

# **ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO ALUVIAL DE SÃO GONÇALO ( PB )**

**P.Audry\* , M.M.F. de Quelroz\*\*\* , F.L. Barreto Filho\*\*\* , H.R. Gheyli\*\***

---

**( \* Pesquisador ORSTOM/CNPq ; \*\* Professor UFPB ; \*\*\* Mestrandos UFPB )**

---

**Trabalho realizado pelo Departamento de Engenharia Agrícola da UFPB  
Campina Grande**

**Financiado pelo PDCT-NE / CNPq-BID ( Projeto PB 42 )**

**Apresentado no XXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo  
23 a 31 de julho de 89 - Recife - PE  
( Sessão de painéis - Trabalho nº 262 )**

---

**Versão por extenso do Painel apresentado no Congresso  
( menos as fotos e o material exposto )**

# APRESENTAÇÃO GERAL

## INTRODUÇÃO - OBJETIVOS.

A primeira finalidade do trabalho é definir a lei  $K(\theta)$  do solo em estudo para utilizá-la em um modelo de simulação numérica (\*) dos processos de salinização e de sodificação nos solos irrigados, pois o módulo de transferência das soluções deste modelo é baseado na lei de Darcy generalizada.

Isto implica várias consequências :

- 1) na fase atual de calibração e adaptação do modelo (\*) :
  - além de definir classicamente a relação  $K(\theta)$  com maior confiabilidade possível ,
  - deve-se estudar a diminuição de  $K$  quando aumenta a proporção de  $\text{Na}^+$  trocável e exprimi-la por uma relação matemática que chamaremos de maneira simplificada relação  $K(\text{Na})$ .

- 2) concomitantemente , deve-se pensar , também , em uma segunda fase , que consistirá em difundir o modelo como instrumento de manejo da irrigação, i.é. para aplicá-lo em várias condições de solos .

Ora , a determinação de  $K(\theta)$  no campo é um trabalho não só bastante delicado , mas demorado e oneroso , enquanto não existe metodologia bem definida para estudar a relação  $K(\text{Na})$  .

Considerando esta situação , o trabalho pretende abranger também um aspecto de pesquisa metodológica , procurando contribuir na elaboração de metodologias confiáveis , simples e econômicas para determinar essas duas relações .

## CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO - METODOLOGIA GERAL - PRIMEIROS RESULTADOS OBTIDOS.

A pesquisa está sendo conduzida em SÃO GONÇALO (PB) , sobre um solo aluvial de textura franco-arenosa (\*) .

O sistema operacional consiste em uma bateria de lisímetros (\*) , permitindo melhor controle de todos os parâmetros do experimento como é indispensável para a elaboração e adaptação de um modelo de simulação de tipo determinista .

As metodologias específicas são apresentadas dentro de cada um dos itens expostos à baixo com os primeiros resultados alcançados nas três áreas à seguir :

-para a determinação de  $K(\theta)$  :

=consideramos como método de referência o chamado de drenagem interna , ou perfil instantâneo , realizado no campo . O trabalho executado nesta área foi o de testar , para a interpretação dos dados coletados , um método semi-automatizado , i.é. assistido por computador na base de ajustamentos matemáticos  $\longrightarrow$  Item A .

=iniciamos uma tentativa para desenvolver um método de determinação de laboratório sobre amostras indeformadas  $\longrightarrow$  item B .

-para a relação  $K(Na)$  : Elaboração de uma metodologia permitindo realizar em laboratório , e também sobre pequenas amostras indeformadas , teores predeterminados de  $Na^+$  trocável e à seguir determinar  $K$   $\longrightarrow$  Item C .

(\*) Para maiores detalhamentos sobre : as características do modelo , o local e a organização do experimento , o tipo de solo e as suas características , as técnicas de medição utilizadas ... , veja o painel vizinho ( trabalho n\* 263 deste Congresso ) .

## A. DETERMINAÇÃO DE $K(\theta)$ NO CAMPO

### 1 . METODOLOGIA E ESQUEMA DE INTERPRETAÇÃO.

Metodologia clássica : apos saturação , o solo protegido superficialmente da evaporação foi deixado em drenagem . Durante esta fase de redistribuição Interna da agua , realizou-se medições de perfis de umidade ( sonda de neutrons de 10 em 10 cm ) e de carga hidráulica ( tensiômetros instalados à 10,20,30,50,70,90,105cm ) .

Procedimento de interpretação : igualmente clássico : o fluxo de água através de um plano horizontal de cota  $z$  , escolhido equidistantemente entre dois tensiômetros sucessivos  $i$  e  $i+1$  é dado pelas equações :

$$q = dS/dt = K(\theta) \cdot dH/dz \quad \text{----->} \quad K(\theta) = (dS/dt) / (dH/dz)$$

onde :

$t$  = tempo

$\theta$  = umidade à profundidade  $z$

$S$  = estoque de água no solo da superfície até a profundidade  $z$

$K$  = condutividade hidráulica à profundidade  $z$

$H$  = carga hidráulica à profundidade  $z$

A interpretação dos dados de umidade e de carga coletados ao longo do tempo , consiste em avaliar , para uma serie de tempos escalonados :

- a umidade à partir da curva  $\theta(t)$
- $dS/dt$  à partir da curva  $S(t)$
- $dh/dz$  :
  - . seja como a tangente à profundidade  $z$  à curva  $H(z)$  correspondendo ao tempo  $t$
  - . seja avaliando  $dH$  à partir de uma curva  $dH(t)$
  - . seja calculando a diferença das avaliações de  $H_i$  e  $H_{i+1}$  feitas à partir de duas curvas  $H_i(t)$  e  $H_{i+1}(t)$  ; este último procedimento foi escolhido para ser o único utilizável no presente caso.

A tentativa de automatização realizada consiste em substituir a elaboração manual de curvas suavizadas por ajustamentos matemáticos [ o que se pratica comumente para  $S(t)$  e  $\theta(t)$  ] ; isto permite então substituir a determinação gráfica das tangentes pelo cálculo das derivadas.

À seguir estão apresentados os resultados obtidos para o lisímetro 3 à profundidade 25 cm.

## 2 . RESULTADOS CRUS DO EXPERIMENTO - PREPARAÇÃO E LIMPEZA DO DADOS .

Ver fig. 1 e 2 .

## 3 . TÉCNICA DE AJUSTAMENTO UTILIZADA . Ver fig. 3 .

Frequentemente utiliza-se para as curvas  $S(t)$  e  $\theta(t)$  , leis de recessão :  $y = a.exp(b.x)$  , estimadas por ajustamento linear apos transformação logarítmica da variável  $y$  , seja :  $\text{Log } y = A + b.x$  .

No presente caso , este procedimento não se mostrou satisfatório : praticado por exemplo sobre  $S(t)$  , obteve-se um  $R^2$  de 71.89% , o que é satisfatório ; voltando para a variável original , o  $R^2$  passa para 70.79 , o que fica aceitável mas a representação gráfica do ajustamento mostra uma enorme distorsão em relação aos dados .

Passamos à um ajustamento do tipo  $y = a + b.exp(p.x)$  realizado por minimização da soma dos quadrados dos resíduos , mas sem transformação de variável . Chegamos a um  $R^2$  de 96.38% , com um ajuste bem melhor mas ainda com uma sensível distorsão .

Só passando a um *conjunto de exponenciais* ( aqui a soma de duas exponenciais ) *ajustado sempre sem transformação de variável* , chegamos a uma descrição fiél da realidade , confirmada por um  $R^2$  extremamente elevado de 99.49% .

Conservamos este tipo de procedimento para todo o resto do trabalho .

## 4 . PROCEDIMENTO GRÁFICO MANUAL .

Ver fig. 4a , 4b , 4c , respetivamente para a evolução de  $\theta$  ,  $S$  , e  $H_{20}$  e  $H_{30}$  , em relação ao tempo .

## 5 . PROCEDIMENTO POR AJUSTAMENTO MATEMÁTICO .

Ver fig. 5a , 5b , para a evolução de  $\theta$  ,  $S$  ; e 5c , 5d , 5e para a evolução de  $H_{20}$  ,  $H_{30}$  e  $dH$  em relação ao tempo .

