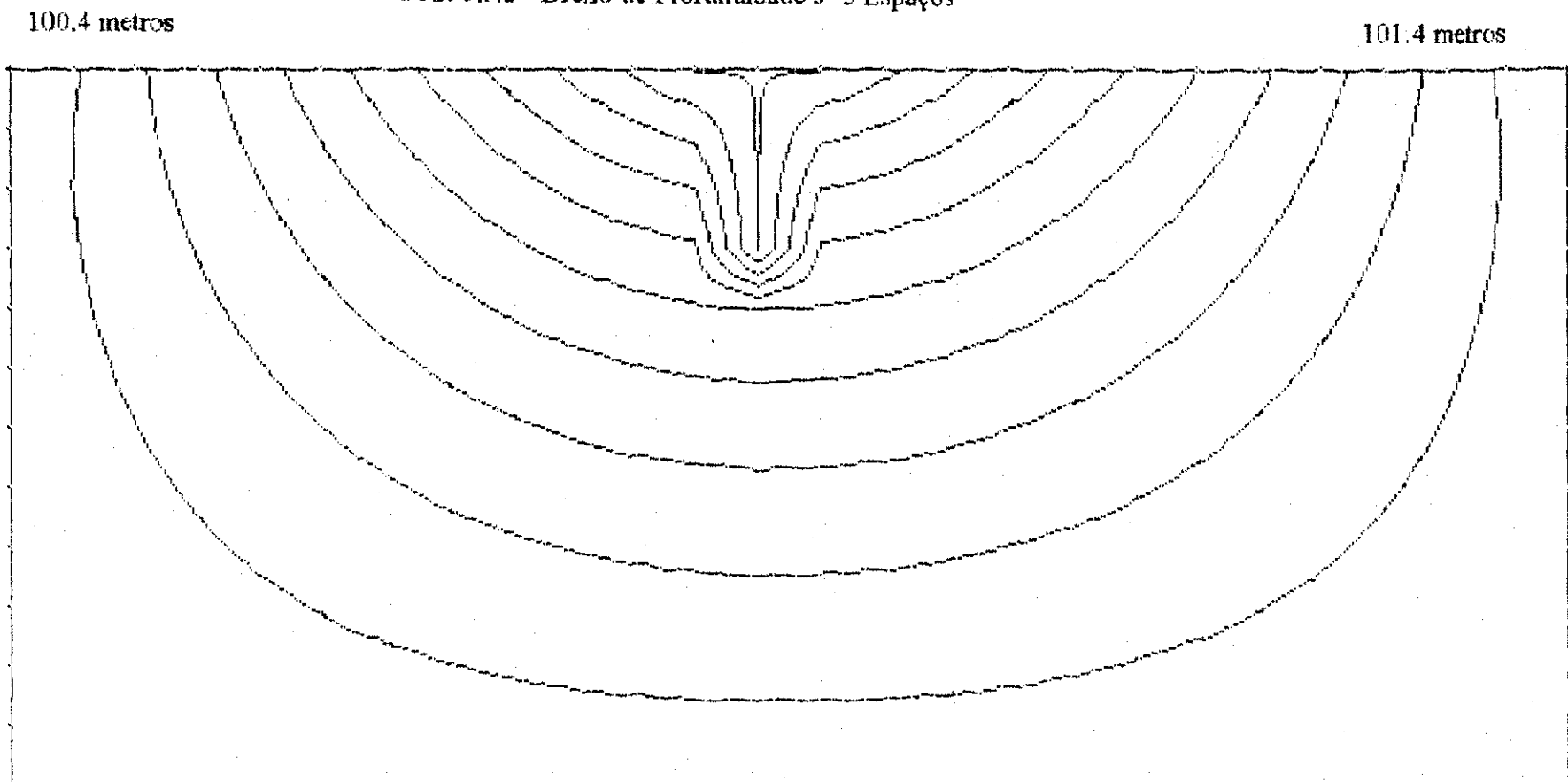


J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$



0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.J.2 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços



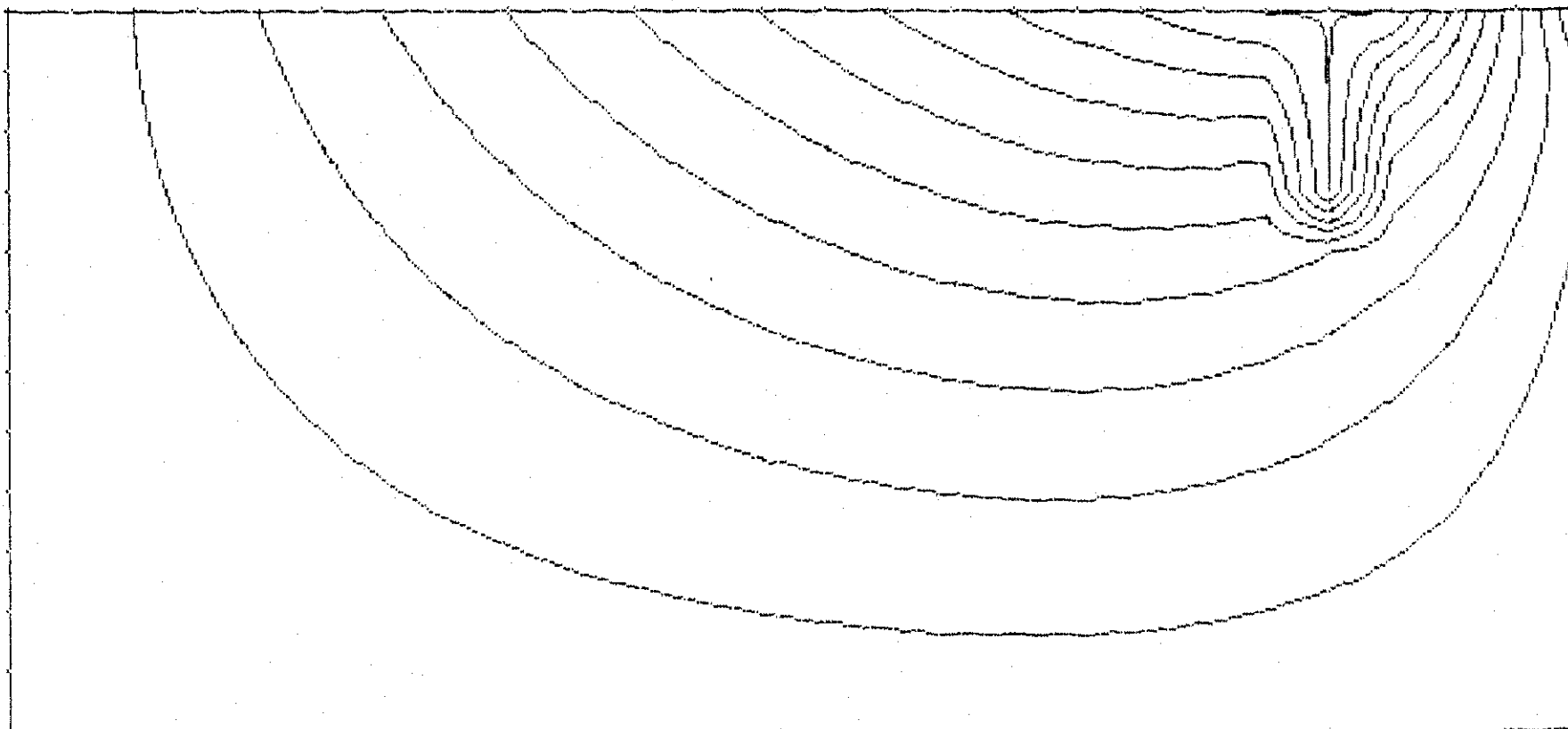
J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 ( 13x25 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.J.3 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

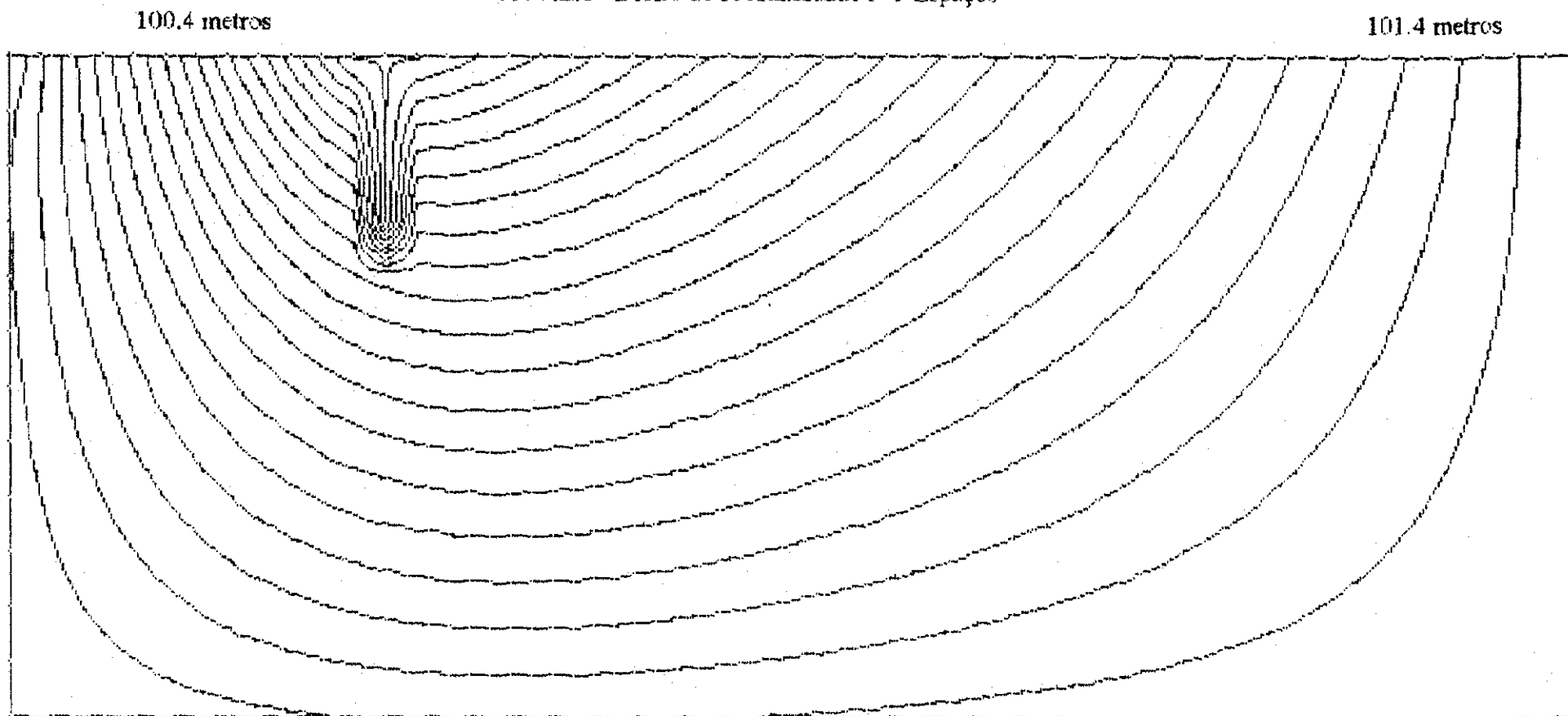
101.4 metros



J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.L.1 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços



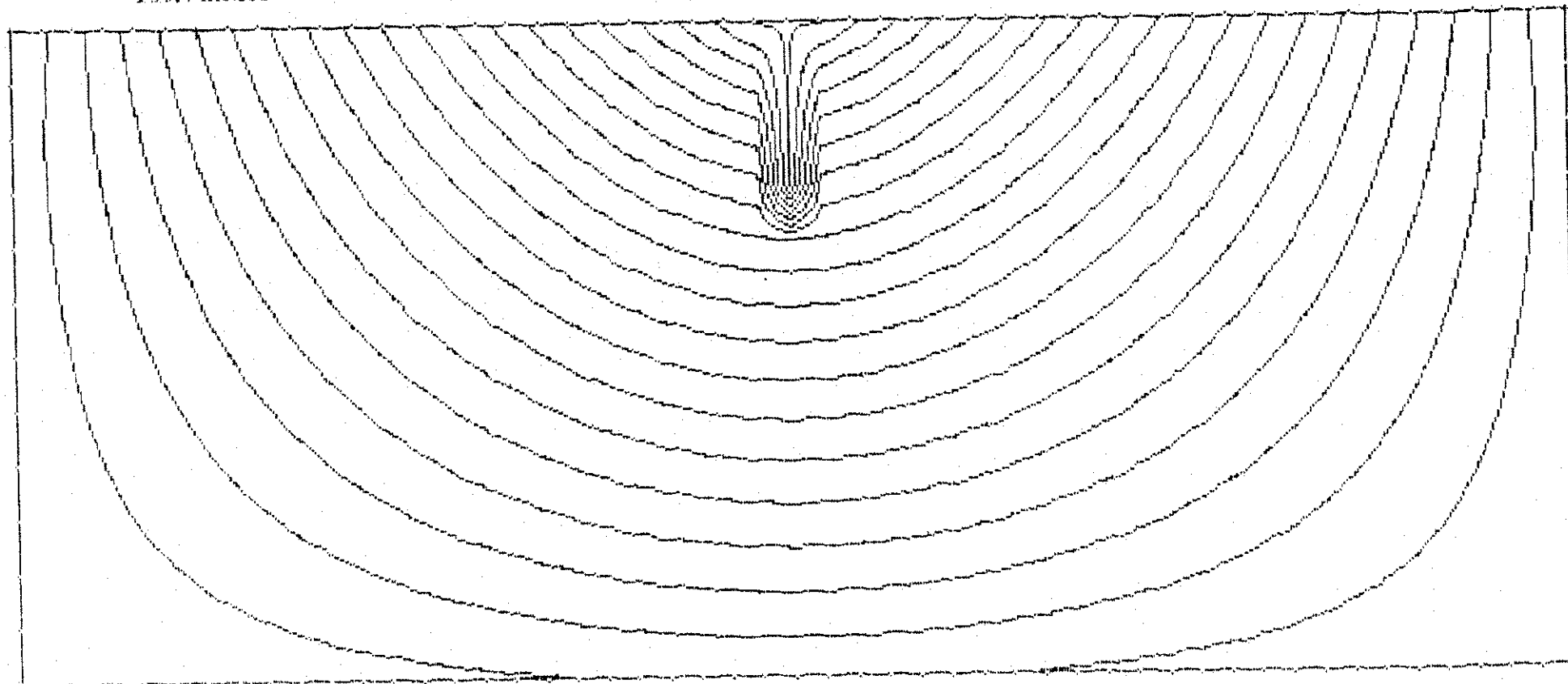
J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x53 ( 13x50 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.L.2 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



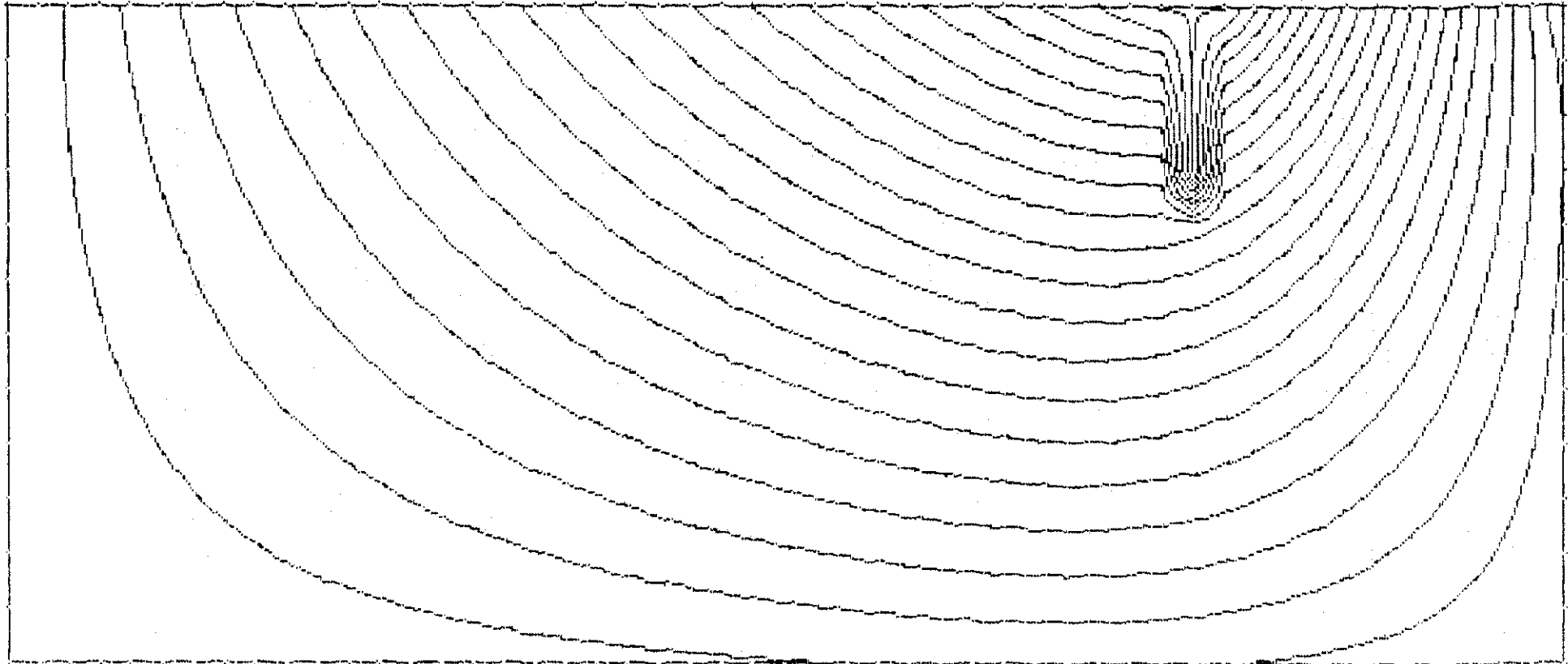
1 - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x53 ( 13x50 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.L.3 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



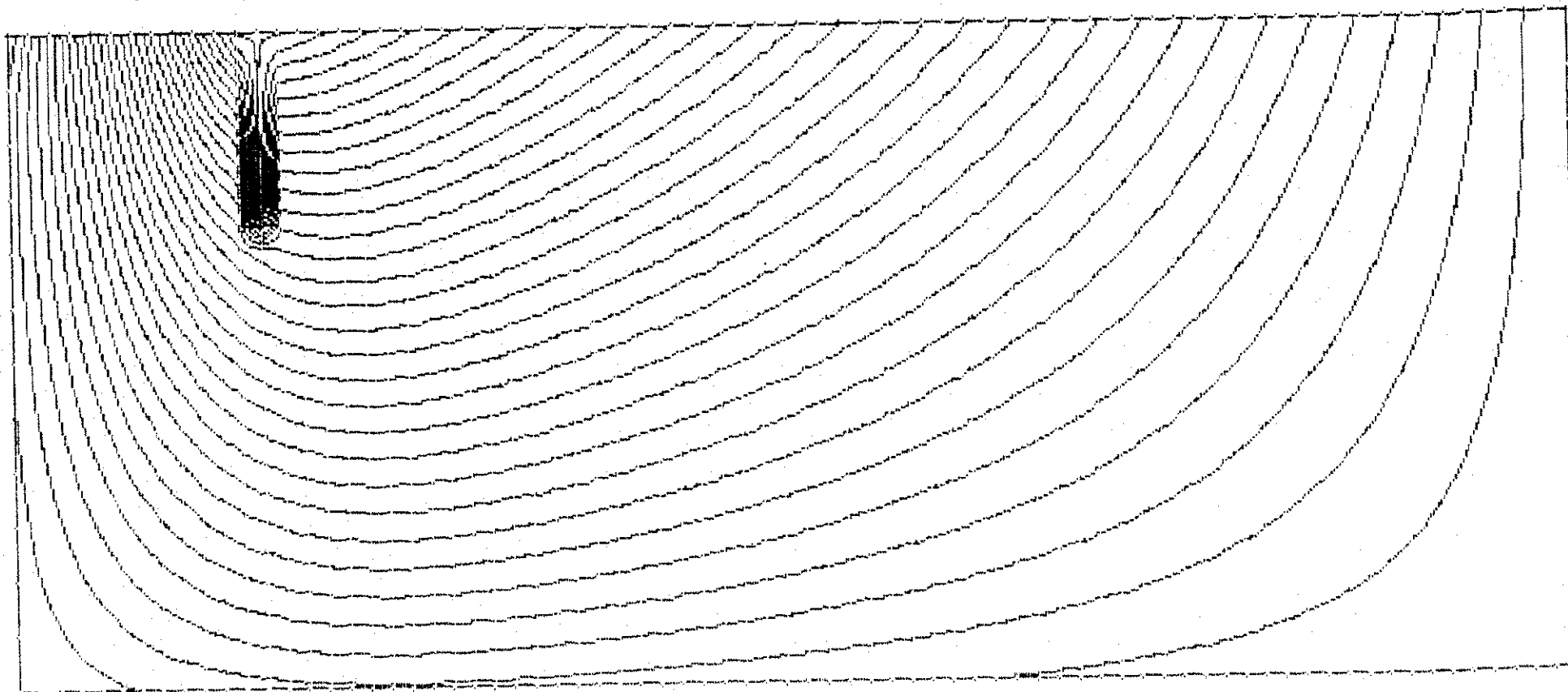
J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matiz}} = 1.0$   
Matriz 14x53 ( 13x50 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.M.1 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