## 6 . COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS AO NÍVEL DOS ELEMENTOS DE CÁLCULO DE $K(\theta)$ .

Ver fig. 6a , 6b , 6c , respetivamente para a avaliação dos conjuntos de valores  $\theta$  ,  $dS/dt$  e  $dH/dz$  .

A comparação entre os dois métodos mostra :

- uma boa concordância para a avaliação de  $dS/dt$  e  $\theta(t)$
- uma péssima concordância para a avaliação de  $dH/dz$  : um exame mais detalhado mostra que principalmente na fase inicial do experimento , a avaliação pelo método manual é extremamente aleatória , e nenhuma mudança de escala permitiu resolver o problema por via gráfica . Neste caso , o método por ajustamento que , certamente não pode pretender ser uma solução perfeita , traz uma grande ajuda para interpretar os dados de maneira mais consistente e menos subjetiva .

## 7 . COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS AO NÍVEL FINAL DE $K(\theta)$ .

Ver fig. 7a , 7b , 7c , mostrando em várias escalas os resultados obtidos pelos dois métodos , e fig. 8a e 8b mostrando os melhores ajustamentos exponenciais obtidos para  $K(\theta)$  correspondendo aos dois métodos .

## 8 . CONCLUSÕES .

8.1. Do ponto de vista metodológico :

O uso de ajustamentos matemáticos pode ajudar bastante para a interpretação dos dados de umidade e de carga hidráulica coletados no campo para determinar  $K(\theta)$  pelo método da drenagem interna ; mas esta utilização deve ser feita com muito cuidado e muita exigência .

Sugerimos :

-praticar a minimização da soma dos quadrados dos resíduos sem transformação de variável

-nunca se satisfazer de valores aceitáveis dos índices estatísticos de qualidade e de nível de significância dos ajustamentos , sem verificar também graficamente que a forma analítica não introduziu uma distorsão que poderia afetar gravemente o resultado final de  $K(\theta)$  .

8.2. Do ponto de vista resultados :

Foi definida uma lei  $K(\theta)$  atendendo as necessidades do nosso trabalho de modelagem ( fig. 8b) .

## B . TENTATIVA DE DETERMINAÇÃO DE $K(\theta)$ NO LABORATÓRIO .

### 1 . MÉTODO ORIGINAL .

Basicamente , consiste em reproduzir em laboratório um experimento de drenagem interna : a amostra indeformada , após saturação e medição da condutividade saturada , está protegida da evaporação na parte superior e colocada em contato pela base com um volume em excesso da mesma terra , fina e seca , ao benefício da qual se realiza a redistribuição .

Nessas condições , admite-se , e foi verificada algumas vezes ( Rieu 1983 ) , que a drenagem ocorre sob gradiente de carga unitário ; o cálculo de  $K$  se torna então simplificado :  $\rightarrow K(\theta) = - L \cdot d\theta/dt$  , com  $L$  = altura da amostra .

A determinação da relação  $K(\theta)$  se limita assim apenas à uma sucessão de pesagens da amostra ao longo do experimento .

### 2 . ADAPTAÇÕES REALIZADAS .

- usar sistematicamente dois mini-tensiômetros : para verificar a condição de gradiente de carga unitário , pois se não for realizada , está tudo errado ,

- continuar a fase de drenagem interna por uma fase de evaporação para prolongar a curva  $K(\theta)$  até valores menores de  $\theta$  .

Praticamente usamos 6 amostras :

- a fase de redistribuição sem evaporação é realizada assim com 6 repetições e interrompida seja quando a condição de gradiente de carga unitário deixa de ser realizada , seja quando os fluxos se tornam insignificantes ;

- a fase de evaporação, que vêm em continuidade, está aplicada com durações crescentes para cada uma das 6 amostras ; pois a determinação de um par de valores  $K$ - $\theta$  necessita neste caso sacrificar a amostra para fazer um perfil de umidade afim de avaliar o fluxo através do plano mediano do cilindro . medir  $\theta$  neste nível e calcular  $K(\theta) = q / (dH/dz)$  como no método de campo

### 3 . EQUIPAMENTO UTILIZADO .

Exposto no painel , consiste em uma adaptação simples do clássico cilindro de Umland , para permitir adaptar tampas , anel para realizar carga constante ( condutividade saturada ) , e montar os dois minitensiômetros .

### 4 . RESULTADOS OBTIDOS ATE AGORA .

Ver fig. 9 e 10 .

### 5 . ESTADO DA PESQUISA EM ANDAMENTO - CONCLUSÕES .

As primeiras curvas obtidas  $K(\theta)$  e  $h(\theta)$  apresentadas aqui se mostram consistentes e os resultados da mesma ordem de grandeza do que os obtidos pelos outros métodos .

- esses resultados são incentivadores para continuar e intensificar este trabalho metodológico .

- os pontos técnicos em trabalho atualmente são :

- = melhorar a precisão da medição de carga hidráulica ( testes de substituição do mercurio por outro líquido e de manômetro diferencial ) ,
- = melhorar a proteção da evaporação da parte da terra do vasilhame inferior .

**CONCLUSÕES** : as vantagens esperadas a partir desses primeiros resultados , além de barratear a determinação da relação  $K(\theta)$  são :

- à partir de uma única sucessão de operações sobre uma única série de amostras indeformadas , medir o conjunto de características : densidade aparente , teor de umidade à saturação  $\theta_s$  , curva  $K(\theta)$  mas também curva potencial mátrico  $h(\theta)$  , as duas até a faixa de sucção 500-700 milibars ,

- permitir a determinação de  $K(\theta)$  em horizontes onde está praticamente inaplicável o método de campo , em particular horizontes próximos de lençóis e mais ainda dentro de lençóis .



## **C . RELACÃO K(Na)**

### **1 . METODOLOGIA .** Comporta duas partes :

- um experimento prévio permitindo determinar as condições de realização de vários teores de sódio trocável nas amostras . Isto foi realizado com sucesso mantendo contato de duracõ crescente entre as amostras e soluções de carbonato de sódio de concentraçãa crescente .

- a medição da condutividade saturada com permeâmetro de carga constante , sobre séries de amostras de teores de Na<sup>+</sup> trocável ajustados experimentalmente conforme os resultados anteriores .

### **2 . RESULTADOS .**

Ver fig. 11 .

### **3 . ESTADO DA PESQUISA EM ANDAMENTO .**

Metodologia :

- já parcialmente concluída para a condutividade saturada , ficando em definir condições experimentais que permitam estabilizar o teor de Na<sup>+</sup> trocável durante o teste de permeabilidade .

- a relação estabelecida limita-se à condutividade saturada . Seria interessante prolongar o estudo na faixa não saturada ao invès de utilizar sem verificação as equações disponíveis na literatura .

Resultados :

No momento , os resultados obtidos , apesar de parciais , atendem totalmente as necessidades imediatas de nosso trabalho de modelagem .

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA  
DE UM SOLO ALUVIAL DE SÃO GONÇALO ( PB )**

**P.Audry\* , M.M.F. de Queiroz\*\*\* , F.L. Barreto Filho\*\*\* , H.R. Gheyi\*\***

---

( \* Pesquisador ORSTOM / CNPq ; \*\* Professor UFPB ; \*\*\* Mestrandos UFPB )

---

**Trabalho realizado pelo Departamento de Engenharia Agrícola da UFPB  
Campina Grande**

**Financiado pelo PDCT-NE / CNPq-BID ( Projeto PB 42 )**

**Apresentado no XXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo  
23 a 31 de julho de 89 - Recife - PE  
( Sessão de painéis - Trabalho nº 262 )**

---

**Versão por extenso do Painel apresentado no Congresso  
( menos as fotos e o material exposto )**

Fig. 1 - EVOLUÇÃO DOS PERFIS DE UMIDADE AO LONGO DA EXPERIÊNCIA DE DRENAGEM INTERNA

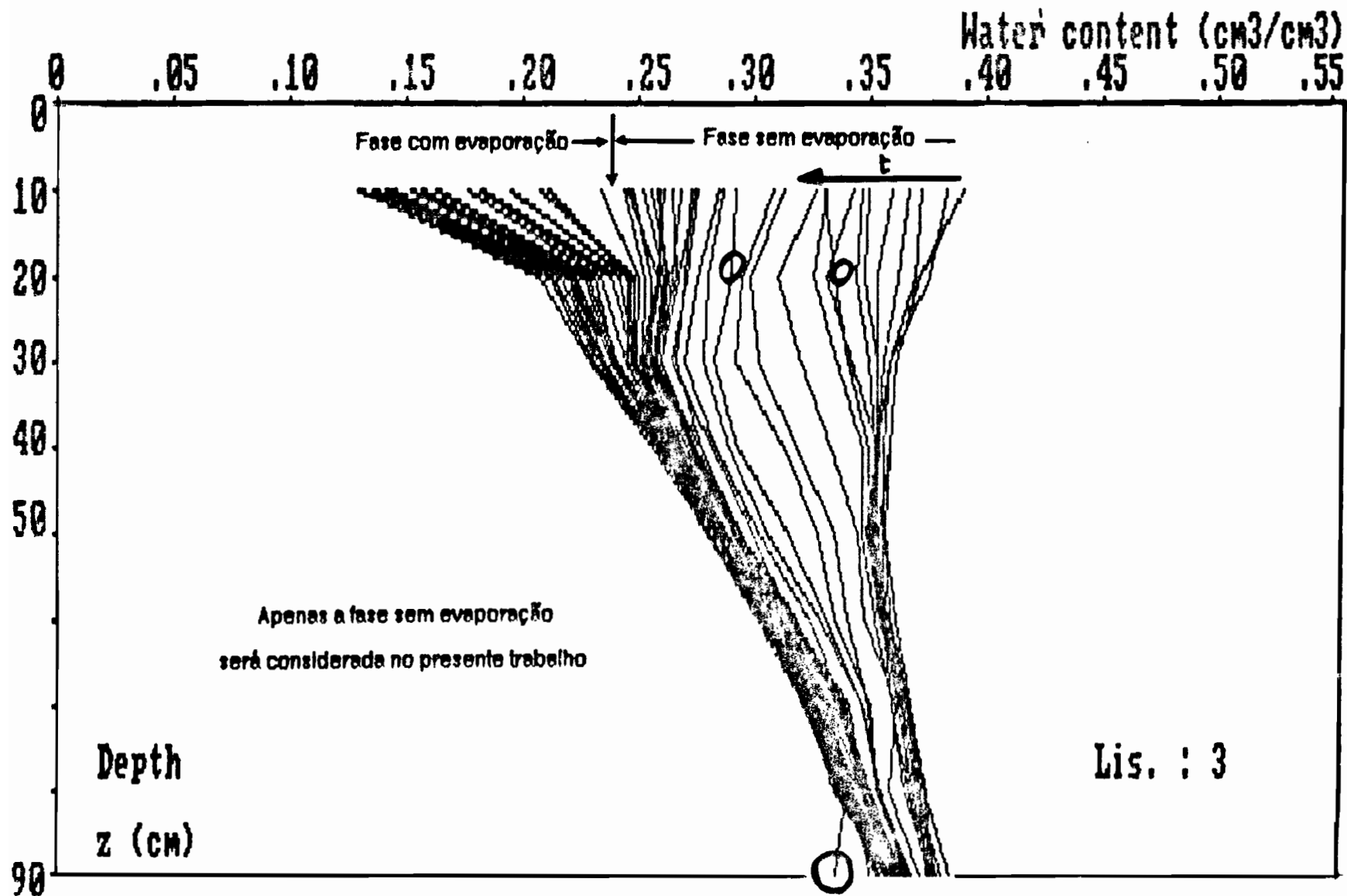
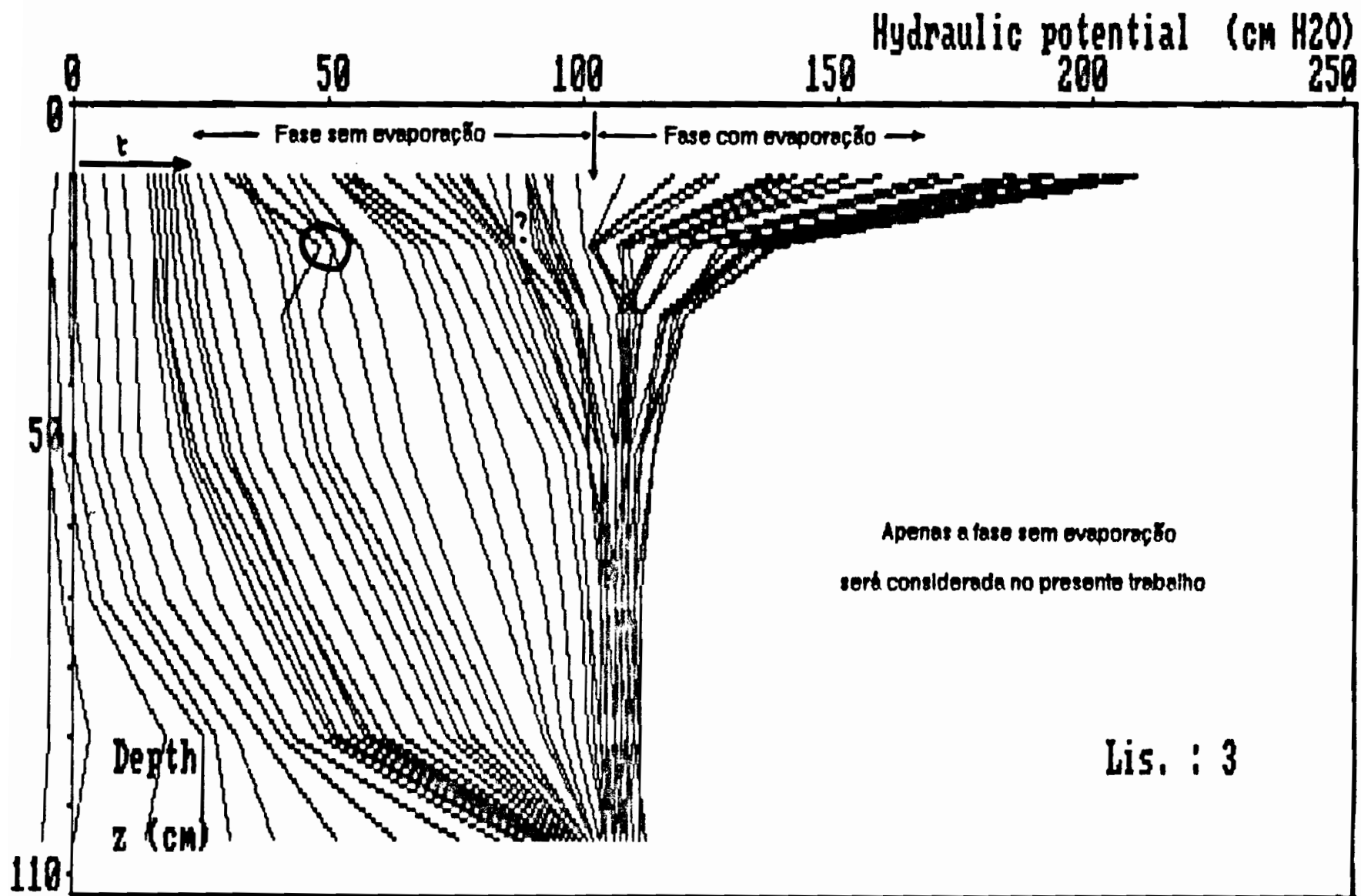
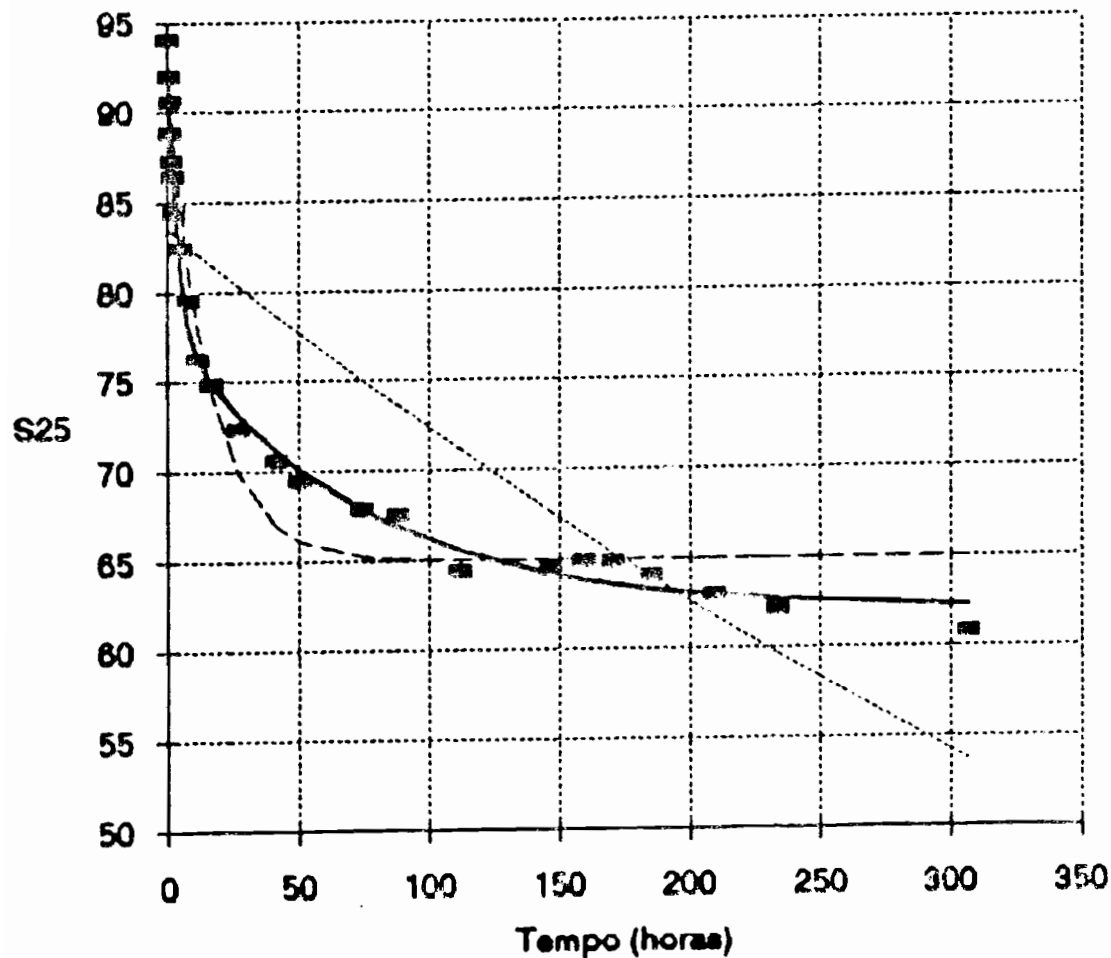