101.4 metros



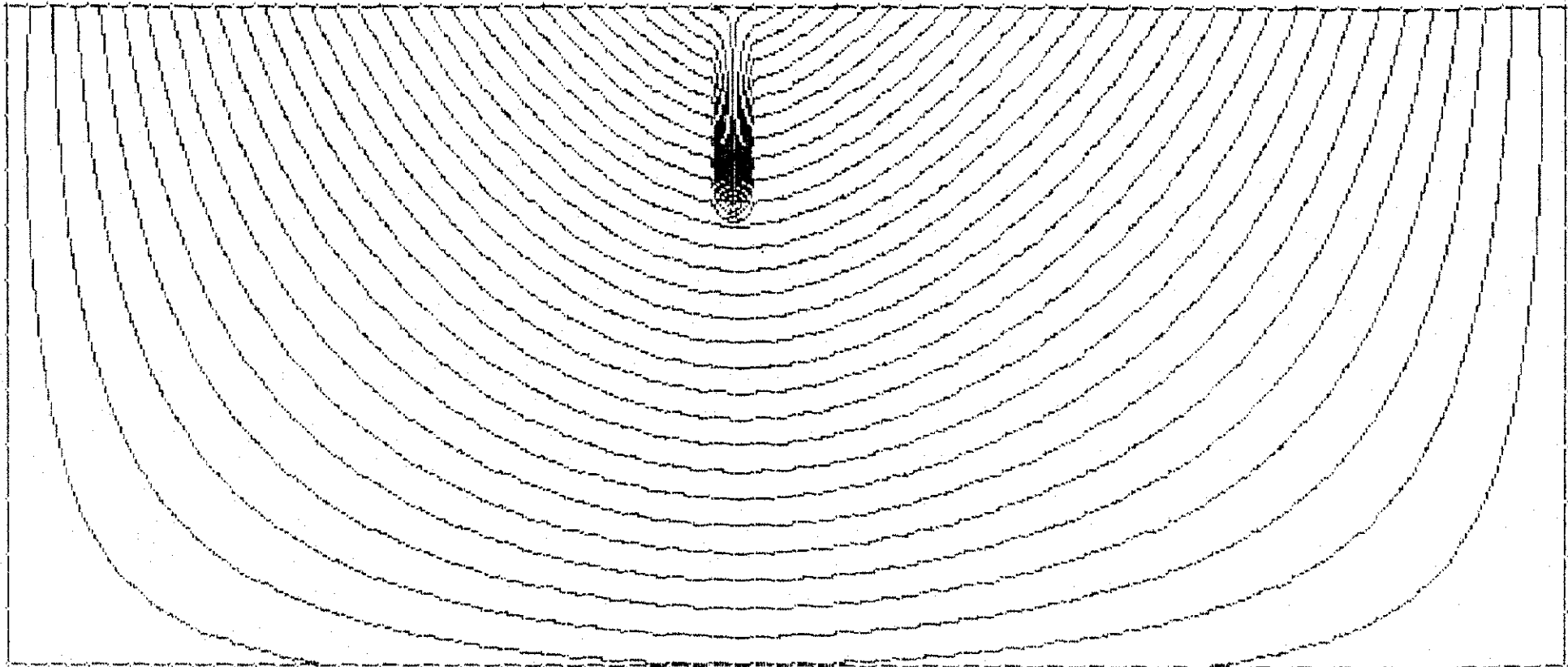
J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x78 (13x75 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.M.2 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

100.4 metros

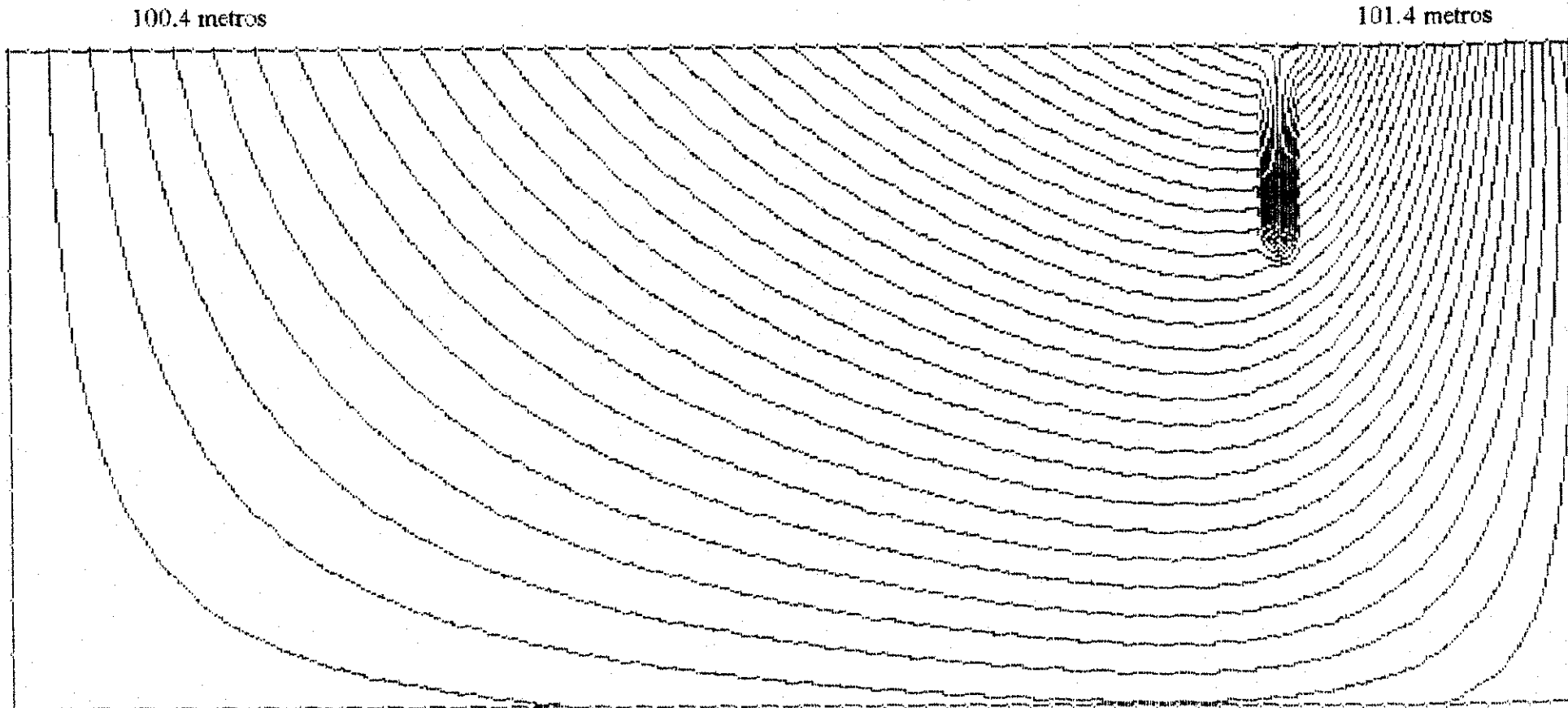
101.4 metros



J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x78 ( 13x75 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.M.3 - Dreno de Profundidade J=5 Espaços

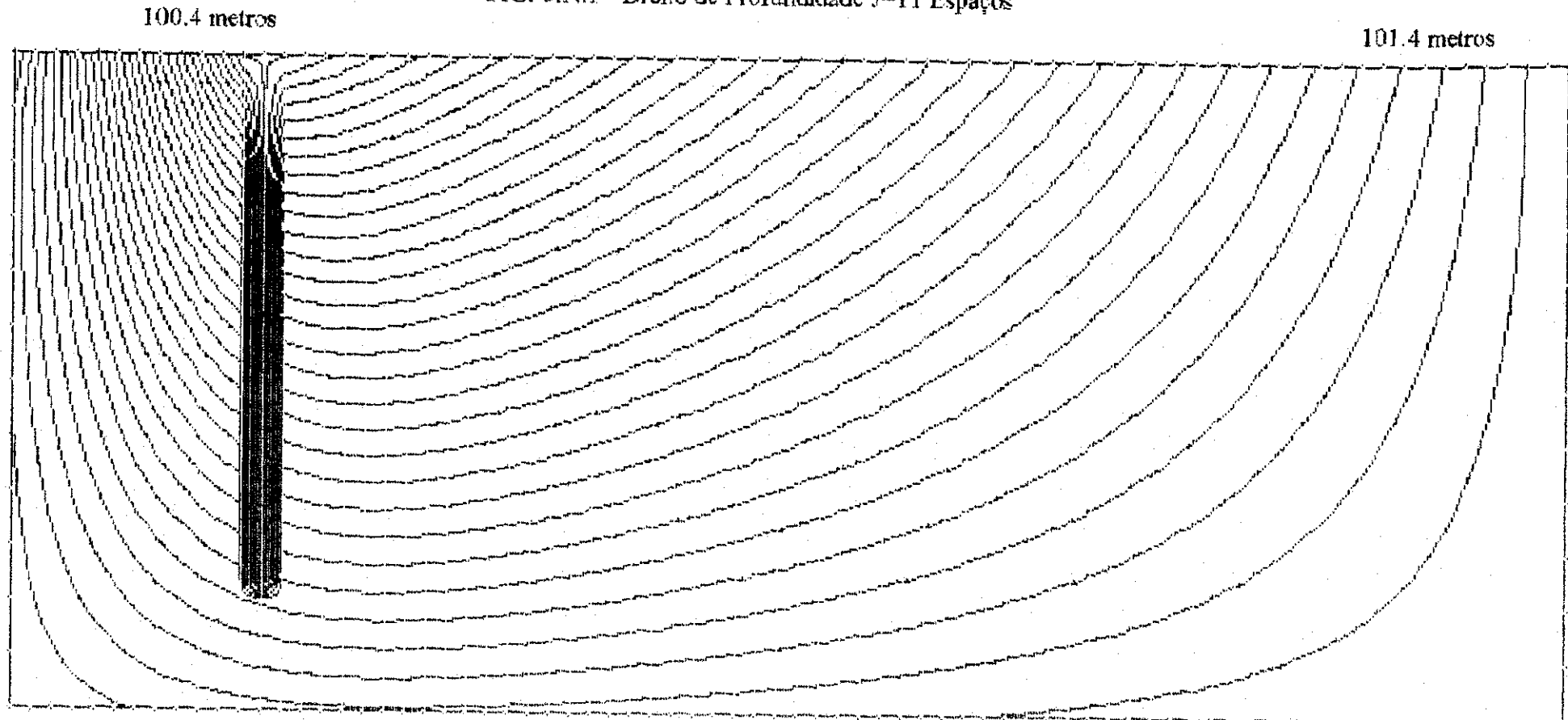


J - 5 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x78 ( 13x75 Espaços)



0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

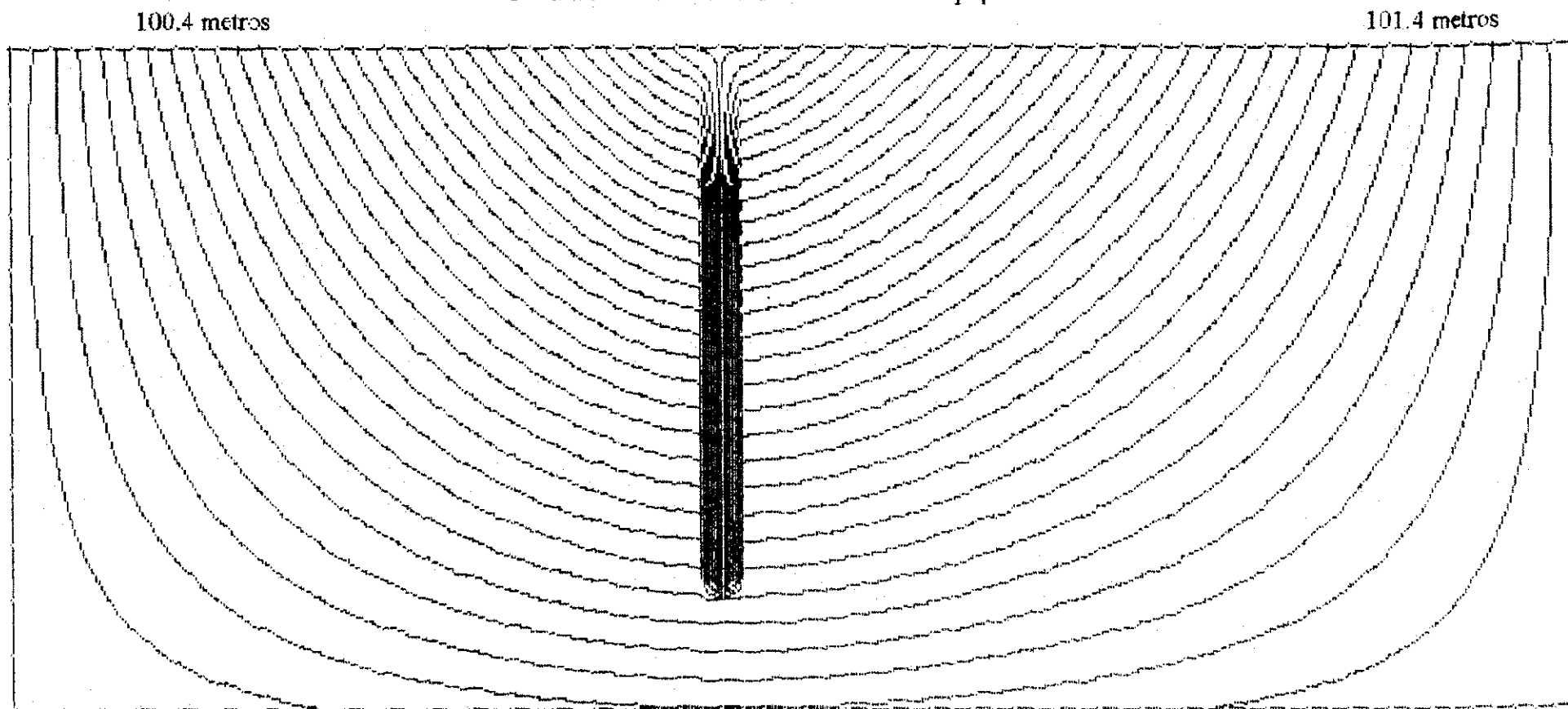
FIG. 5.N.1 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços



J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x78 ( 13x75 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

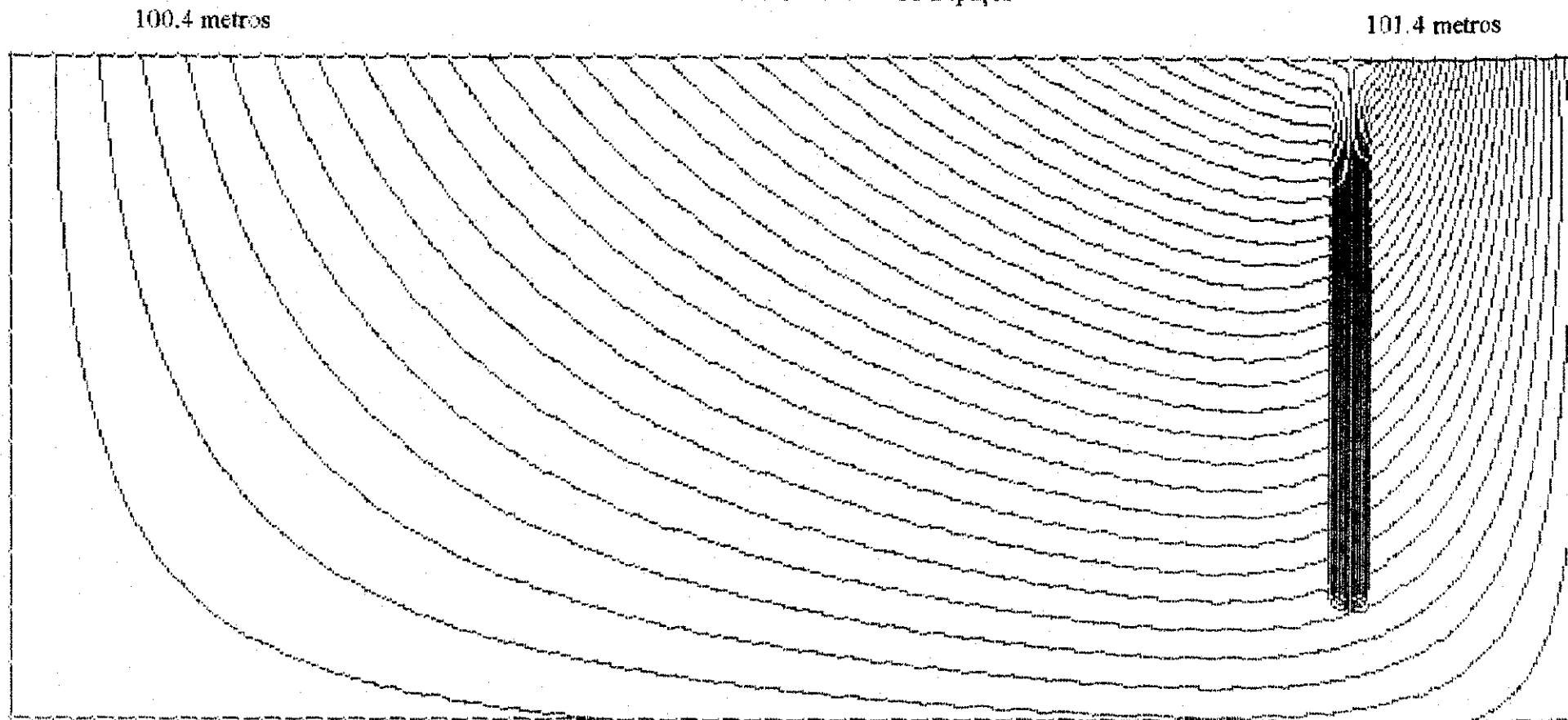
FIG. 5.N.2 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços



J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{\text{dreno}} = 1.0005$   
 $K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x78 ( 13x75 Espaços)

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.N.3 - Dreno de Profundidade J=11 Espaços