Fig. 2 - EVOLUÇÃO DOS PERFÍS DE CARGA HIDRÁULICA AO LONGO DA EXPERIÊNCIA DE DRENAGEM INTERNA



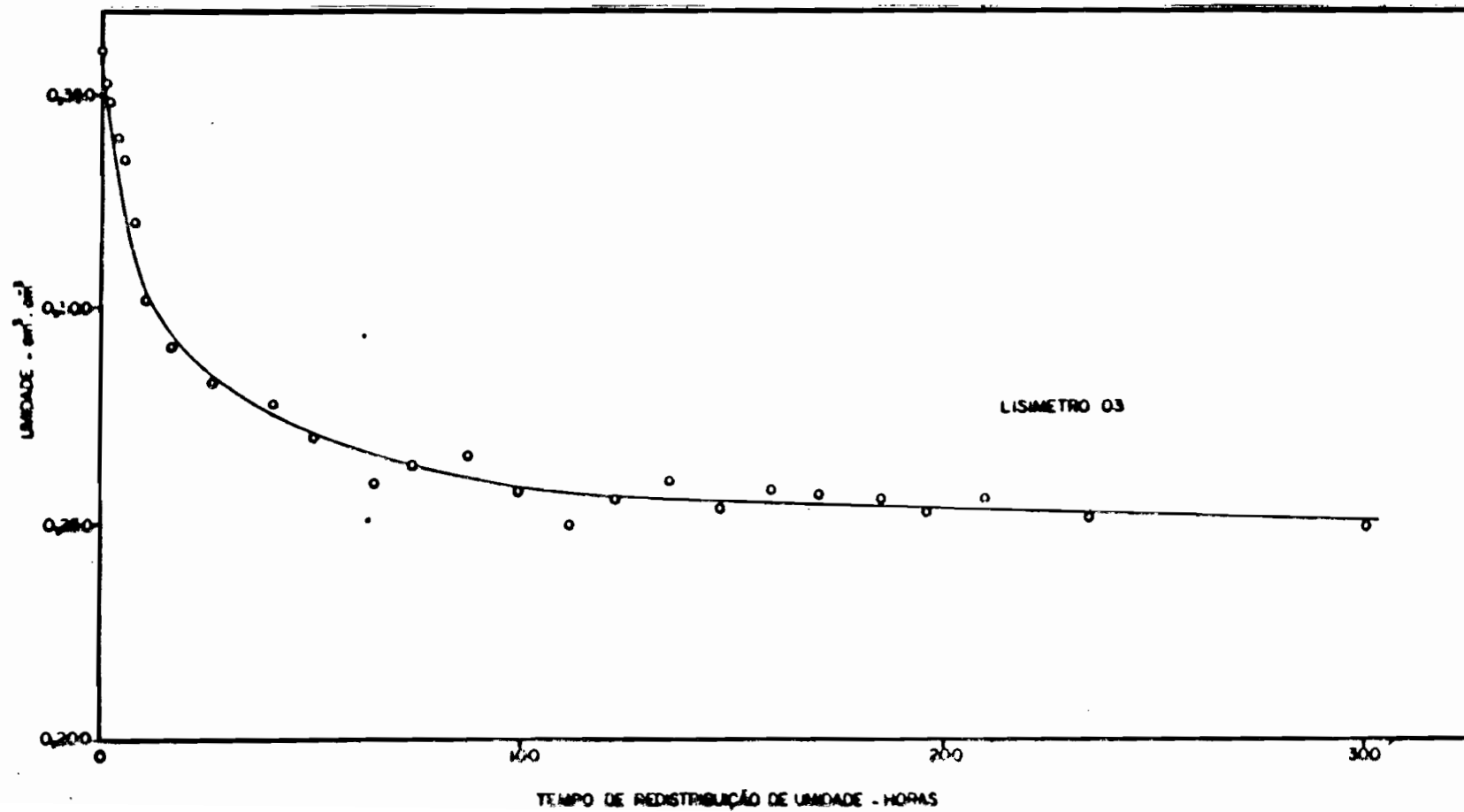
**Fig. 3 - COMPARAÇÃO DE VÁRIAS TÉCNICAS E FORMAS ANALÍTICAS DE AJUSTAMENTO**

**EVOLUCAO DO ESTOQUE DE AGUA DA CAMADA 0-25cm (S25 em mm.)  
AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporacao - Lisimetro 3**



- Valores medidos
- Ajustamento :  $y=A.exp(p.x)$  - Realizado por ajustamento linear de  $\log(y)$  -->  $R^2=70.79$
- Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x)$  - Realizado sem transformacao de variavel -->  $R^2=98.98$
- Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x) + C.exp(q.x)$  - Realizado sem transformacao de variavel -->  $R^2=99.49$