J - 11 Espaços  
2 - Espaços  
Largura de Cada Espaço - 3 metros  
 $K_{dreno} = 1.0005$   
 $K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x78 ( 13x75 Espaços)

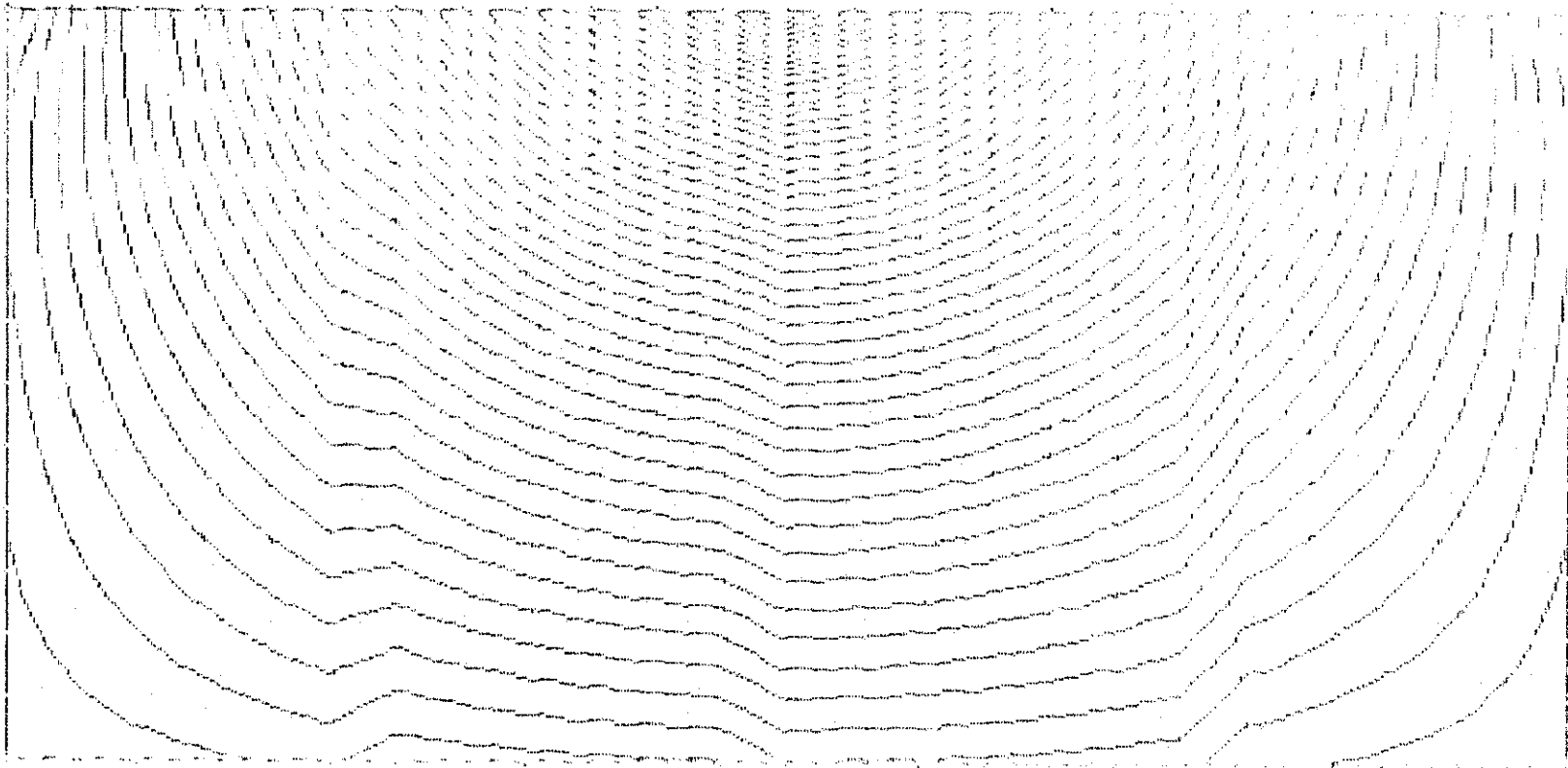
0.5  
0.5

ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.Q - Efeito da Anisotropia sem Dreno

100.4 metros

101.4 metros



Linhas Equipotenciais  
 $K_1 = 1.0005$   
 $K_2 = 1.0$   
Matriz 14x28 ( 13x25 Espaços)

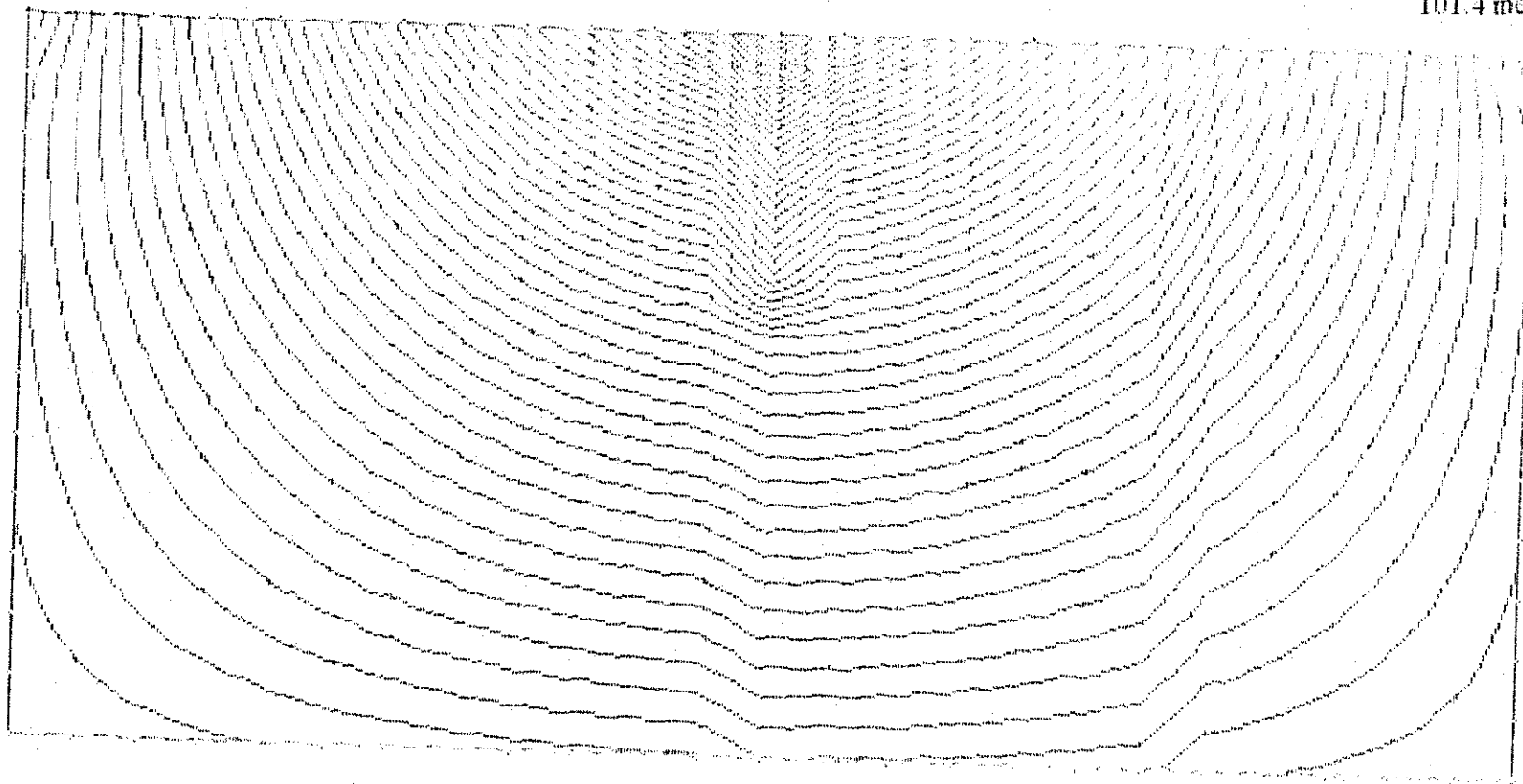
5212  
5.5

ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 5.P - Efeito da Anisotropia em um Dreno

100.4 metros

101.4 metros



Linhas Equipotenciais

$K_1 = 1.0005$

$K_2 = 1.0$

$K_{dreno} = 1.02$ ,  $J = 5$  Espaços, Largura 3 metros

Matriz 14x28 (13x25 Espaços)