Fig. 4a - EVOLUÇÃO DA UMIDADE À 25cm AO LONGO DA EXPERIÊNCIA  
DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporação - Lisímetro 3  
Redução do gráfico estabelecido pelo método manual



**Fig. 4b - EVOLUÇÃO DO ESTOQUE DE ÁGUA DA CAMADA 0-25cm AO  
LONGO DA EXPERIÊNCIA DE DRENAGEM INTERNA  
DETERMINAÇÃO de  $dS/dt$  pelo MÉTODO DAS TANGENTES  
Fase sem evaporação - Lisímetro 3  
Redução do gráfico estabelecido pelo método manual**

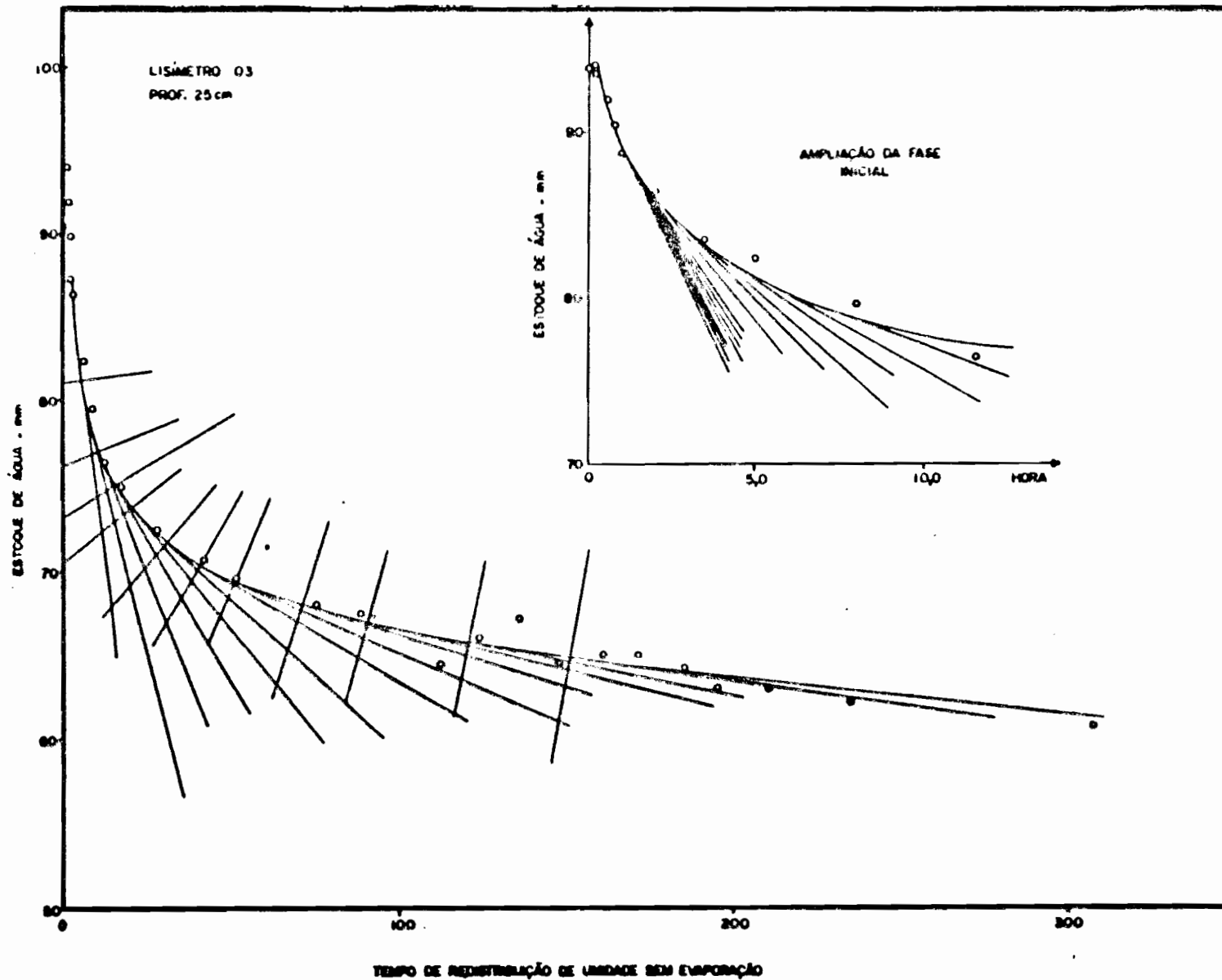


Fig. 4c - EVOLUÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS À 20 e 30cm AO LONGO  
DA EXPERIÊNCIA DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporação - Lisímetro 3  
Redução do gráfico estabelecido pelo método manual