FIG. 5.1 - Rede de Fluxo no Meio Homogêneo sem Efeito do Dreno

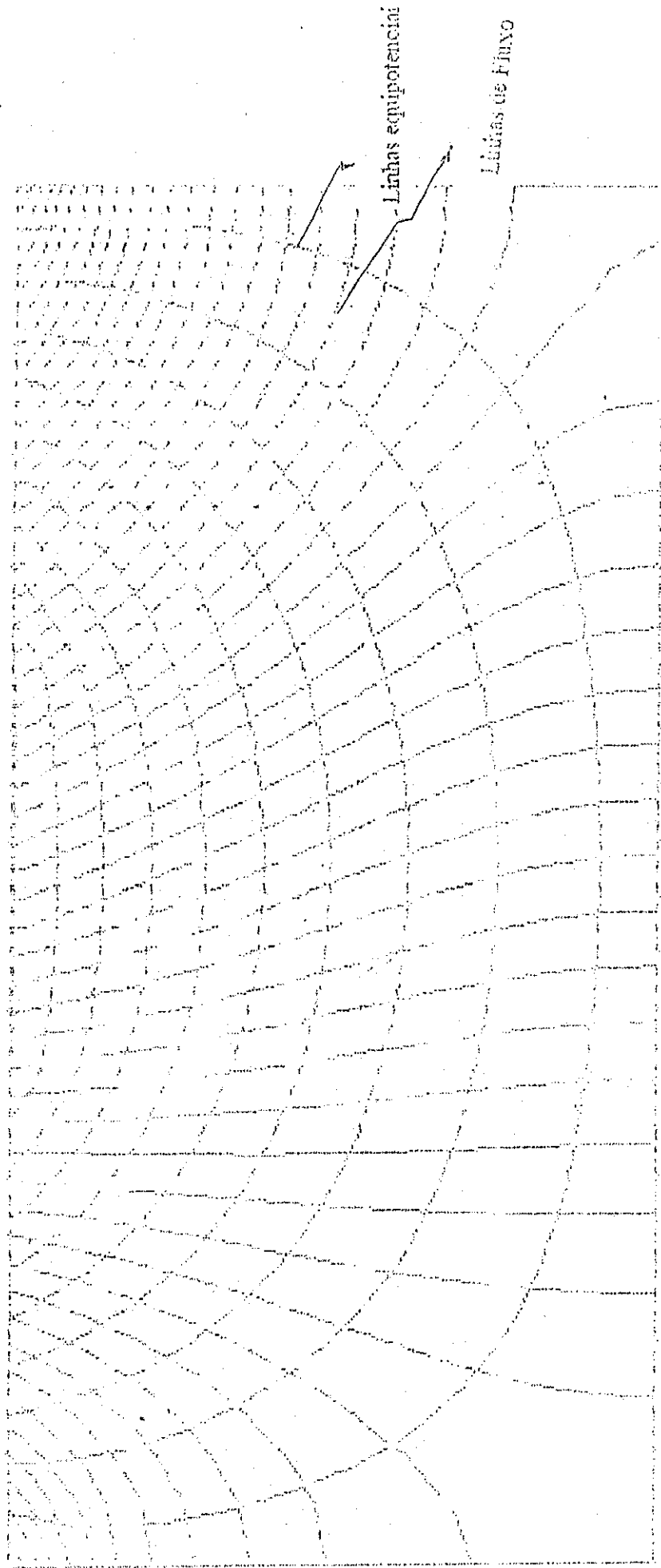


TABELA 5.2 % da Área Capturada Pelo Dreno em  
Função da Profundidade do dreno

% Área Capturada	03	12	24	39
Profundidade J (m)	05	08	11	13

FIG. 5.2 - Profundidade do dreno  
Versus Área Capturada Pelo Dreno

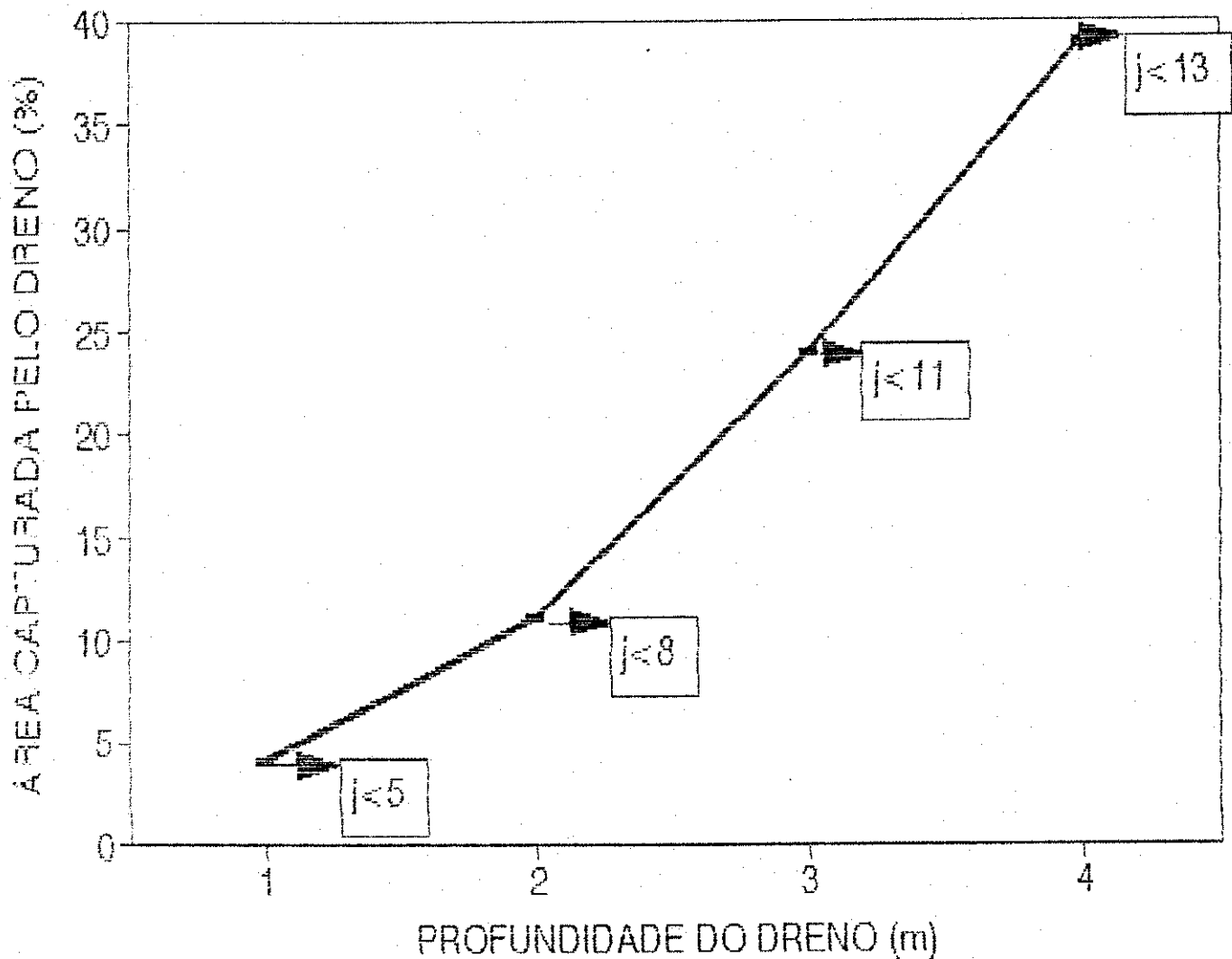


TABELA 5.3 Permeabilidade do Dreno  
em Função da Vazão

$K_{\text{dreno}}$	1.00	1.50	2.00	3.00
Vazão	13.40	20.10	26.80	40.20

FIG.5.3 - Variação da Permeabilidade  
do Dreno Versus Vazão

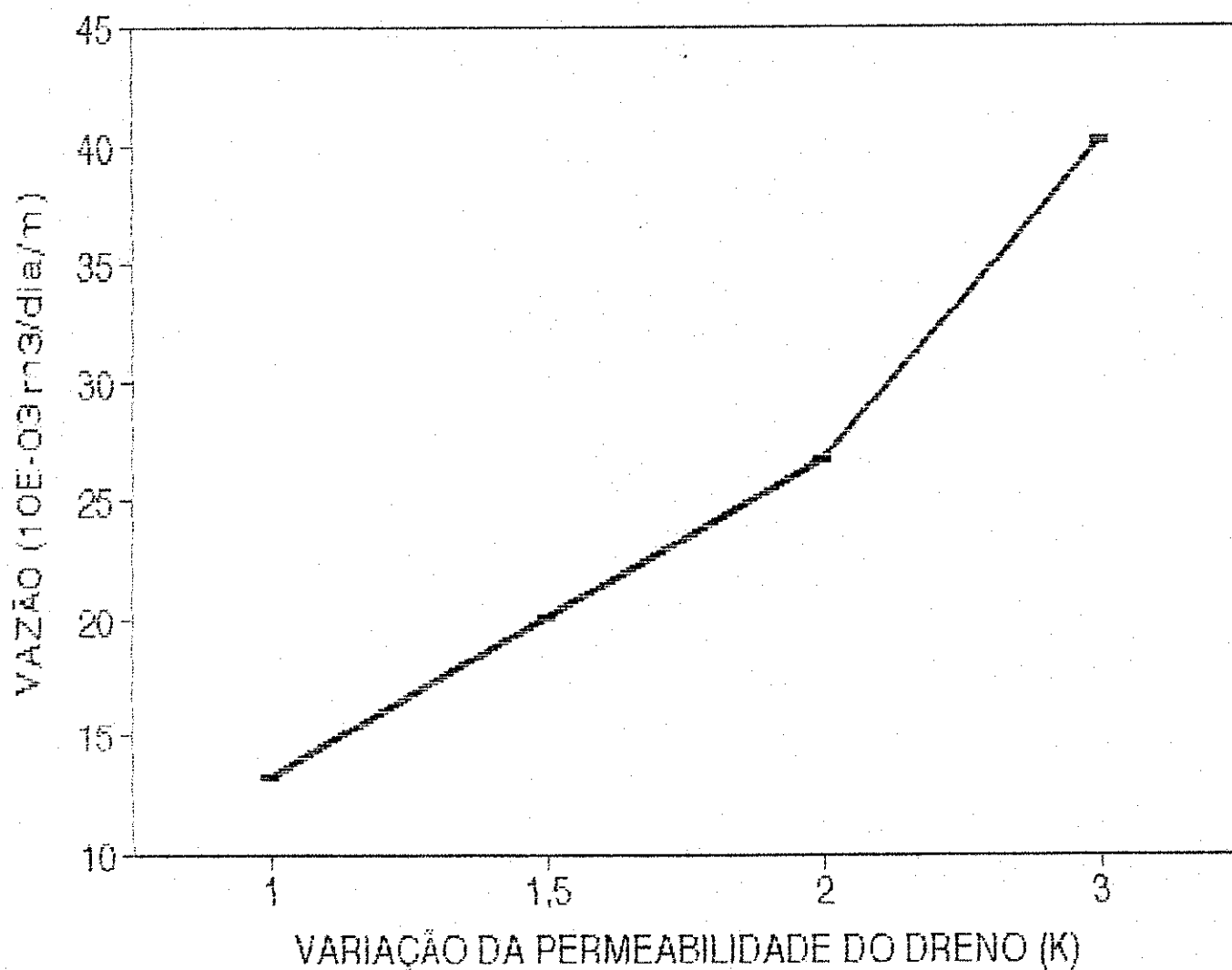




TABELA 5.4 Profundidade do Dreno  
em Função da Vazão

Profundidade	05	08	11	13
Vazão	8.04	12.86	17.68	20.90

FIG.5.4 Variação da Profundidade do  
Dreno Versus Vazão

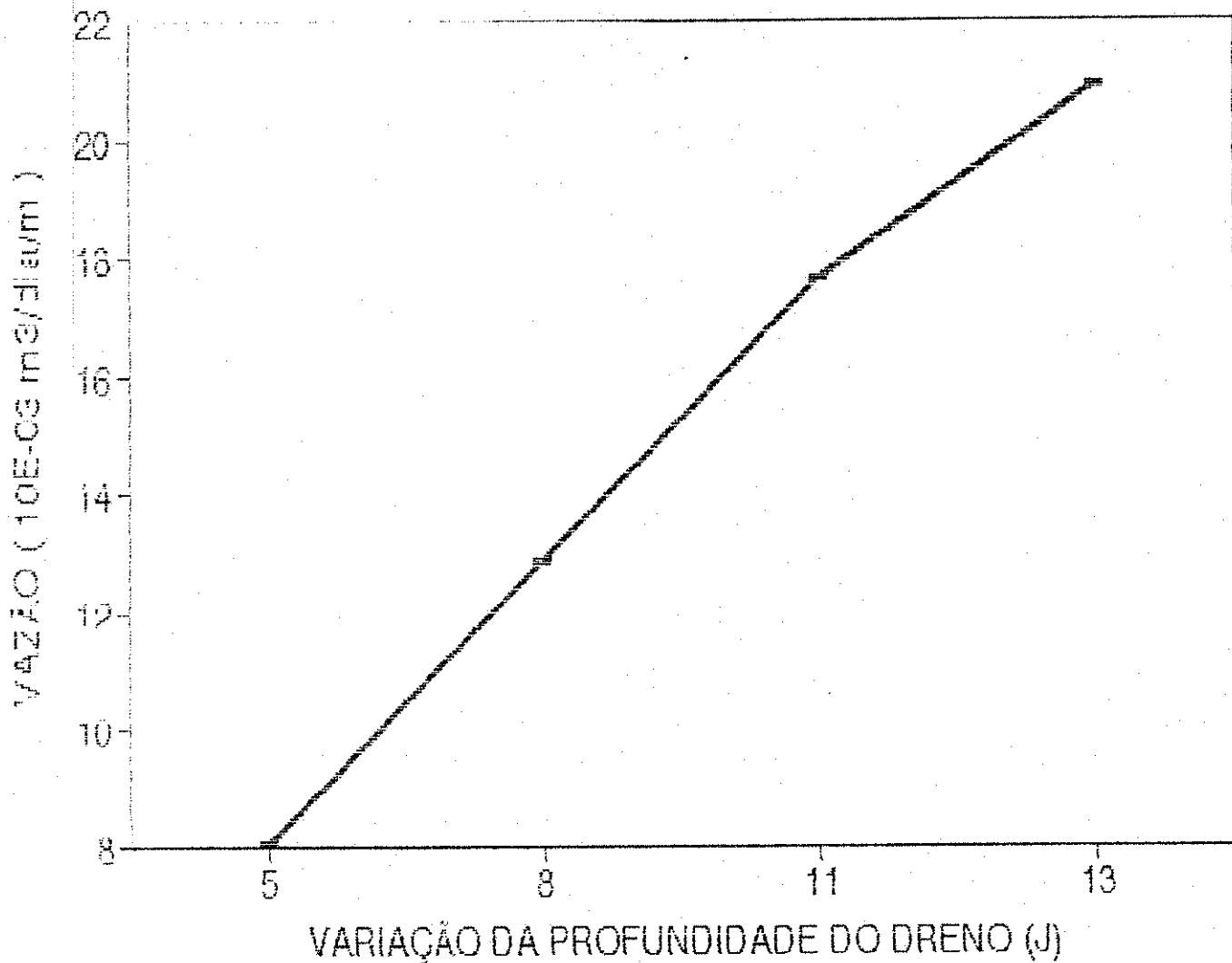


TABELA 5.5 largura do Dreno  
em Função da Vazão

Largura	1	2	3	6
Vazão	16.08	32.16	48.24	96.48

FIG.5.5 Variação da largura do Dreno  
Versus Vazão

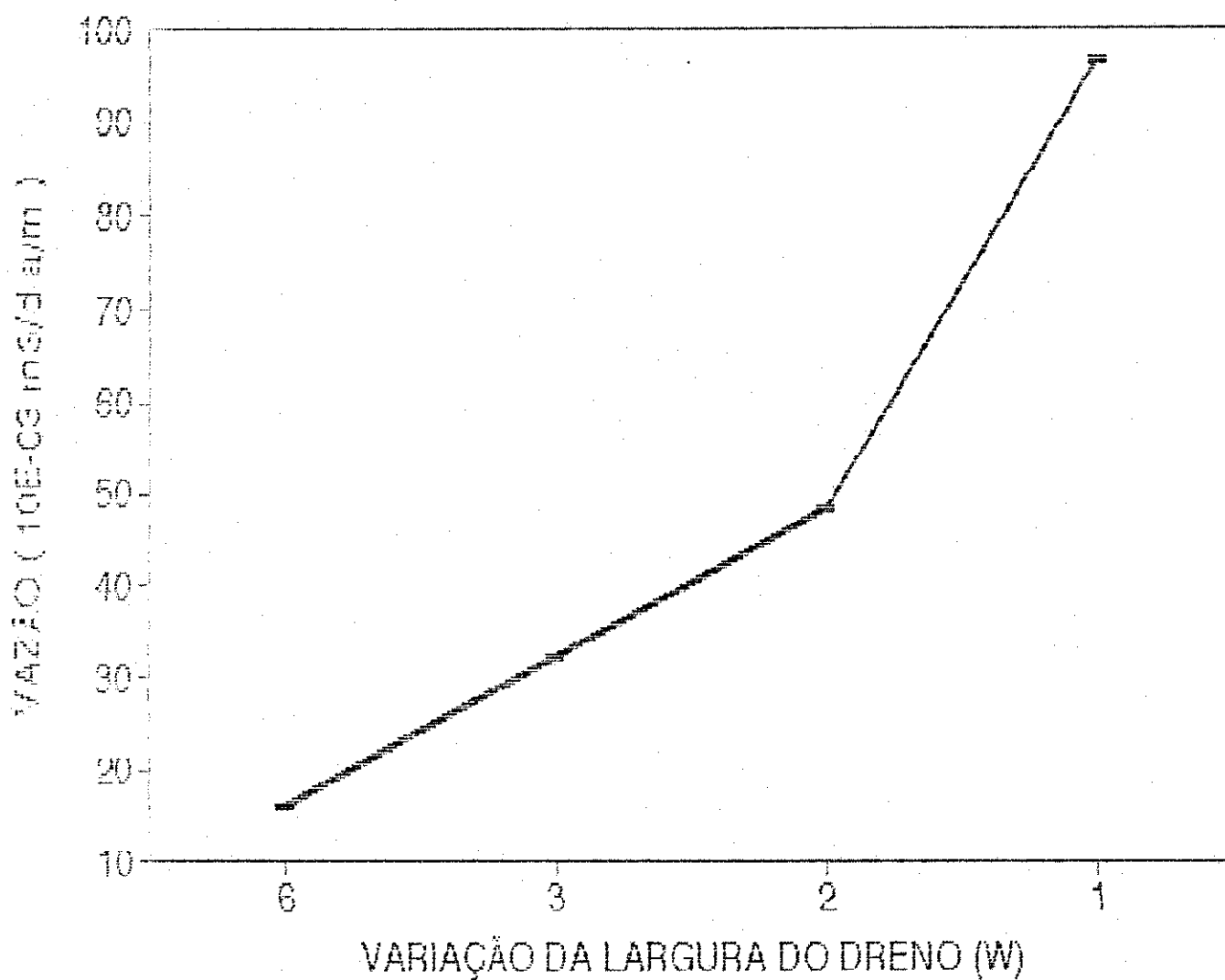
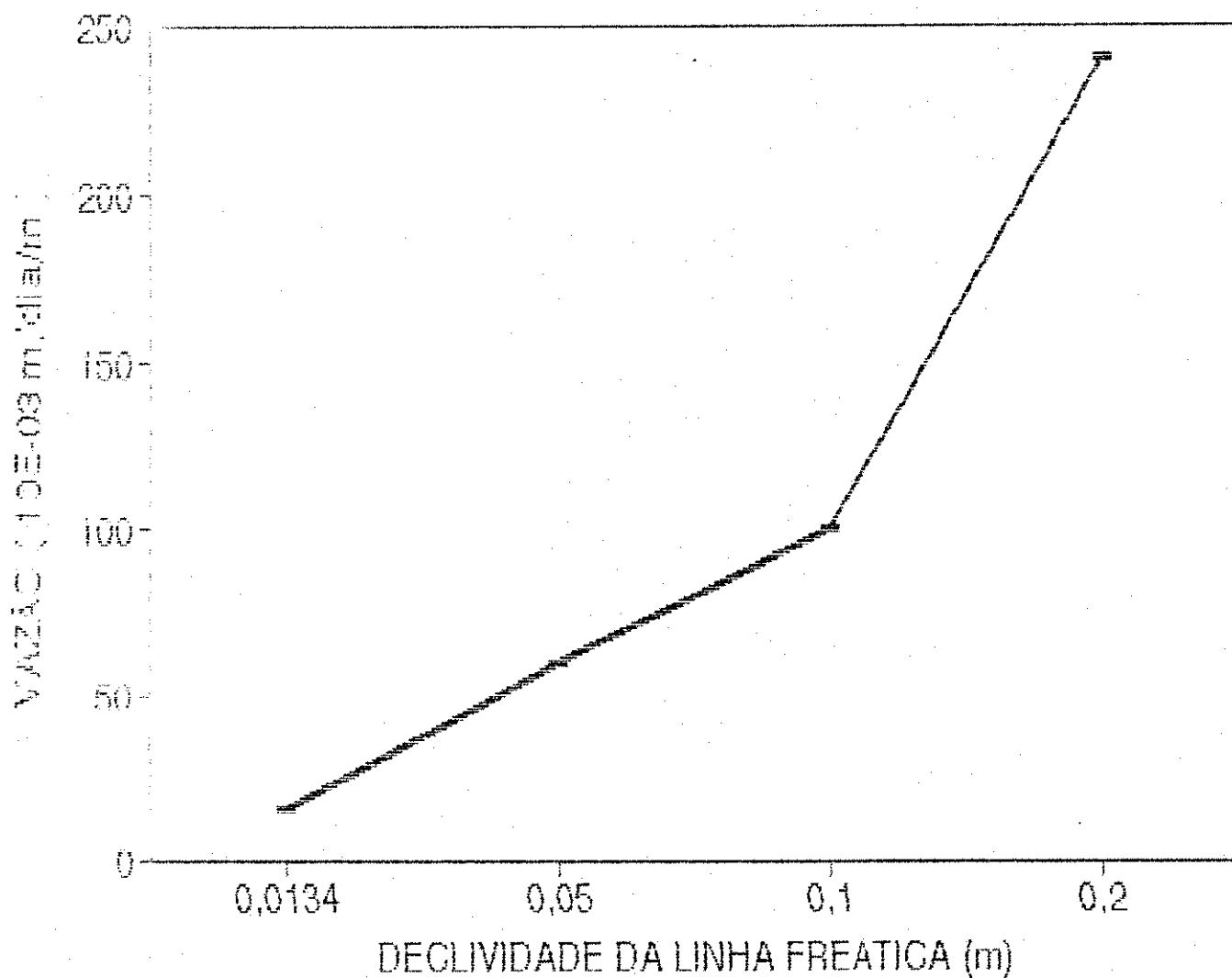


TABELA 5.6 Declividade da linha Freática  
em Função da Vazão

Linha (m)	0.0134	0.05	0.1	0.2
Vazão	16.08	60.00	100.00	240.00

FIG.5.6 Declividade da Linha Freática  
Versus Vazão

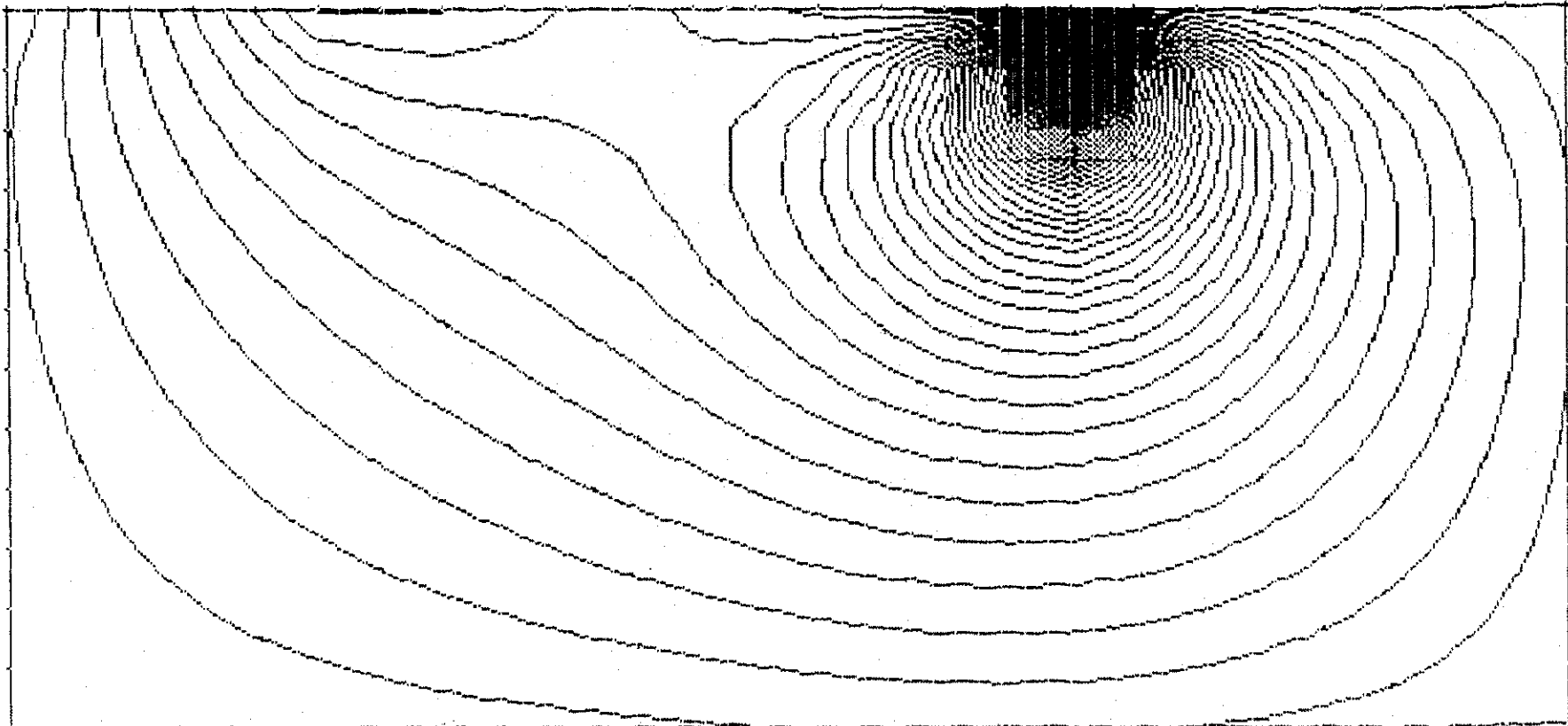


0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.8.1 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )

100.4 metros

101.4 metros



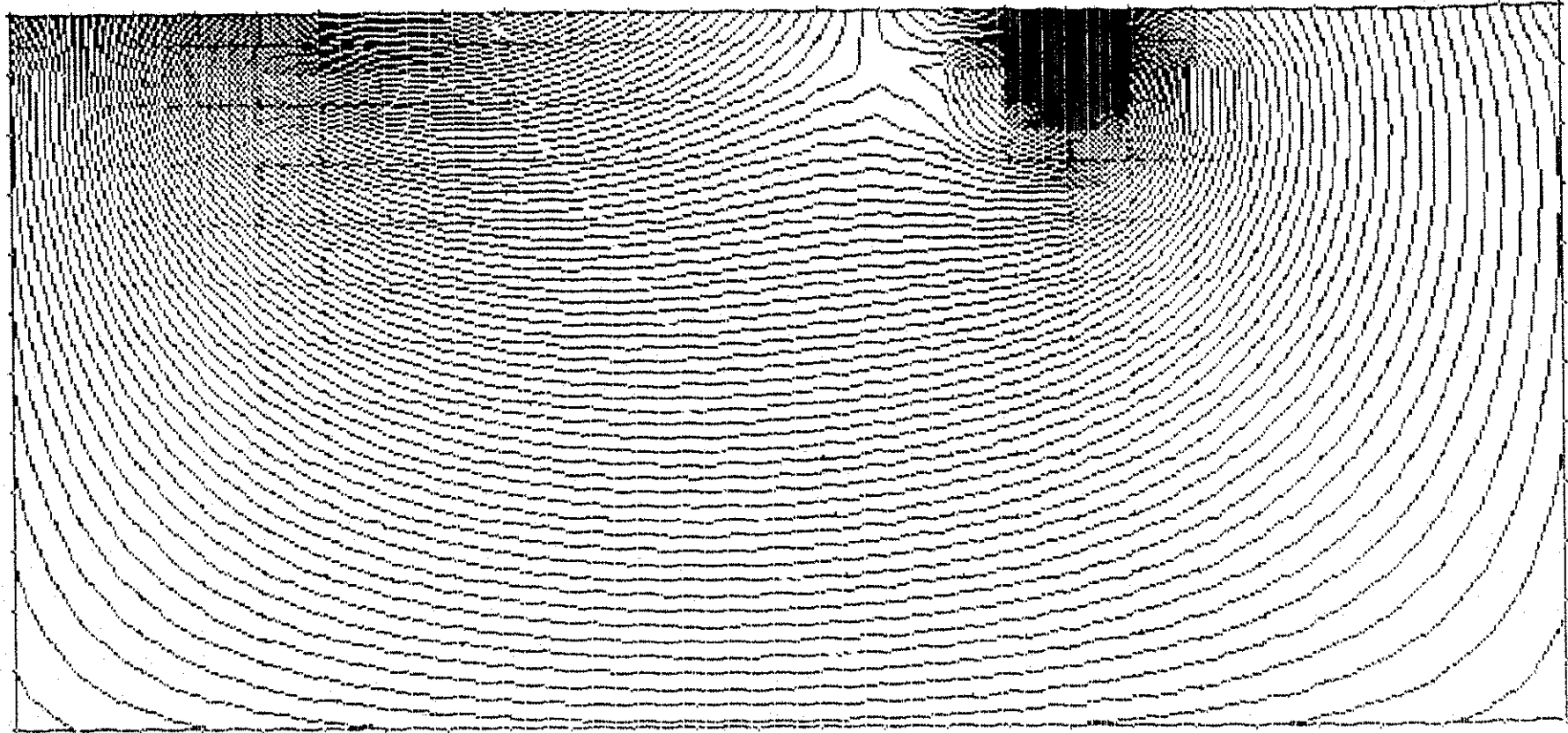
$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=19