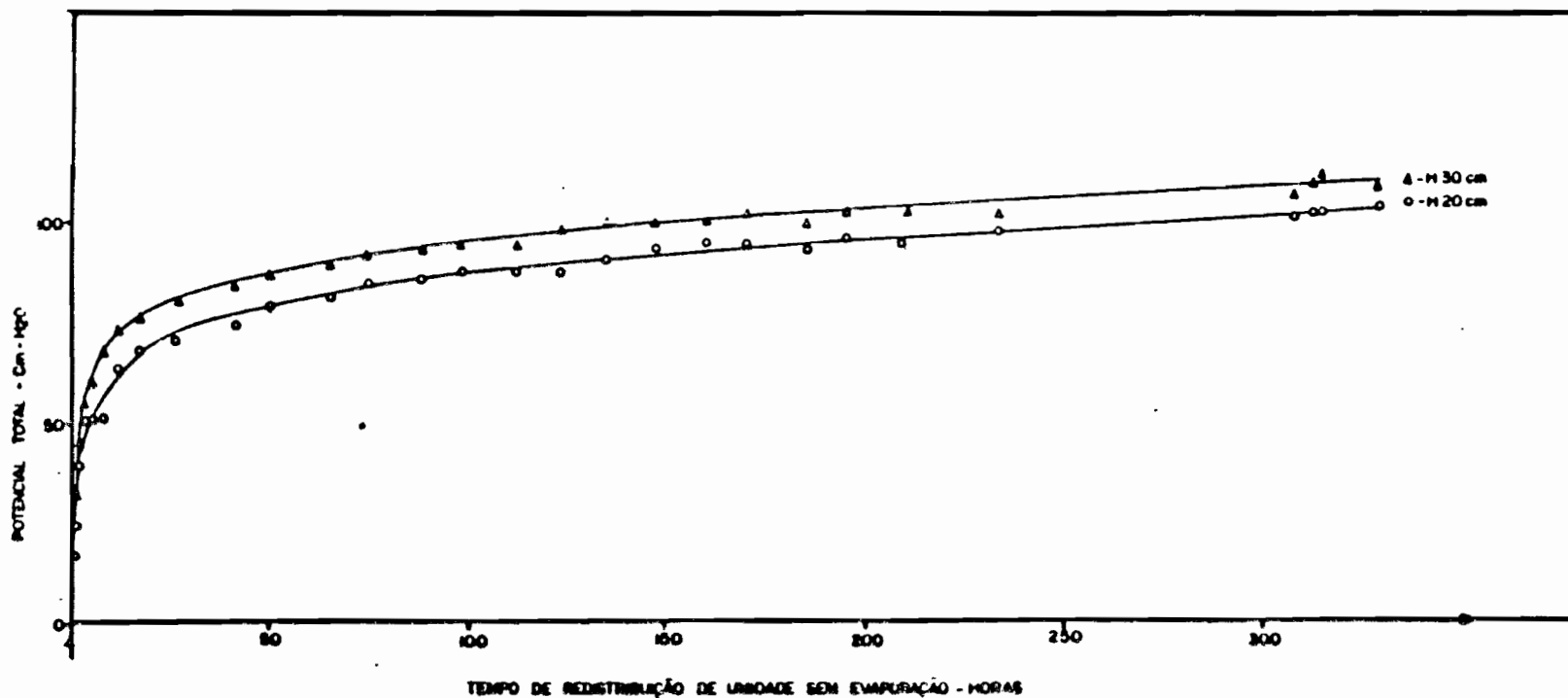
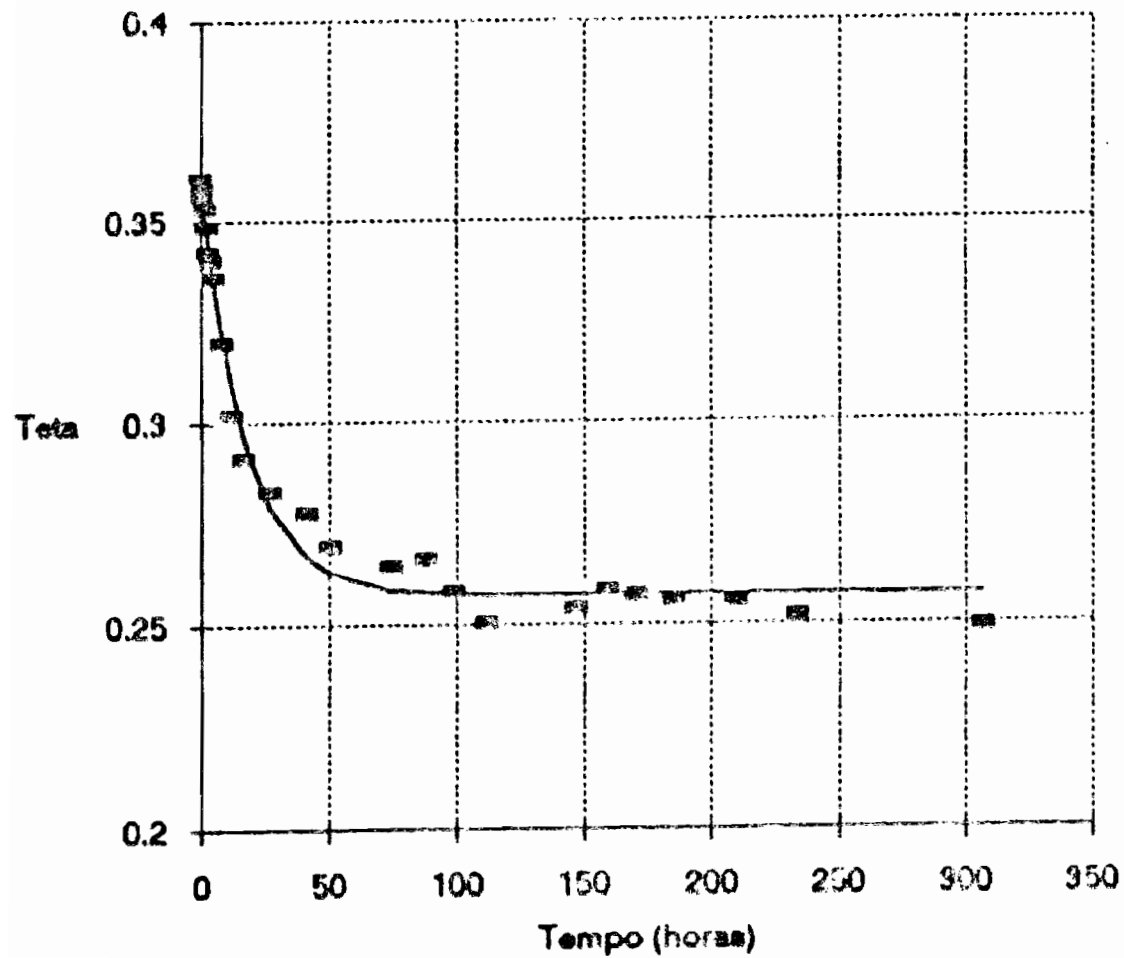


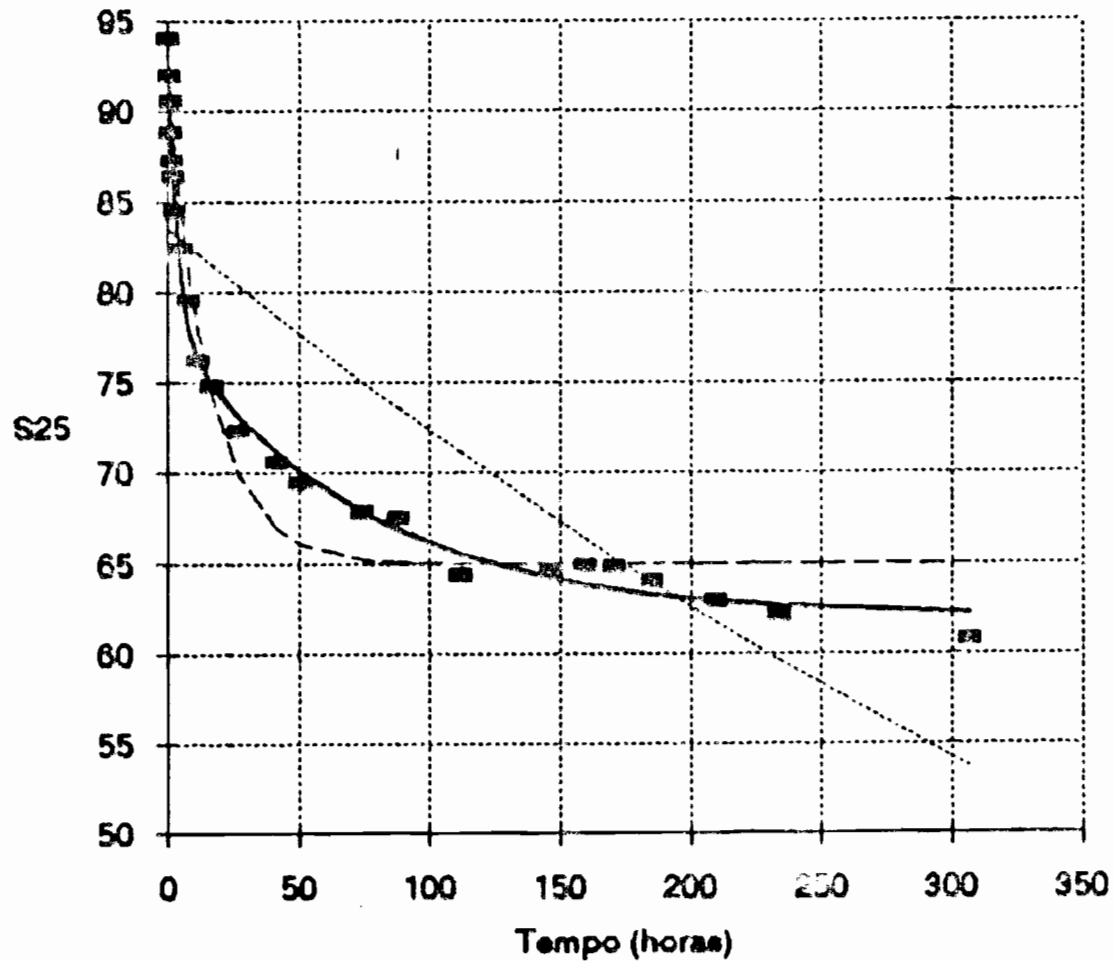


Fig. 5a - EVOLUCAO DA UMIDADE A 25 cm ( Teta em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  )  
AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporacao - Lisimetro 3



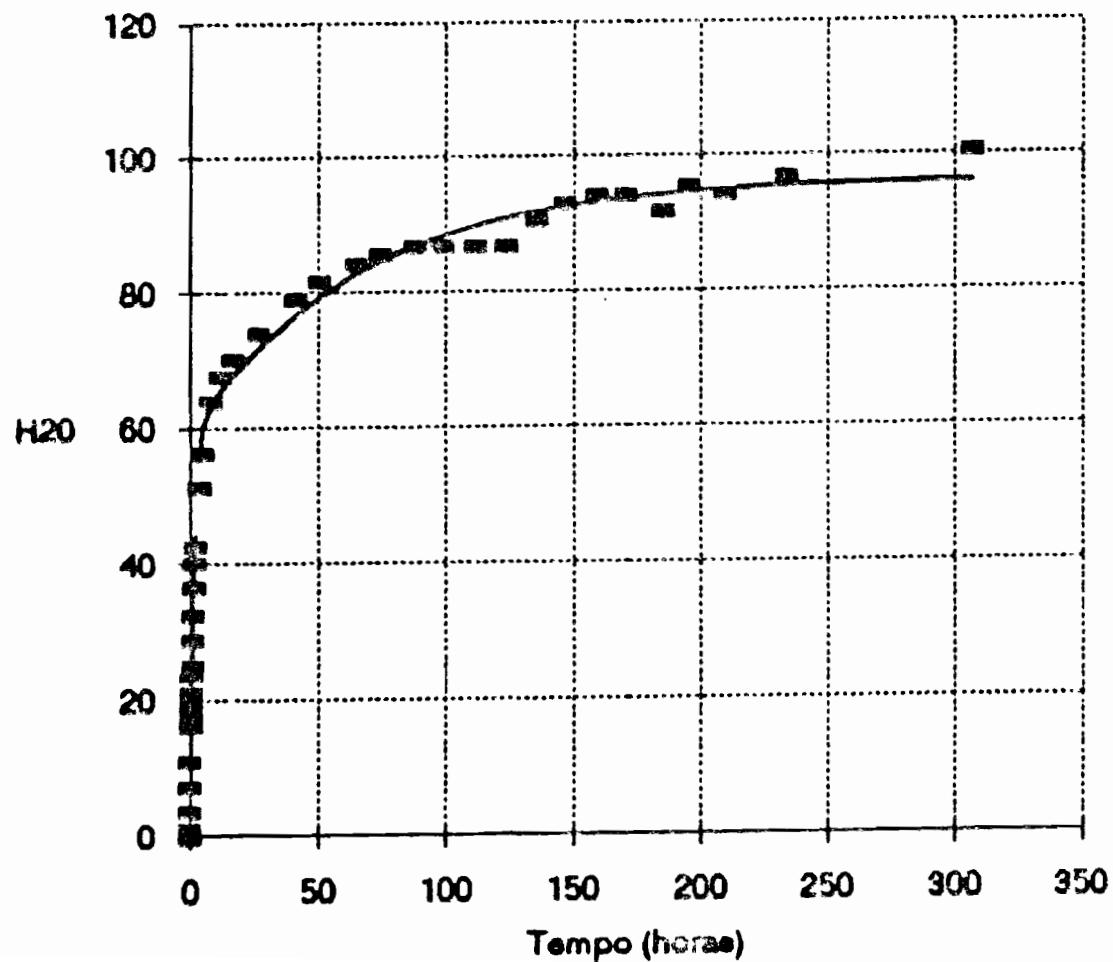
■ Valores medidos  
— Ajustamento : duas exponenciais  
sucessivas tangentes entre si no  
ponto de revezamento →  
 $R^2 = 0,99$

Fig. 5b - EVOLUCAO DO ESTOQUE DE AGUA DA CAMADA 0-25cm (S25 em mm.)  
 AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
 Fase sem evaporacao - Lisimetro 3



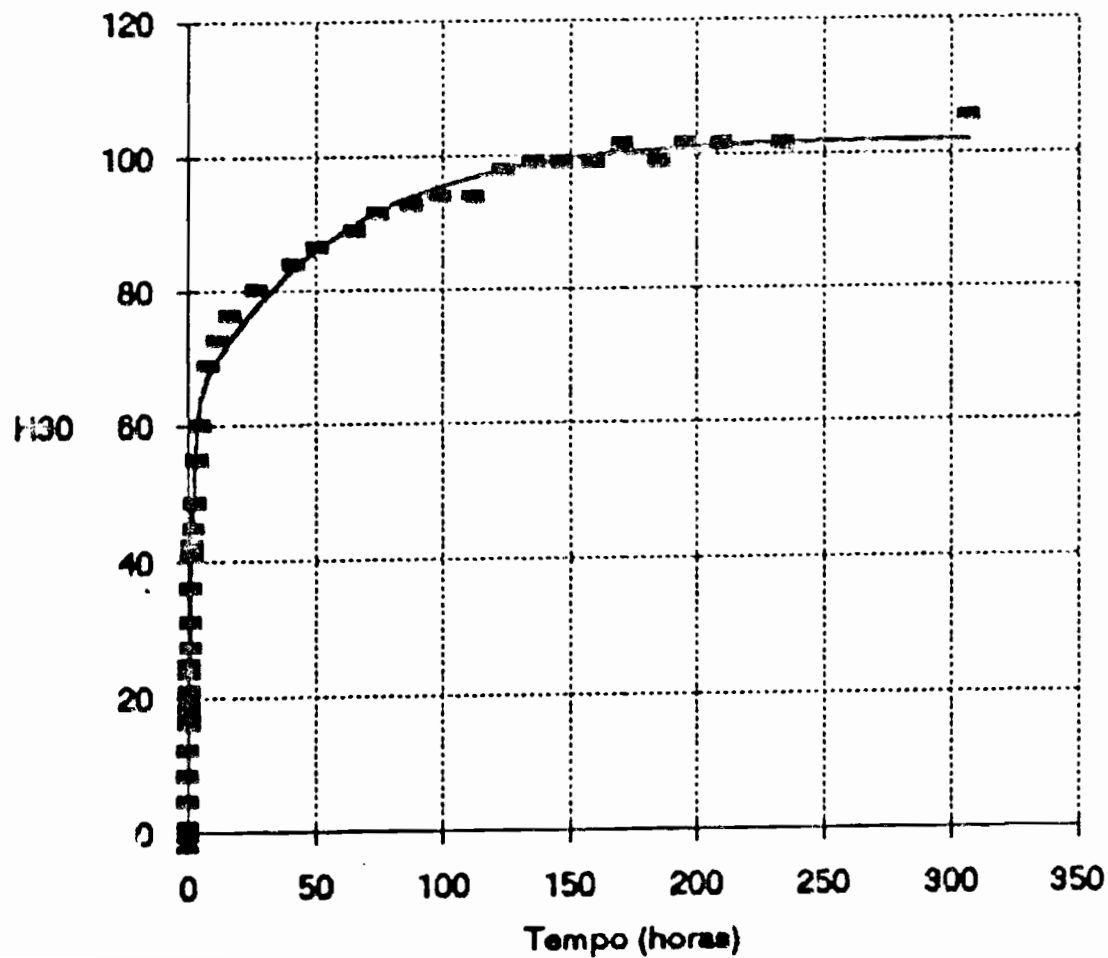
- Valores medidos
- Ajustamento :  $y=A.exp(p.x)$  -  
 Realizado por ajustamento linear de  $\log(y)$  ->  $R^2=70.79$
- Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x)$  -  
 Realizado sem transformacao de variavel ->  $R^2=98.98$
- Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x) + C.exp(q.x)$  -  
 Realizado com transformacao de variavel ->  $R^2=99.49$

Fig. 5c - EVOLUCAO DA CARGA HIDRAULICA aa 20 cm (H2O em cm de agua)  
AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporacao - Liximetro 3