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

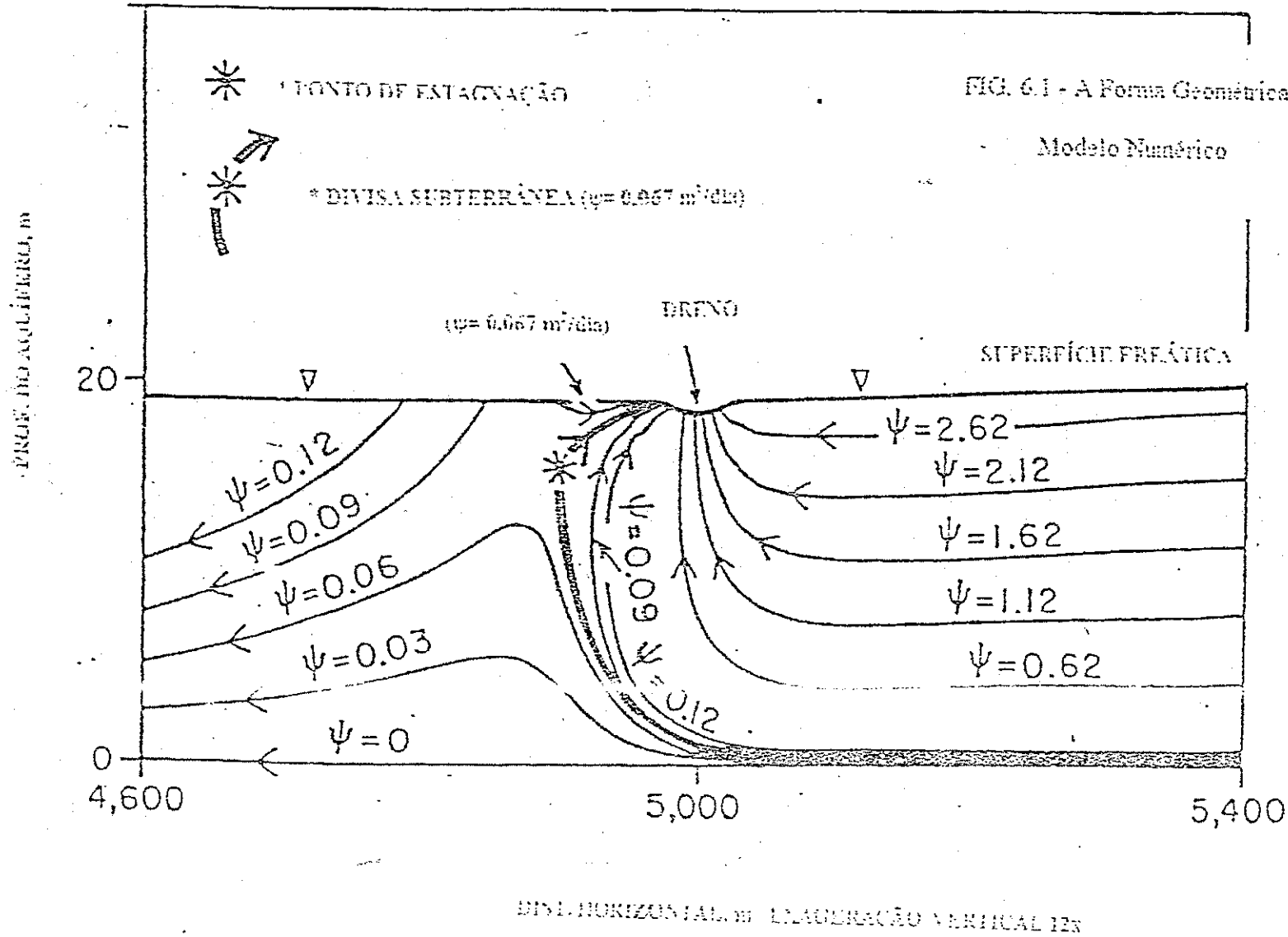
FIG. 6.8.2 Declividade da Linha Freática ( $m=0.1$ )

100.4 metros

101.4 metros

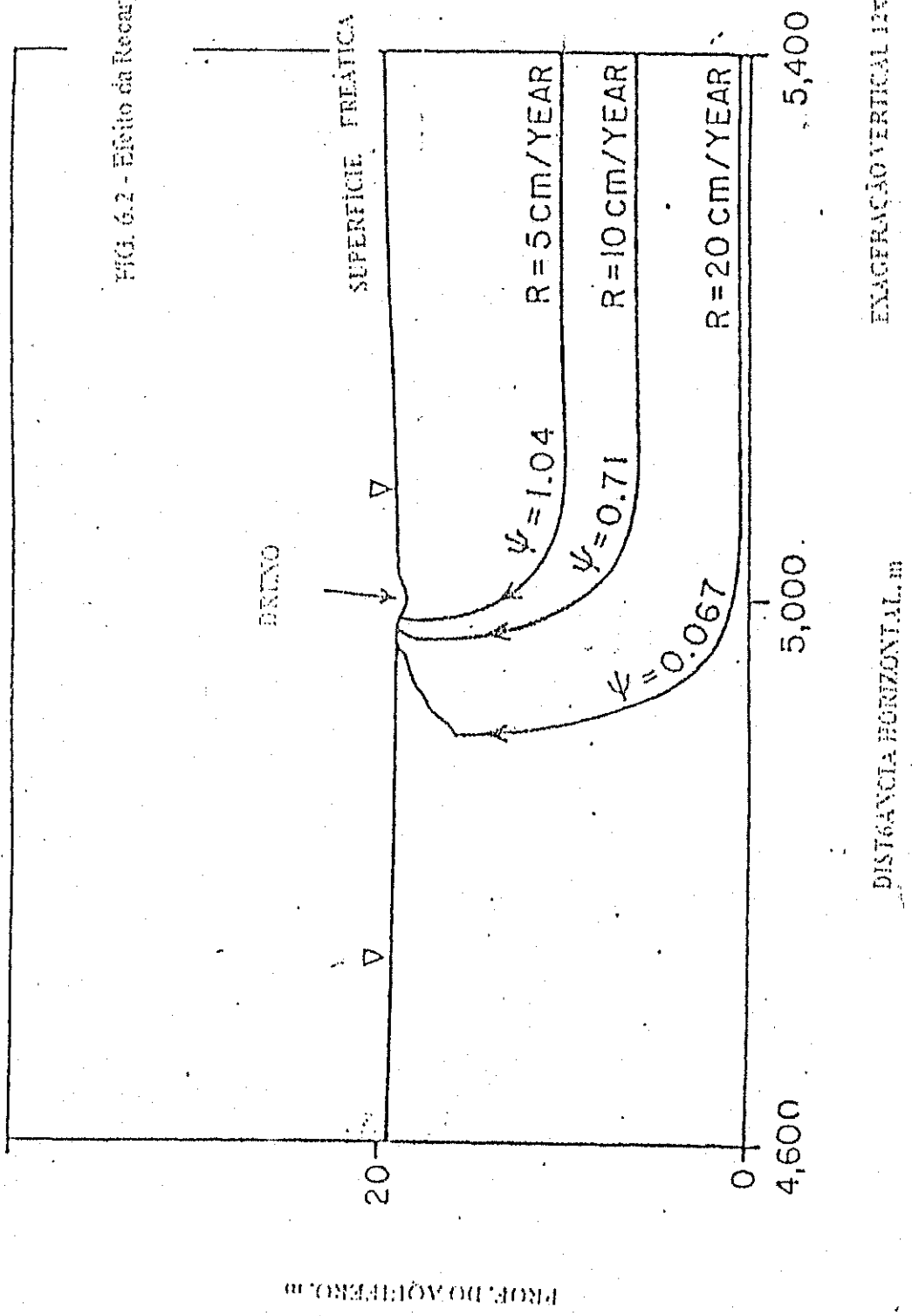


$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=19

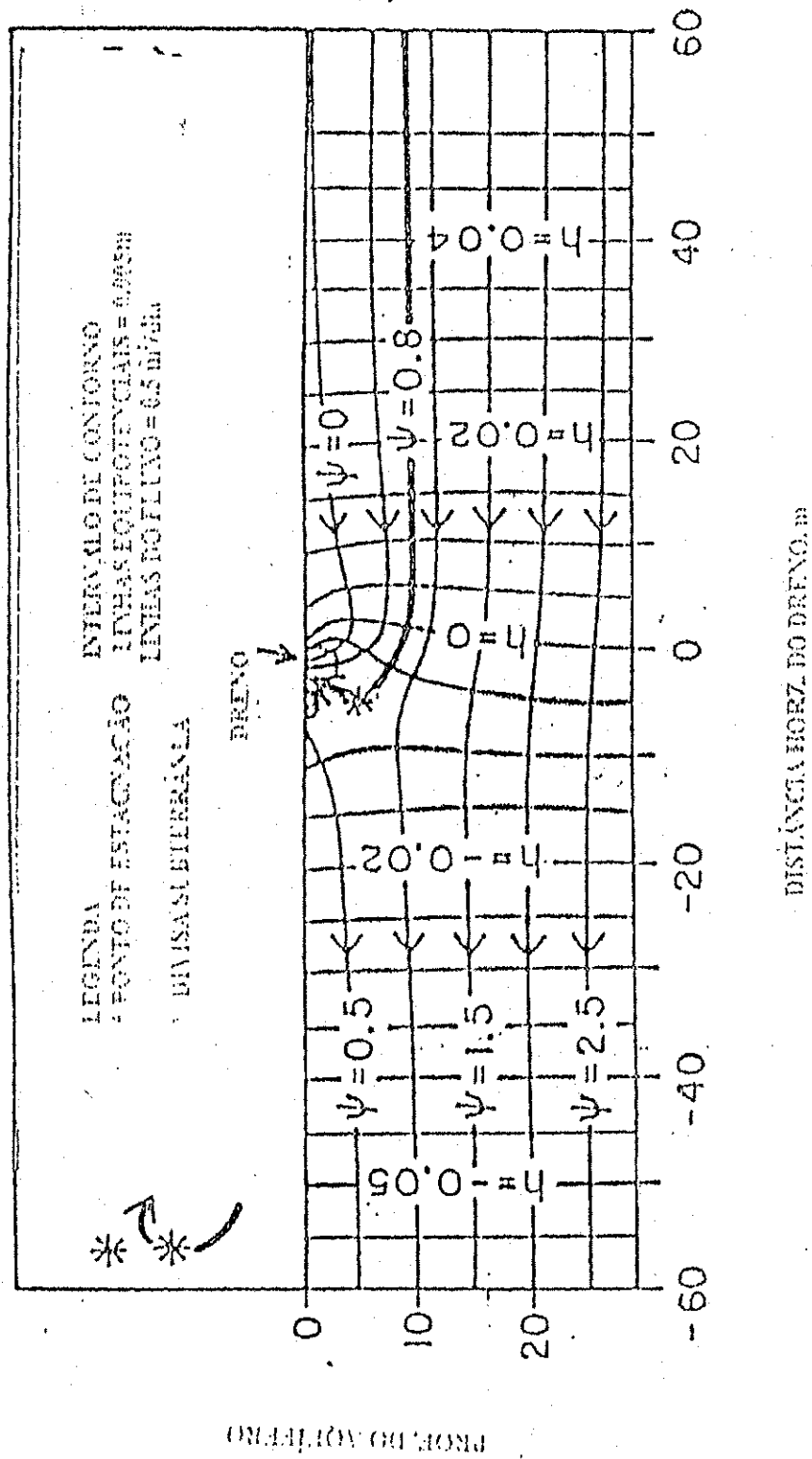


A FORMA GEOMÉTRICA DAS LINHAS DO FLUXO PELO MODELO NÚMÉRICO. OS INTERVALOS USADOS PARA AS LINHAS DO FLUXO SÃO DIFERENTES

FIG. 6.2 - Efeito da Recarga Sobre a Divisa Subterrânea



EFEITO DA RECARGA SOBRE A DIVISA SUBTERRÂNEA NESTES CASOS  $K_v = 80 \text{ cm/dia}$ , A LARGURA DO DRENO = 95m, A DIMENSÃO DE  $\psi$  É DIMEN

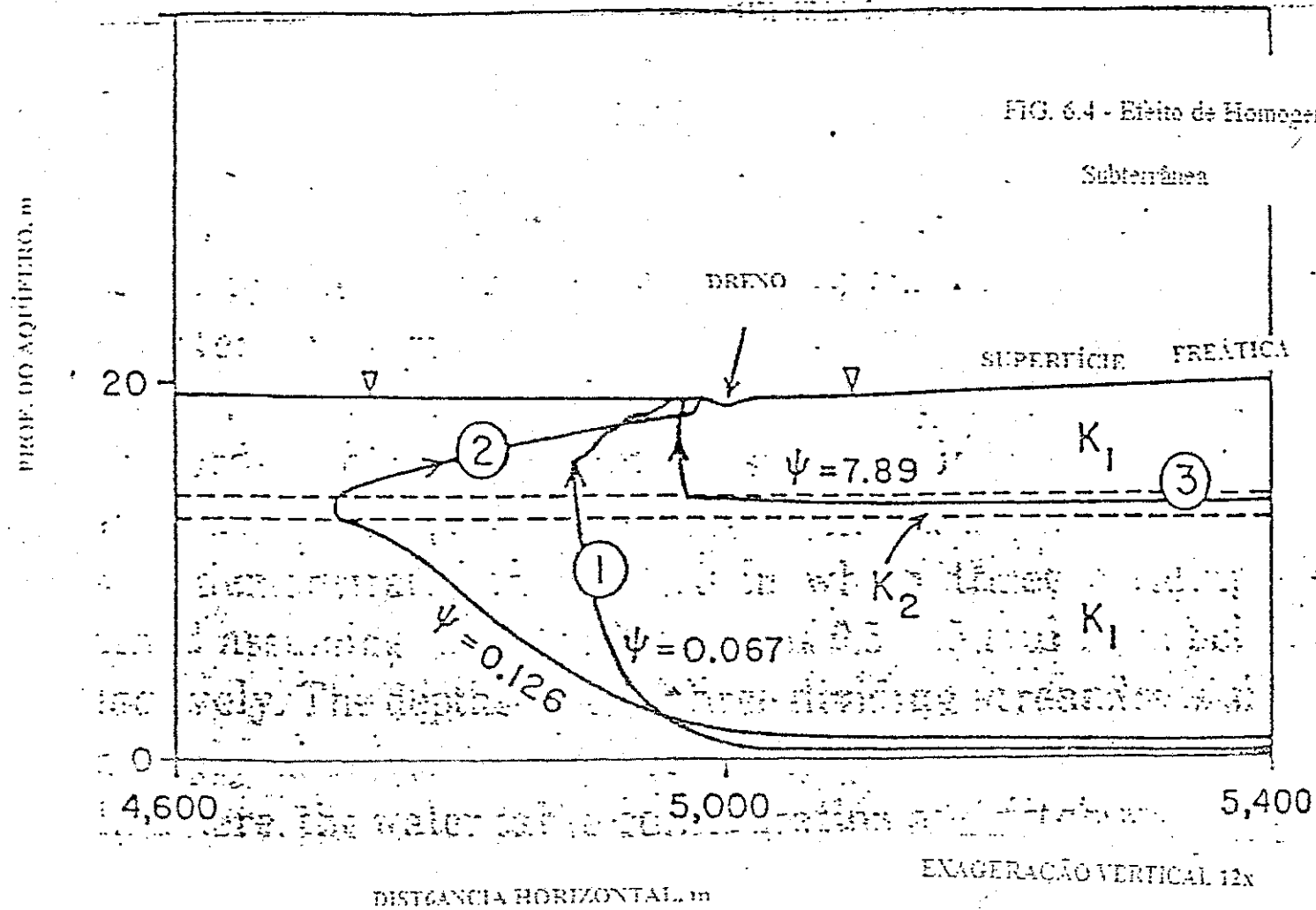


REDE DO FLUXO E DIVISA CALCULADA USANDO A SOLUÇÃO ANALÍTICA

FIG. 6.3 - Rede de Fluxo e Divisa Calculada Usando a

Solução Analítica

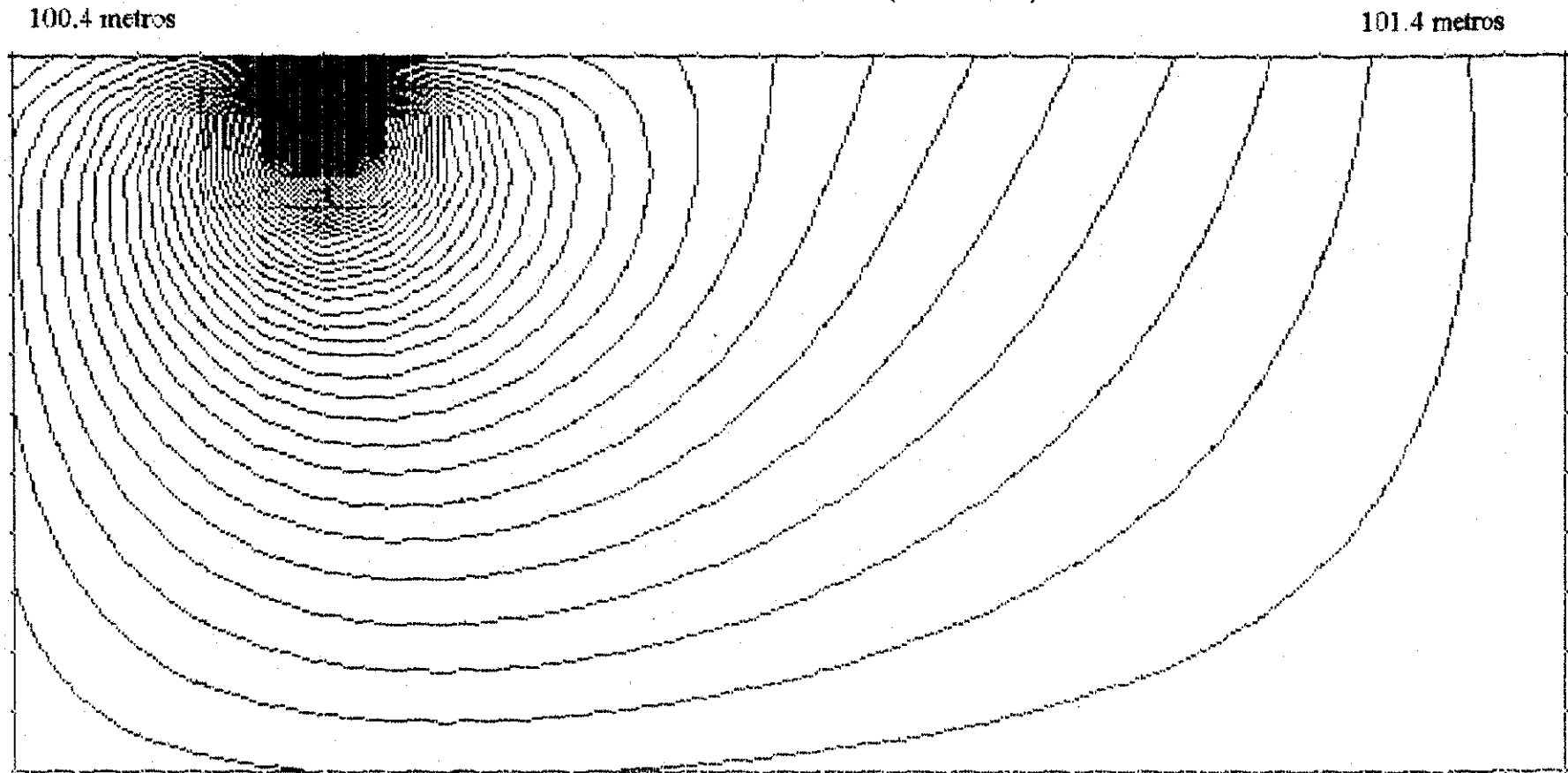




-EFEITO DE HOMOGENEIDADE SOBRE A DIVISA SUBTERRANEA. AS LINHAS 1, 2 e 3 REPRESENTAM AS DIVISAS SUBTERRANEA PARA OS CASOS 1, 2 e 3. NO CASO 1, O AQUIFERO É HOMOGENEO ( $K_1=K_2$ ). A DIMENSÃO DE  $\psi$  É  $m^2/dia$

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

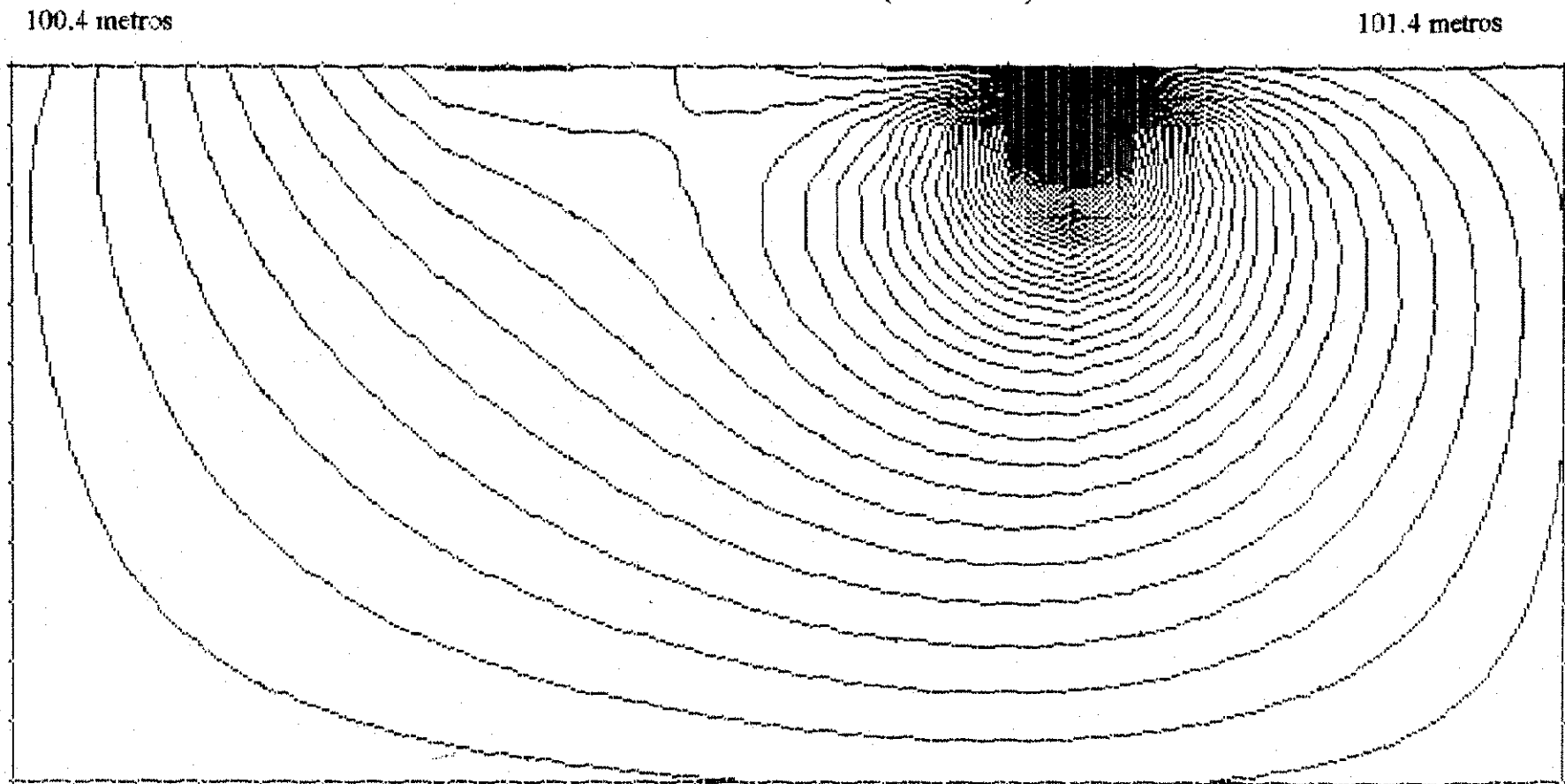
FIG. 6.5.1 Declividade da Linha Freática ( $m = 0.0134$ )



$K_{matiz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=7

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

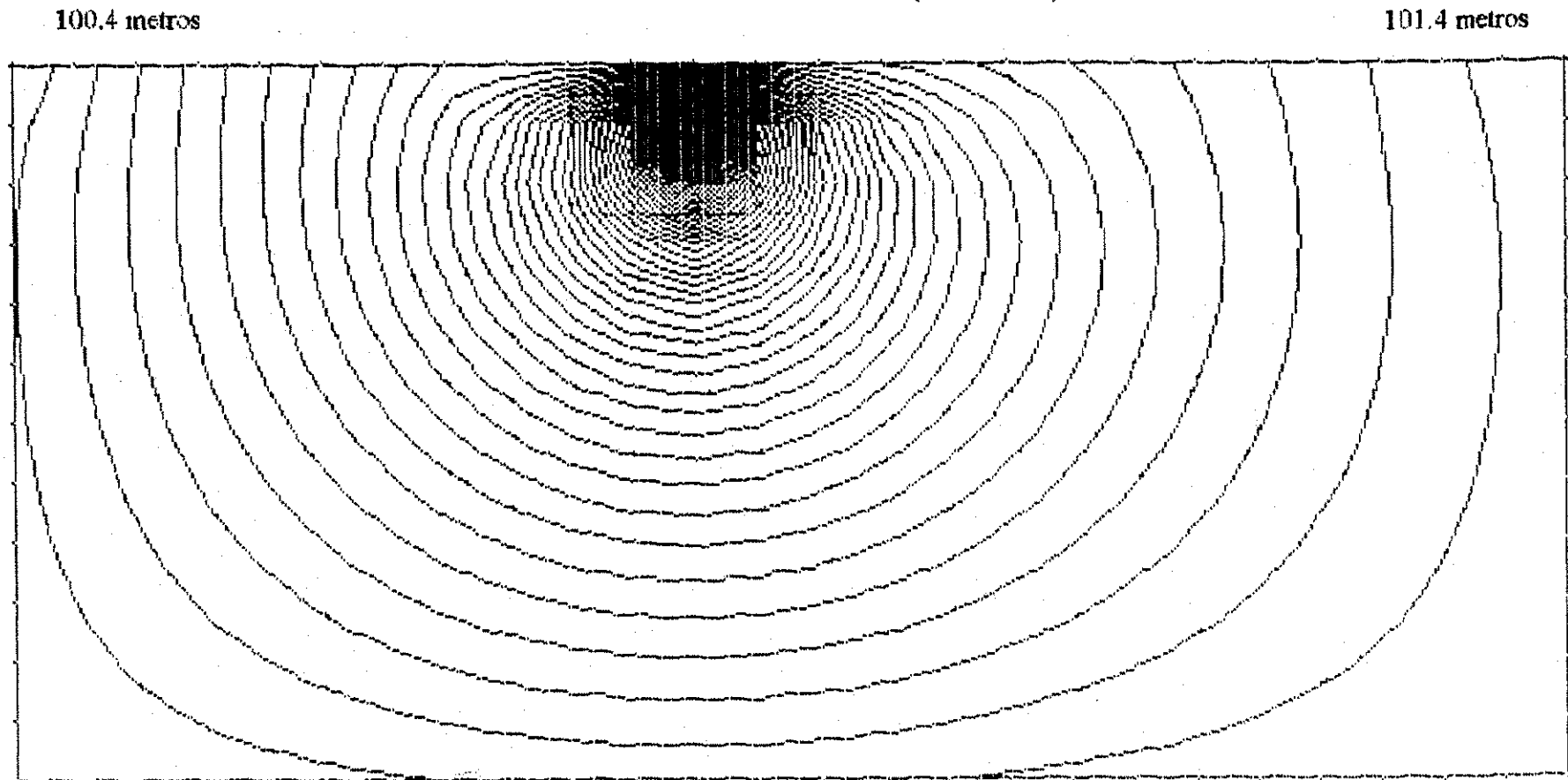
FIG. 6.5.3 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )



$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=19

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.5.2 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )



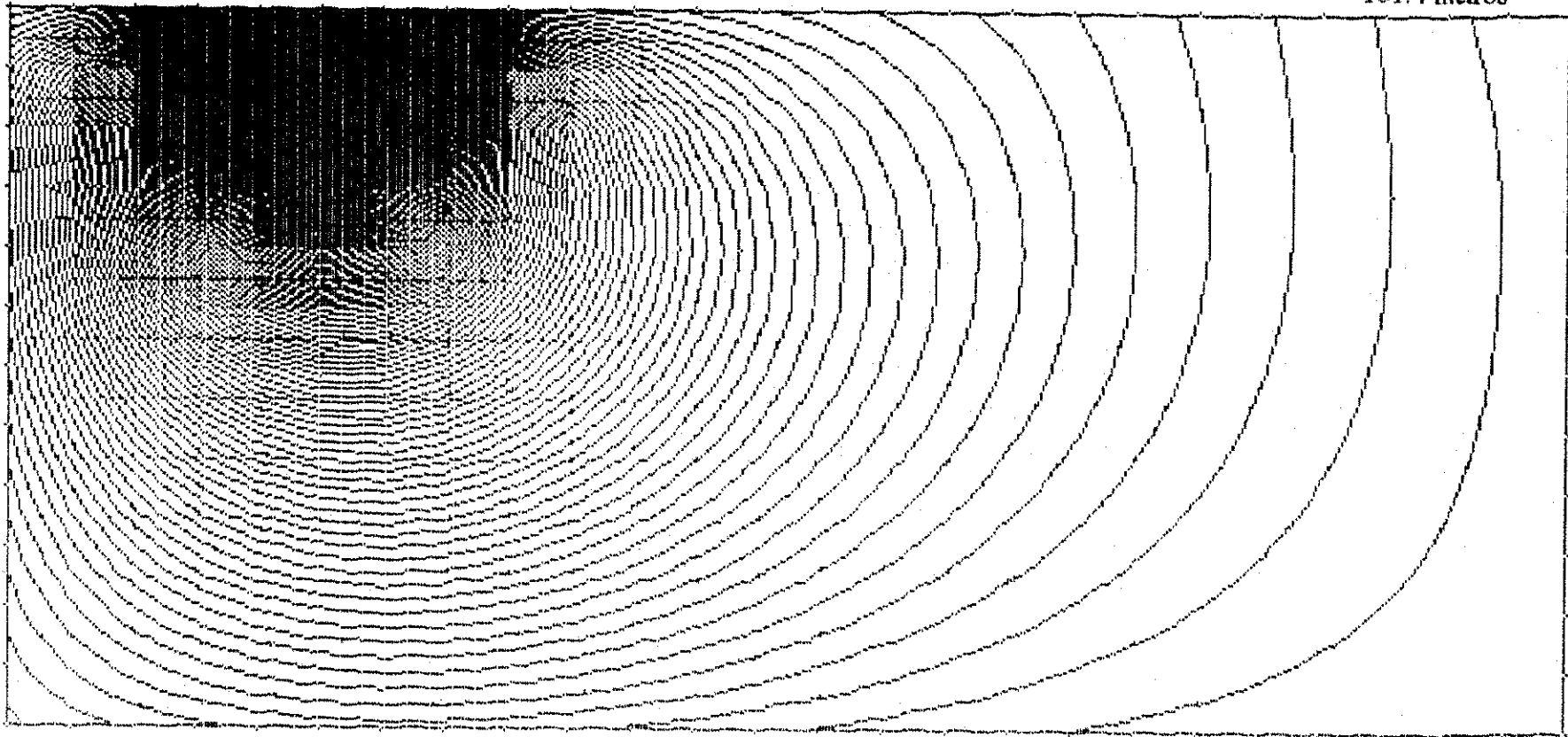
$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=13

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.6.1 Declividade da Linha Freática ( $m = 0.0134$ )

100.4 metros

101.4 metros



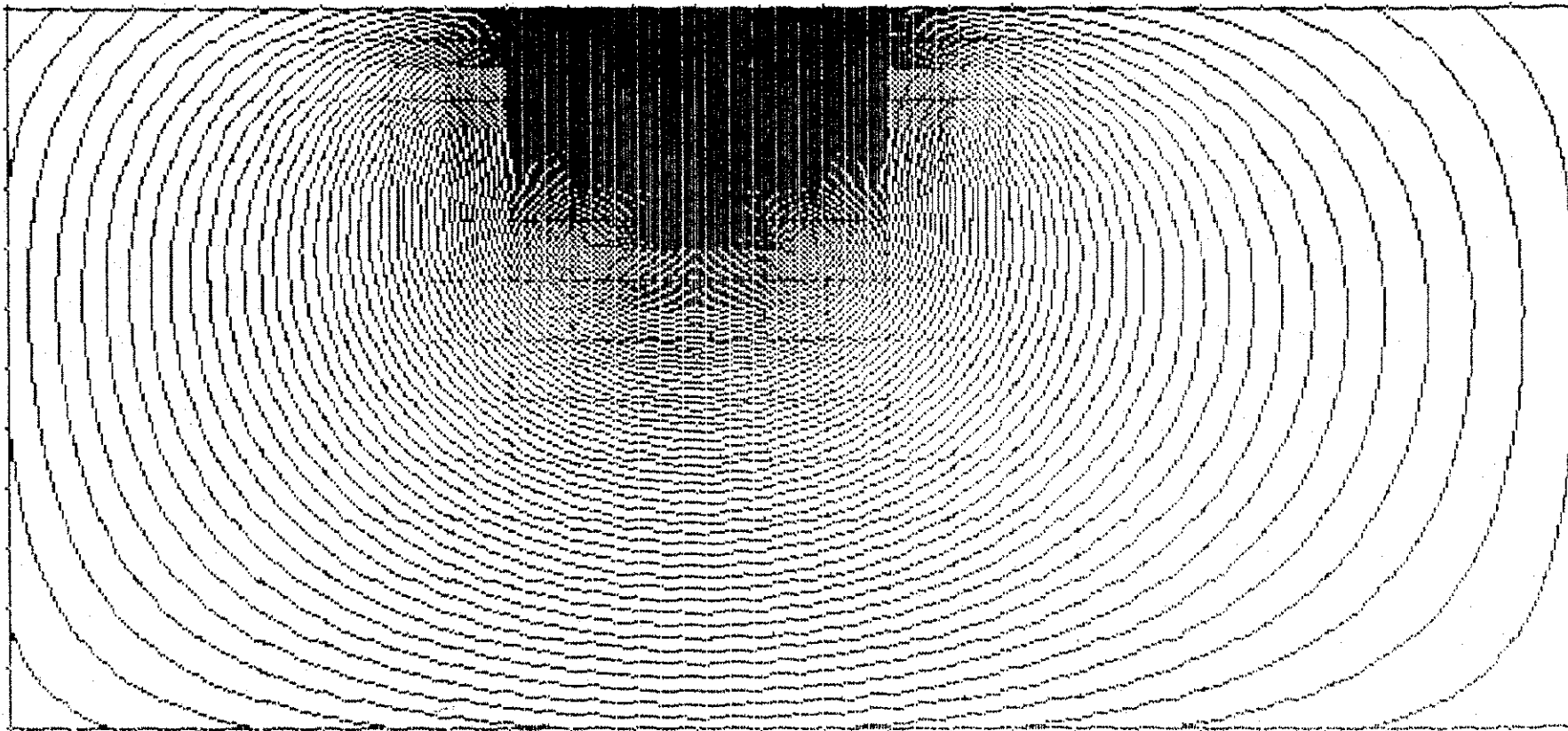
$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 185 metros  
Localizada em I=7

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.6.2 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )

100.4 metros

101.4 metros



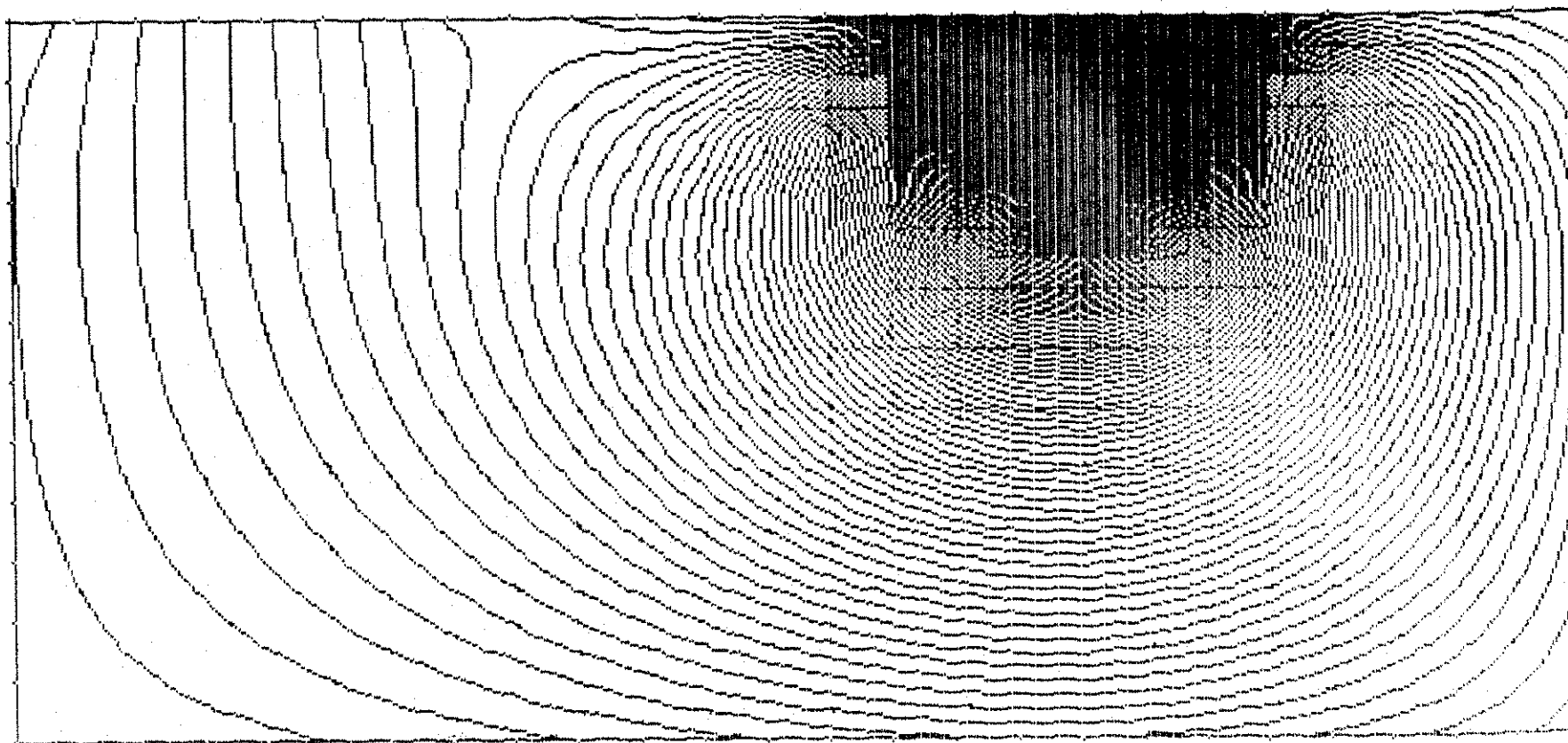
$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 185 metros  
Localizada em I=13

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.6.3 Declividade da Linha Freática ( $m = 0.0134$ )

100.4 metros

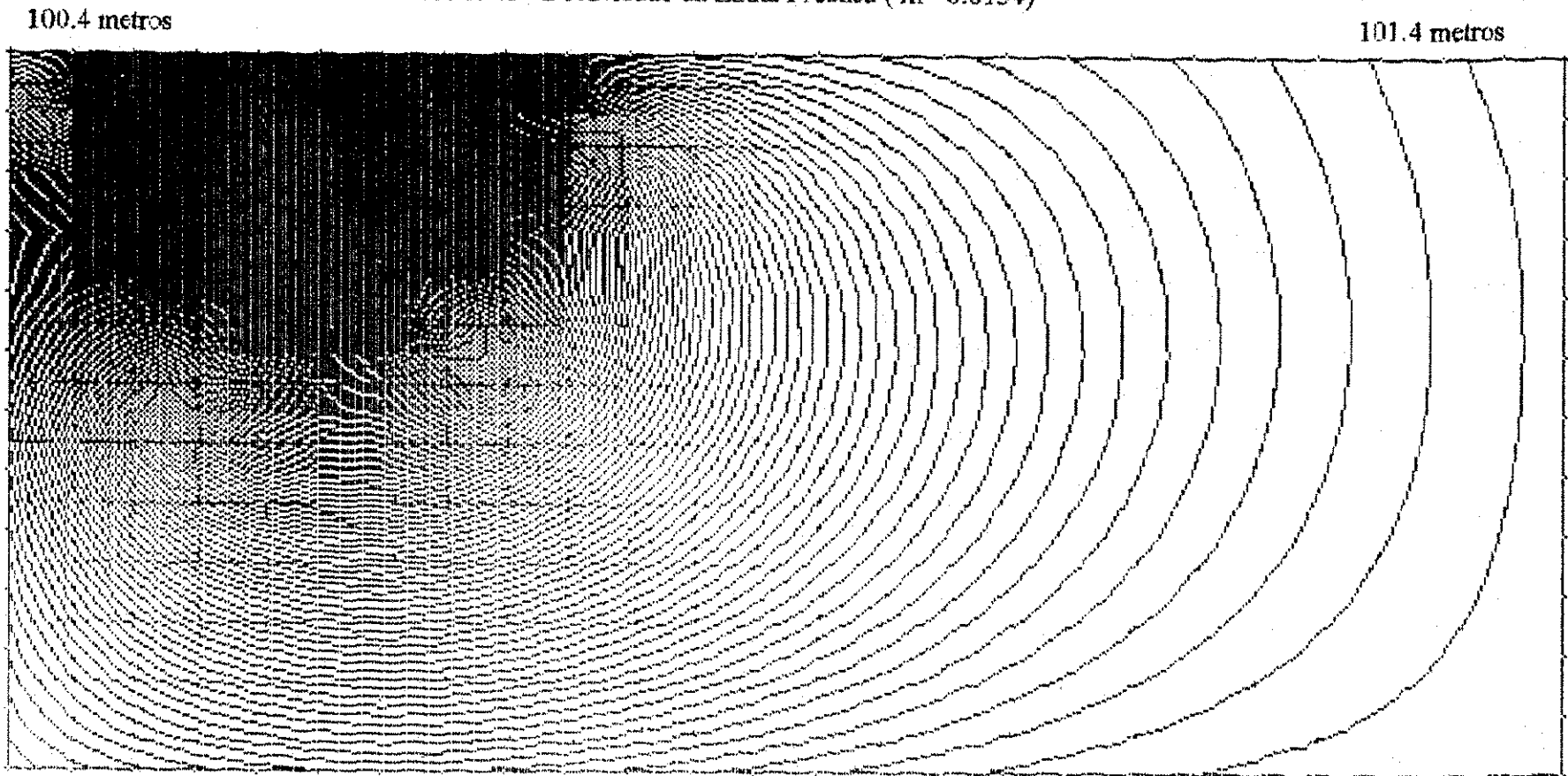
101.4 metros



$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 185 metros  
Localizada em I=19

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.7.1 Declividade da Linha Freática ( $m = 0.0134$ )



$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 250 metros  
Localizada em I=7

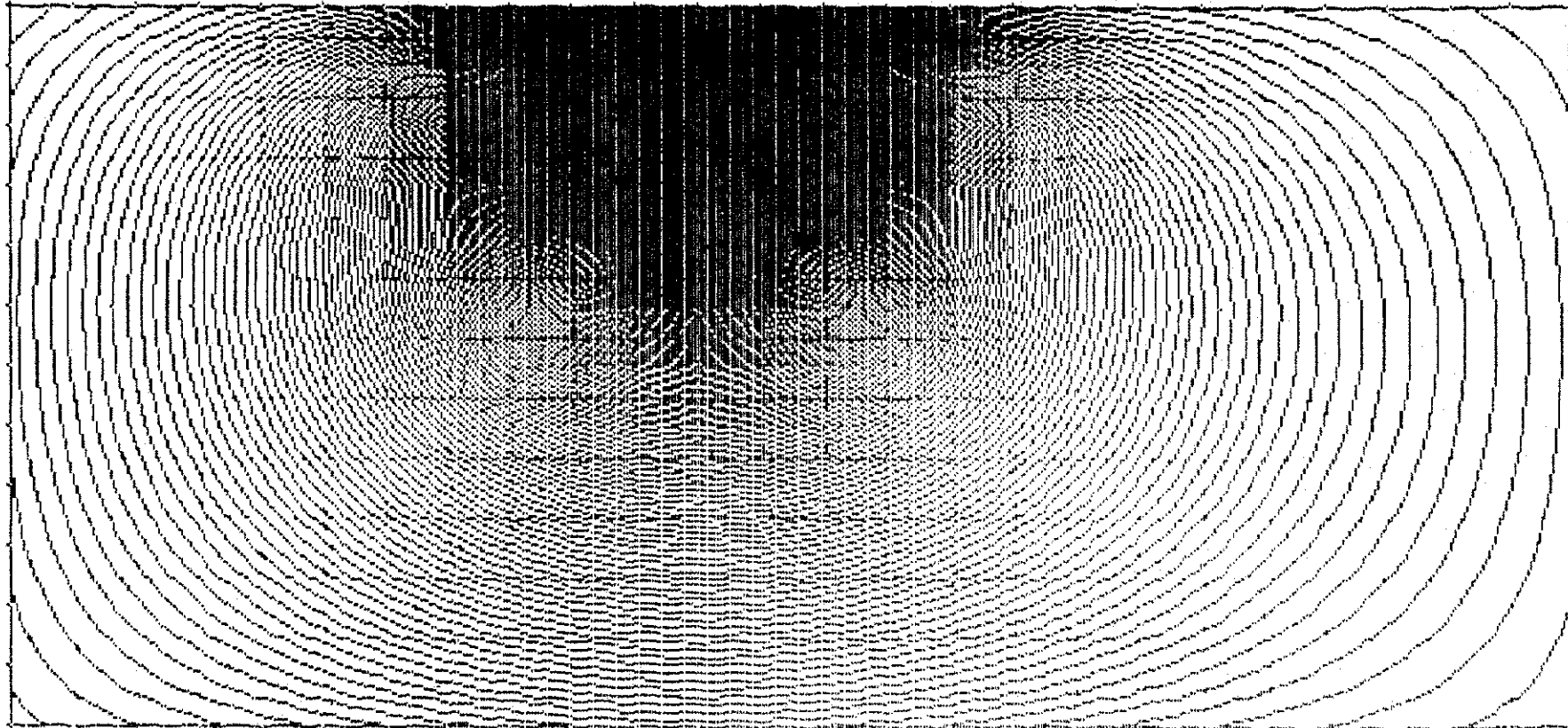


0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.7.2 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )

100.4 metros

101.4 metros



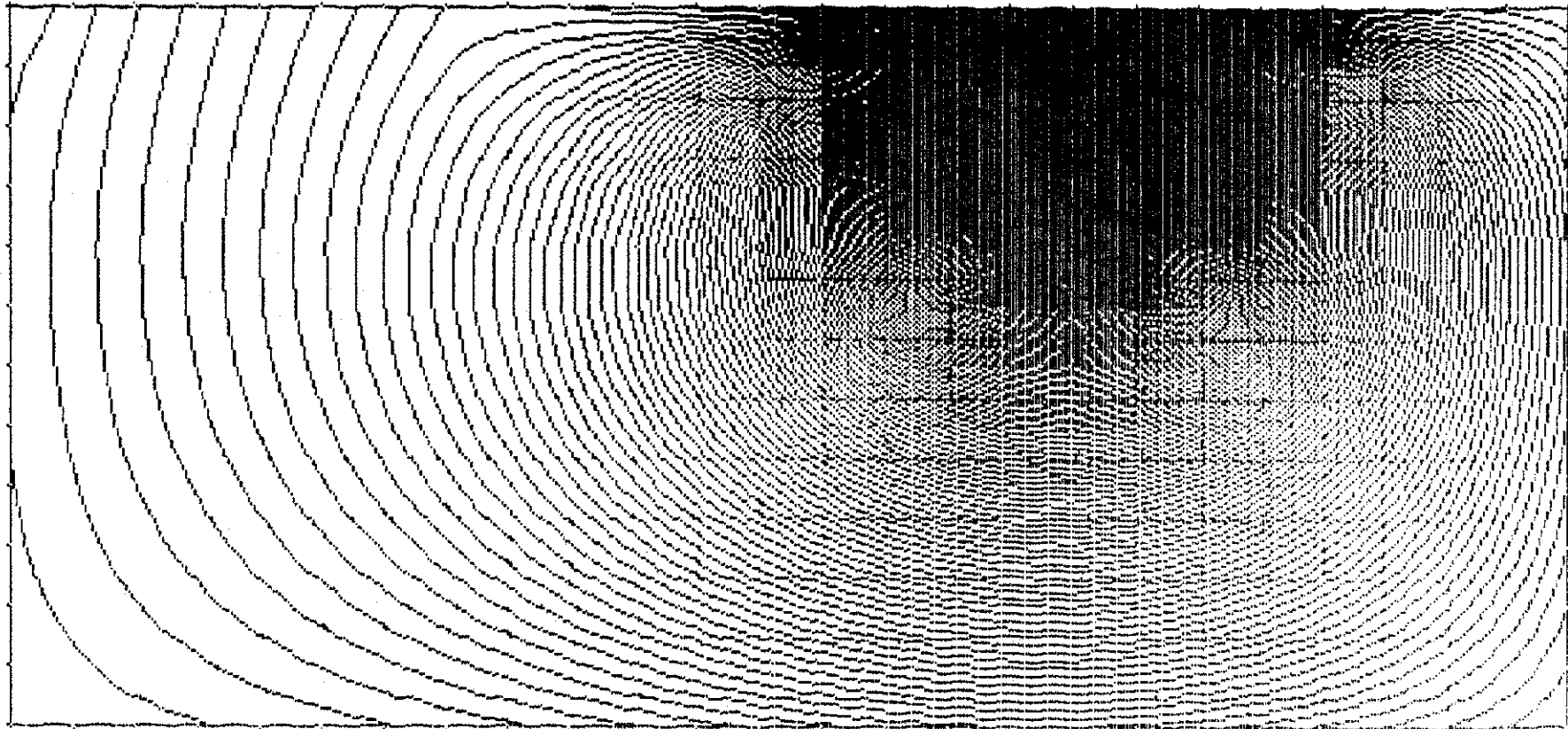
$K_{\text{matriz}} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 250 metros  
Localizada em I=13

0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
0.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.7.3 Declividade da Linha Freática ( $m=0.0134$ )

100.4 metros

101.4 metros



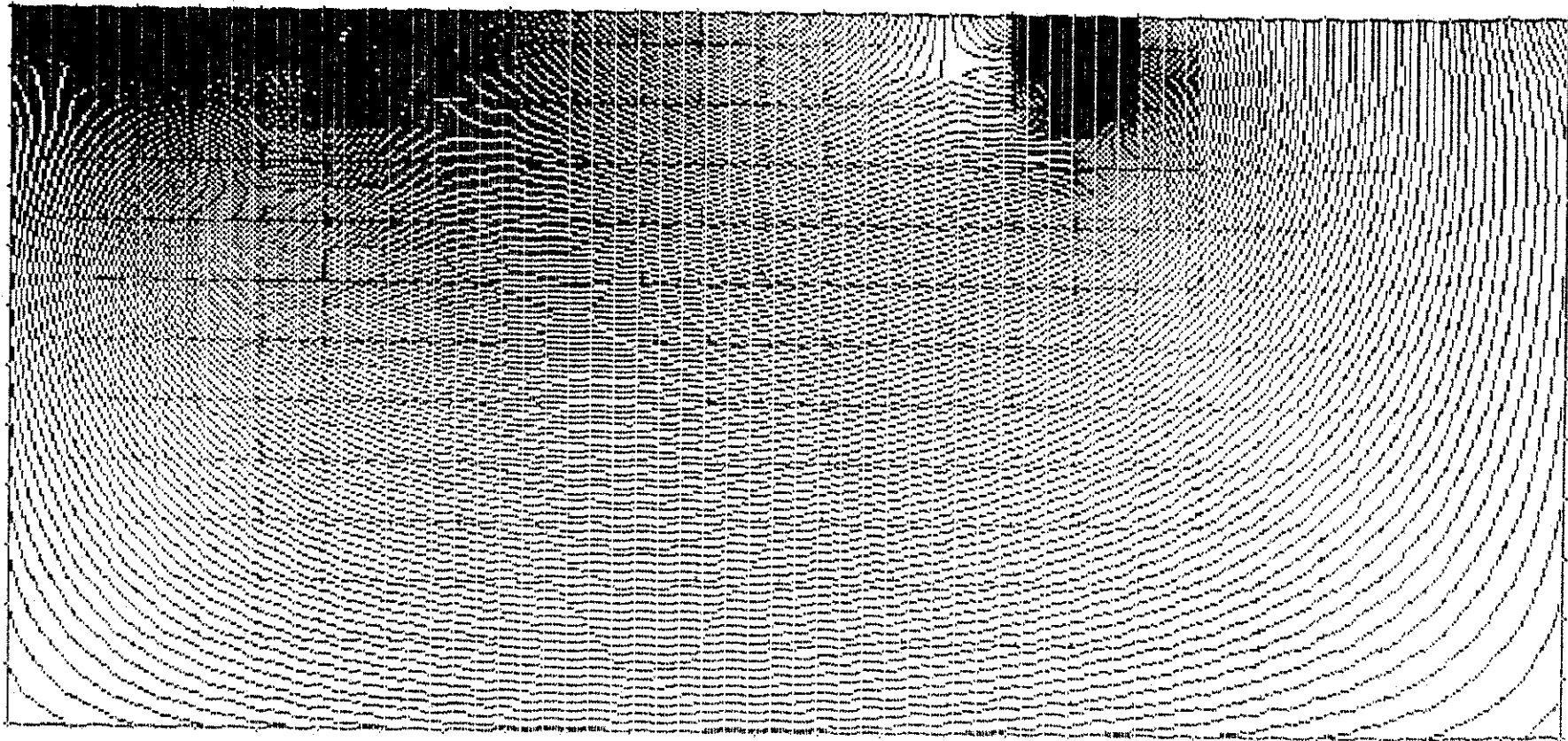
$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 250 metros  
Localizada em I=19

0 1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO  
6.1 ENTRE COM O VALOR DO INCREMENTO

FIG. 6.8.3 Declividade da Linha Freática ( $m=0.2$ )

100.4 metros

101.4 metros



$K_{matriz} = 1.0$   
Matriz 14x28 (13x25 Espaços)  
Recarga = 120 metros  
Localizada em I=19

**ANEXO VIII**

**SISTEMAS ANISOTRÓPICOS E A TEORIA DA REFRAÇÃO  
DAS LINHAS DO FLUXO NOS SISTEMAS COM MULTI-CAMADAS**  
(segundo HUBBERT, 1940, Bear & Dagan, 1965)

## ANEXO VIII

SISTEMAS ANISOTRÓPICOS E A TEORIA DA REFRAÇÃO  
 DAS LINHAS DO FLUXO NOS SISTEMAS COM MULTI-CAMADAS  
 (segundo HUBBERT, 1940, Bear & Dagan, 1965)

No meio poroso homogêneo mas anisotrópico, a construção da rede do fluxo é complicada, devido ao fato que as linhas do fluxo e as equipotenciais não terão intercessão ortogonal. Massland (1957) and Bear and Dagan(1965) e Liakopoulos (1965) forneceram extensivamente a teoria pertencente estes fenômenos . Este envolve a construção das redes do fluxo na seção transformada. No fluxo bi-dimensional, no meio homogêneo e anisotrópico com as principais permeabilidades  $K_x$  e  $K_y$  nas duas direções  $x$  e  $y$ , o elipse de permeabilidades será mostrada nas Fig 1, 2 e 3, com os semi-eixos  $\sqrt{K_x}$  e  $\sqrt{K_y}$  respectivamente.

As regiões transformada do fluxo poderão ser relacionadas como abaixo:

$$X=x \text{ e } Z= z (\sqrt{K_x} / \sqrt{K_y})$$

Para  $\sqrt{K_x} > \sqrt{K_y}$ , esta transformação se aumenta na escala vertical na região do fluxo. Consequentemente, se expandirá o elipse de permeabilidade só está na Fig. 1.

A Lei de Tangentes que vale para o Fenômeno da Refração foi mostrada na Fig. 4. Com dados na mão sobre os valores de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $\theta_1$ , o valor de  $\theta_2$  poderá ser avaliado facilmente. A Fig. 5 representa o caso para  $K_1/K_2 = 10$ .

A Fig. 4. representa o influxo ou a entrada do fluxo  $Q_1$  e a saída do fluxo  $Q_2$  de acordo com a Lei de Darcy. A equação de Continuidade diz que  $Q_1$  deve ser igual a  $Q_2$ .

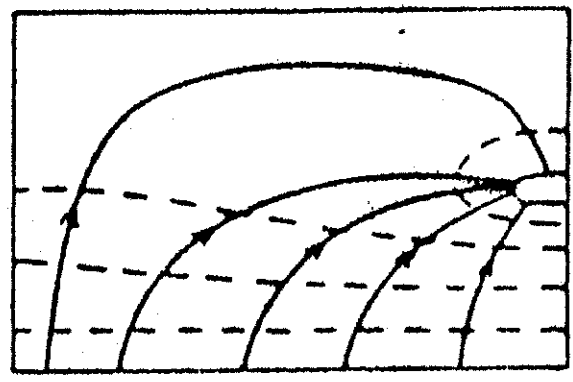
Assim, temos:  $K_1 a \frac{dh}{dl_1} = K_2 c \frac{dh}{dl_2}$

$$e \quad K_1/K_2 = \tan \theta_1 / \tan \theta_2$$

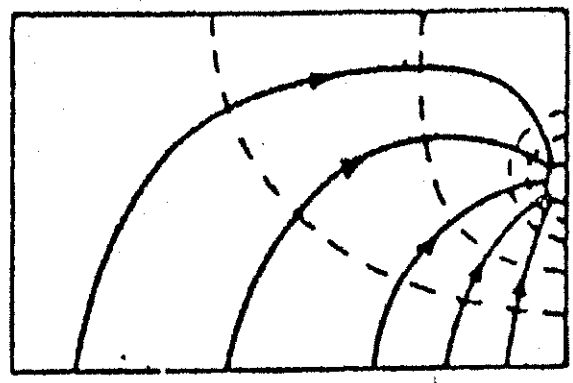
Assim, a teoria sobre refração foi usada na confecção dos gráficos das linhas do fluxo que entram os drenos interceptores. Ver as varias figuras do anexos VII referente ao Capítulo 4.

Fig 1 A Rede do Fluxo para  $\sqrt{K_x}$  e  $\sqrt{K_y}$  a) 1/2 b) 1 c) 4 (segundo Massland, 1957)

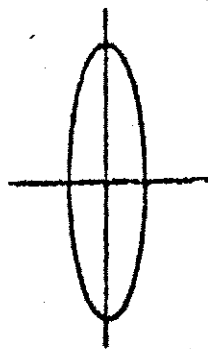
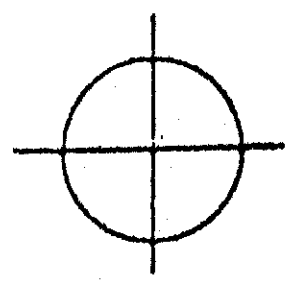
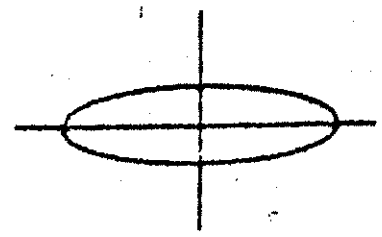
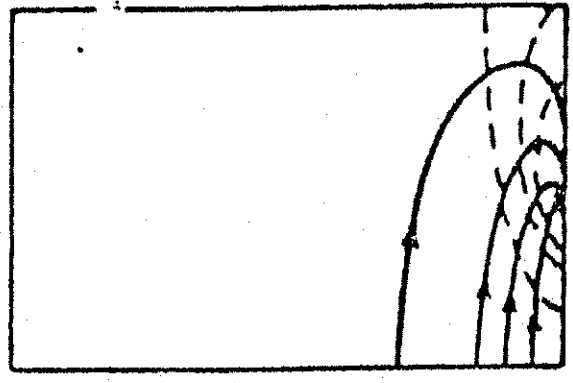
(c)



(b)



(a)



$$K' = \sqrt{K_x \cdot K_z}$$

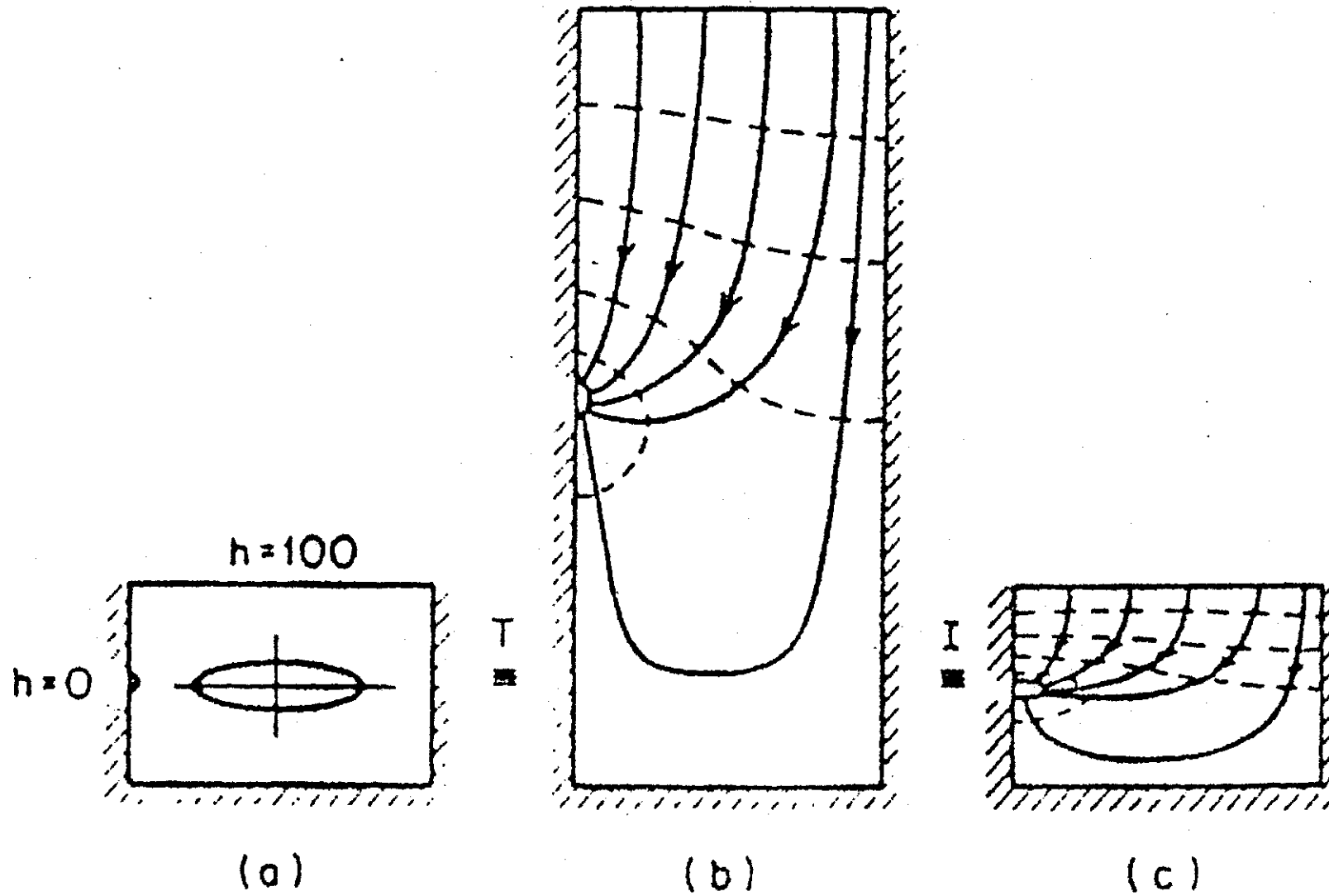
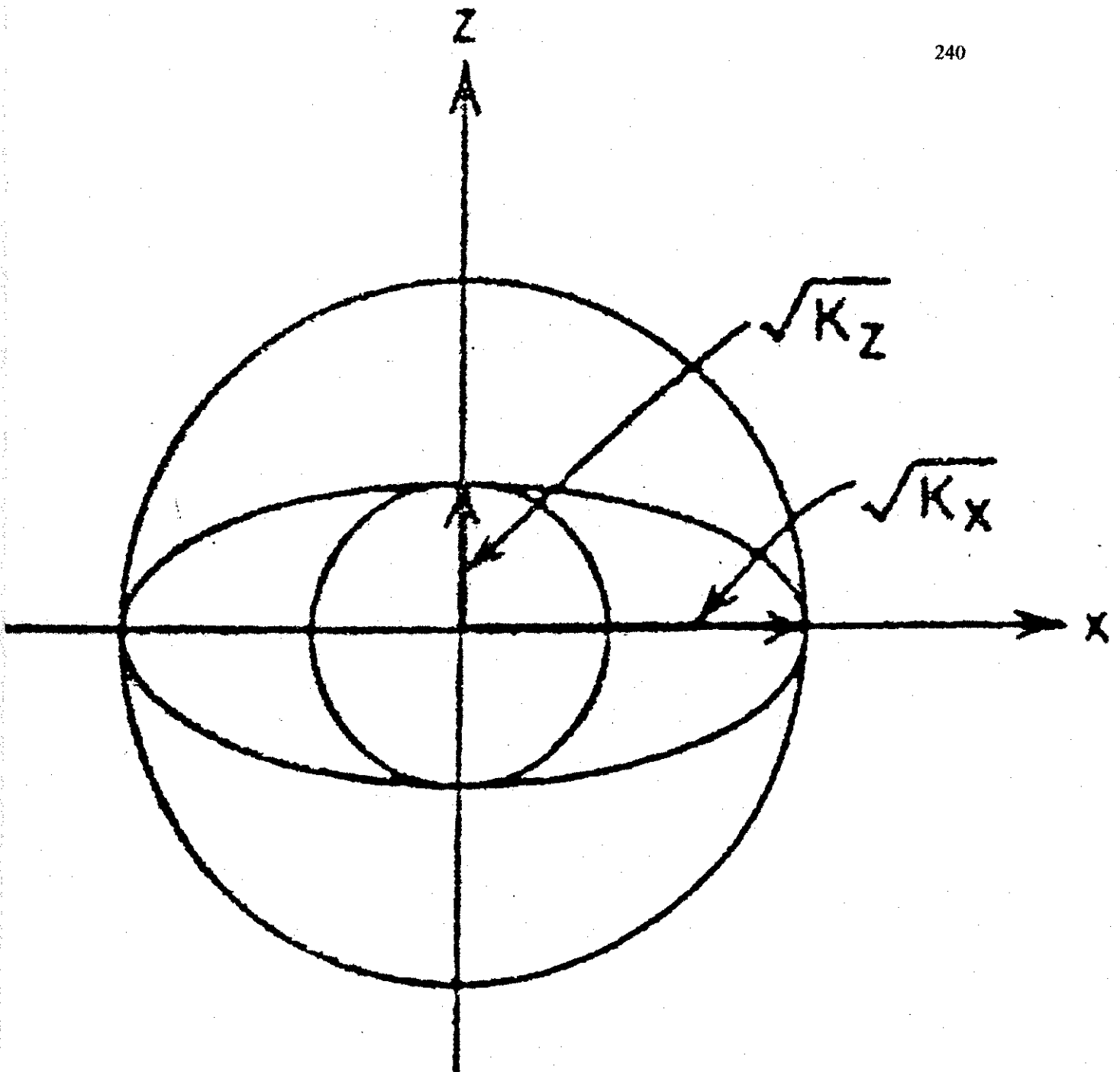


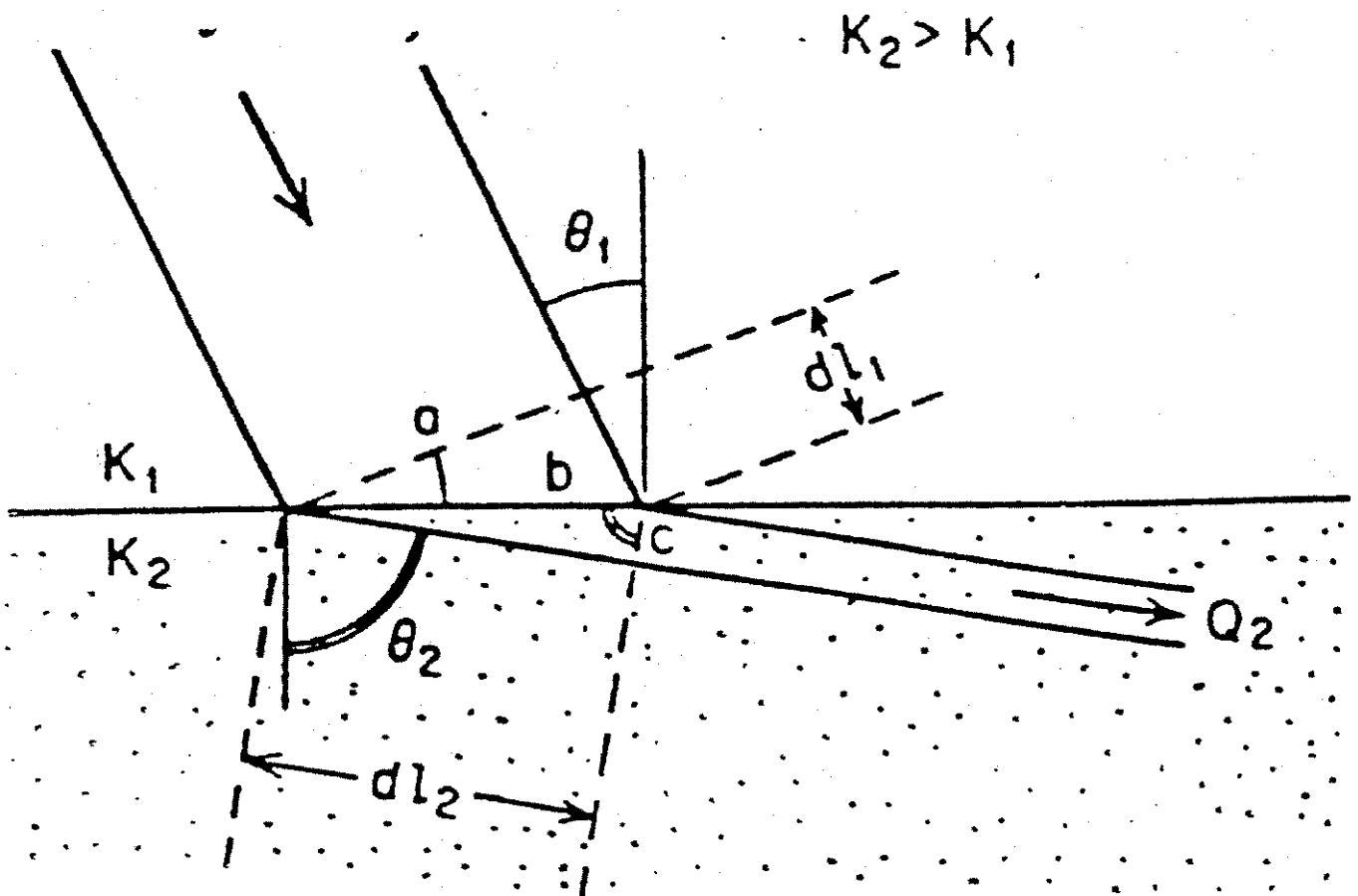
Fig 2 a: Fluxo na Região Homogênea e Anisotrópica  $z$  ( $\sqrt{K_x} / \sqrt{K_y} = 4$ )  
 b: A Secção Isotrópica Transformada  
 c: A Rede do Fluxo na Secção Anisotrópica Atual.  
 ( T= Transformação I= Inversão )





$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

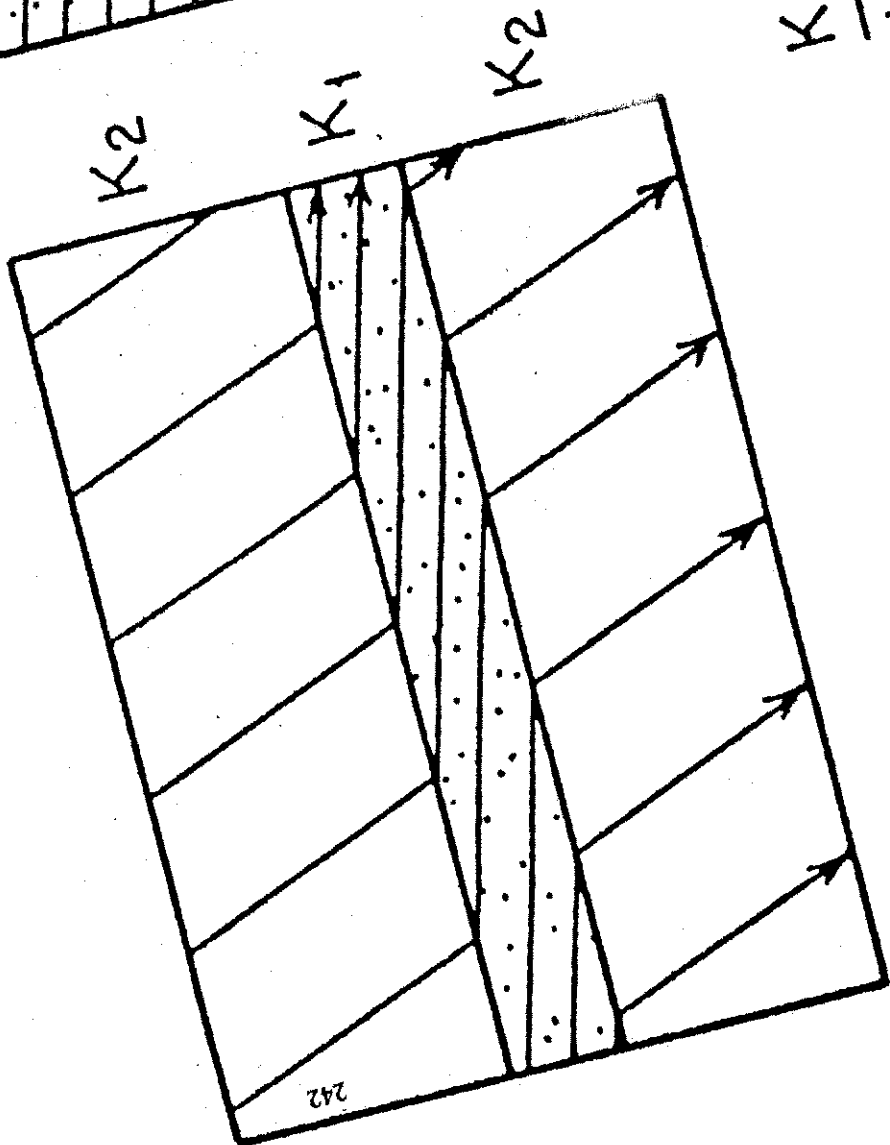
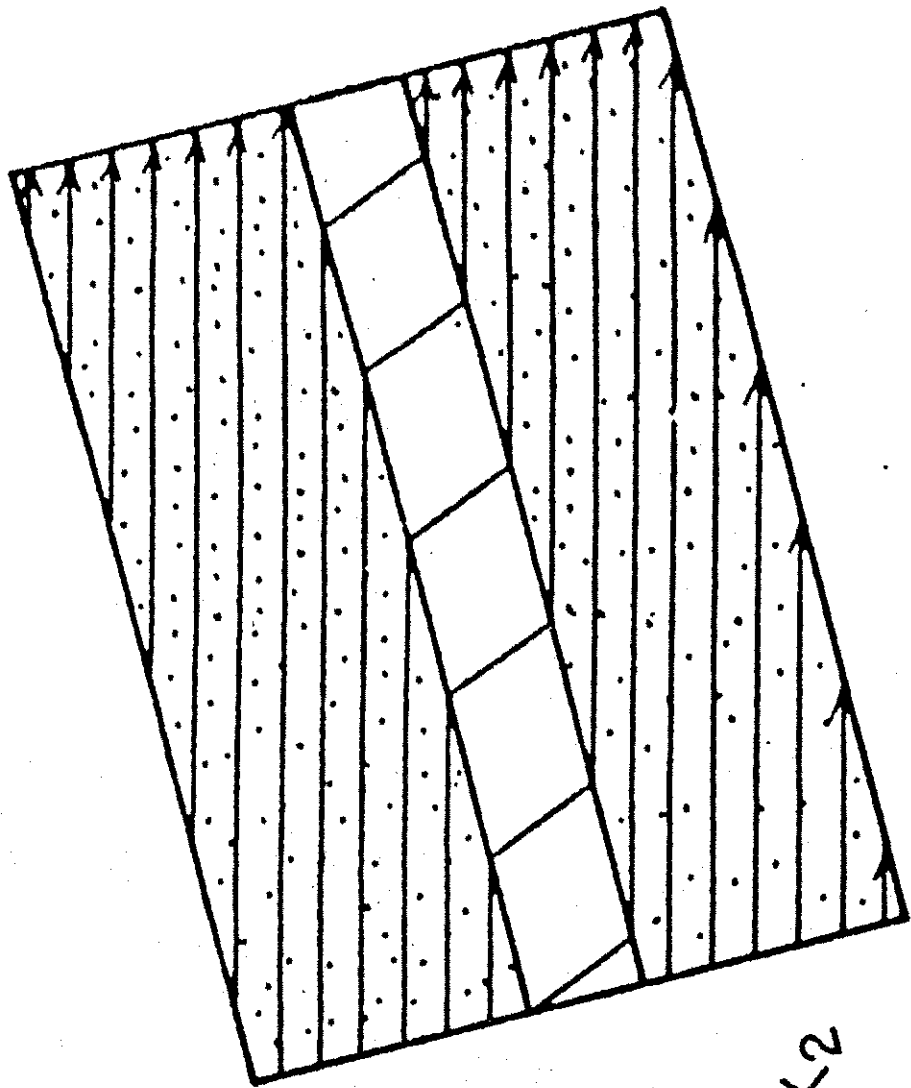
Fig 3 A Elipse de Permeabilidade do Meio Anisotrópico no Meio Poroso com  $z$   
 $K_x / K_y = 5.0$  O Circulo Representa as duas Possibilidades de  
 Transformação Isotrópica.



$$K_1 a \frac{dh_1}{dl_1} = K_2 c \frac{dh_2}{dl_2}$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$

Fig. 4 Representação Gráfica da Teoria de Refração Próximo a Uma Margem.



$$\frac{K_1}{K_2} = 10$$

Segundo

Fig. 5 Refração das Linhas do Fluxo no Sistema Multi-Camadas (Hubbert, 1940)