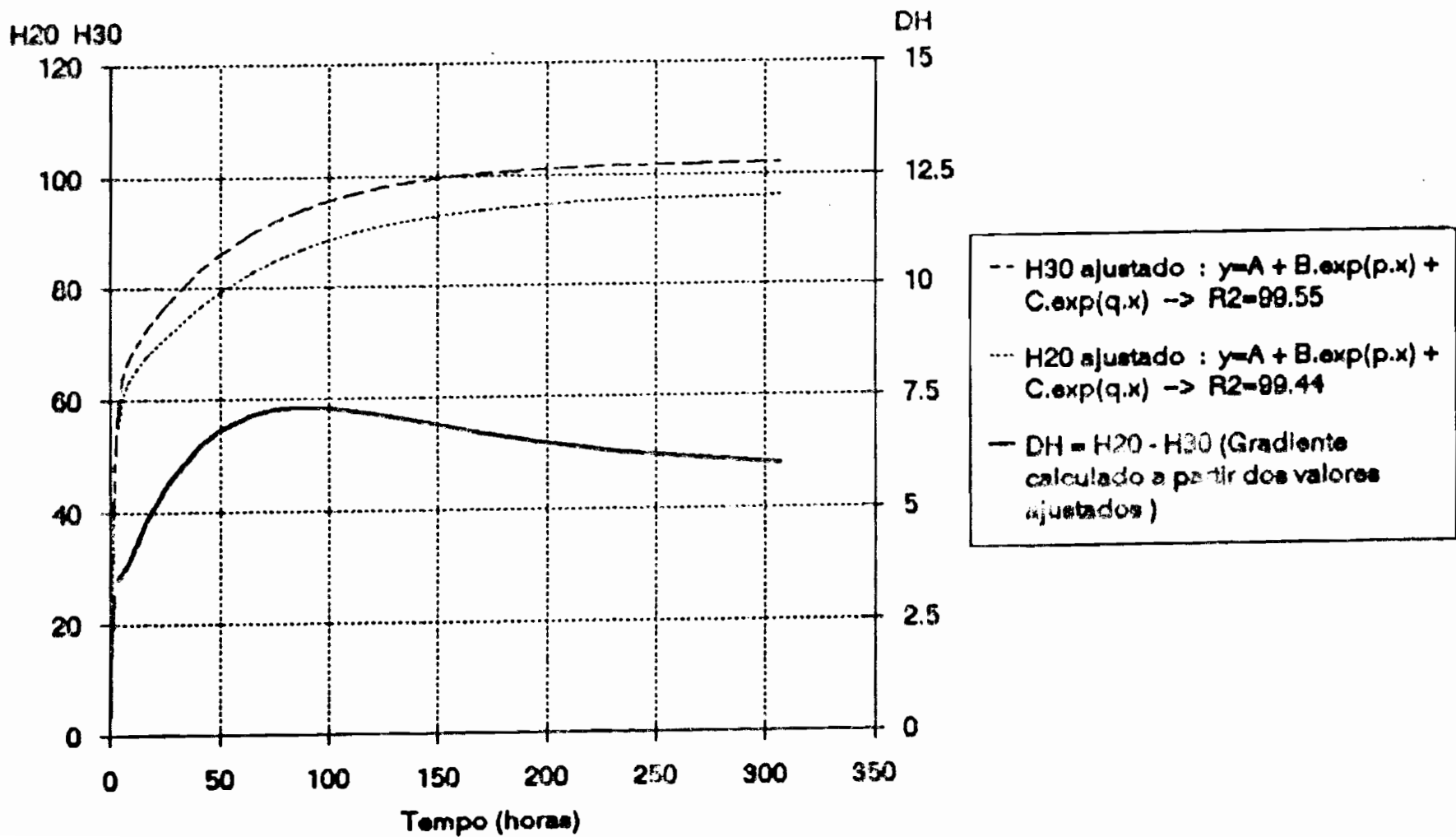
■ Valores medidos  
— Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x) + C.exp(q.x)$  - Realizado sem transformacao de variavel  
-> R2=99.44

Fig. 5d - EVOLUCAO DA CARGA HIDRAULICA a 30 cm (H30 em cm de agua)  
AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
Fase sem evaporacao - Lisimetro 3



■ Valores medidos  
— Ajustamento :  $y=A + B.exp(p.x) + C.exp(q.x)$  - Realizado sem transformacao de variavel  
-> R2=99.55

3. 5a - EVOLUCAO DAS CARGAS HIDRAULICAS as 20 e 30 cm (H20 e H30 em cm de agua)  
 AO LONGO DA EXPERIENCIA DE DRENAGEM INTERNA  
 Fase sem evaporacao - Lismetro 3



**Fig. 6a - COMPARACAO DOS METODOS : grafico manual e automatizado por calculo**  
Lisímetro 3 - Profundidade 25 cm  
Avaliação de Teta a partir da curva Teta (t) - ( R2 = 98.75 )

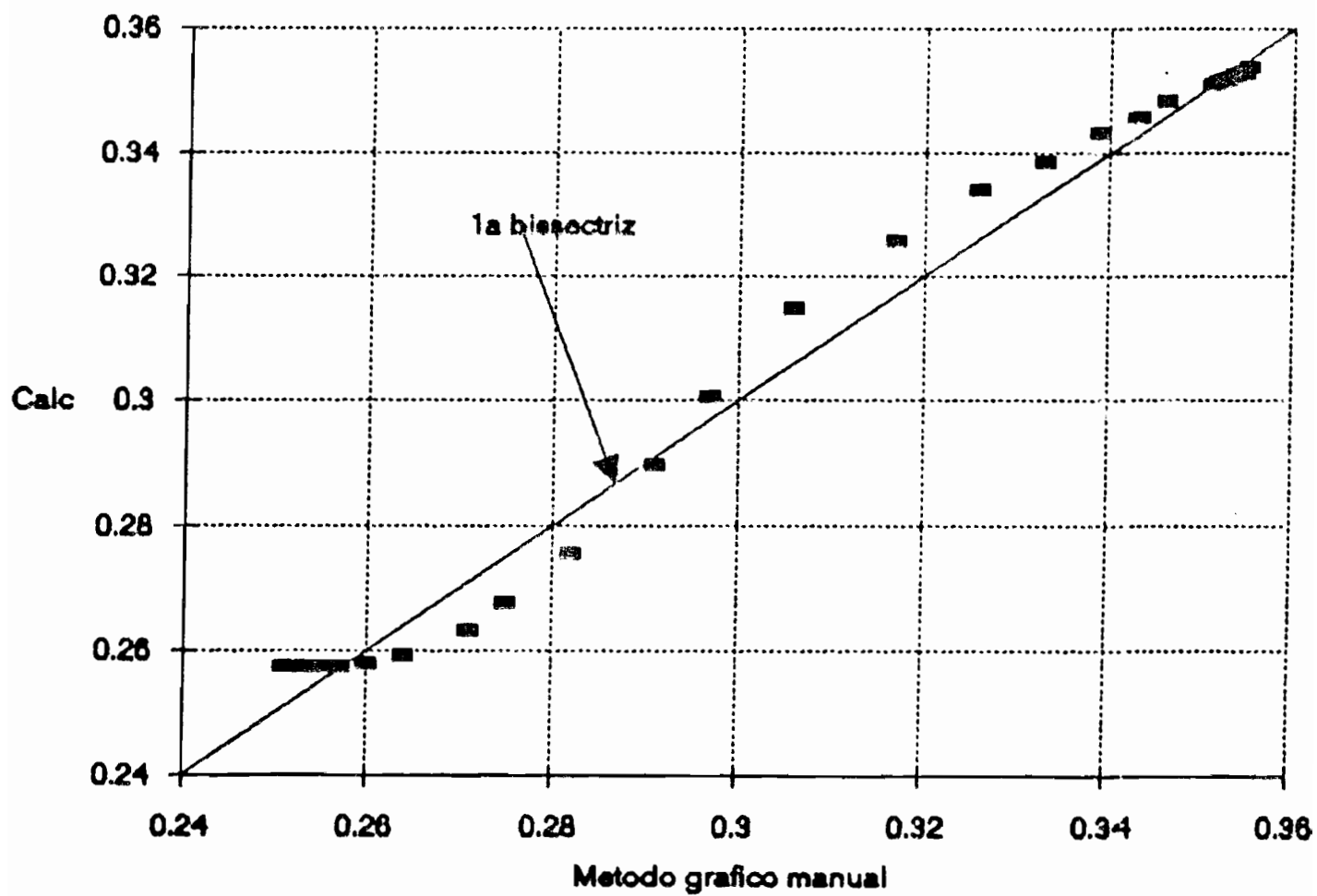


Fig. 6b - COMPARAÇÃO DOS METODOS : gráfico manual e automatizado por cálculo  
Lialmetro 3 - Profundidade 25 cm  
Avaliação de  $dS/dt$  a partir das curvas  $S(t)$  - ( $R^2 = 97.74$ )

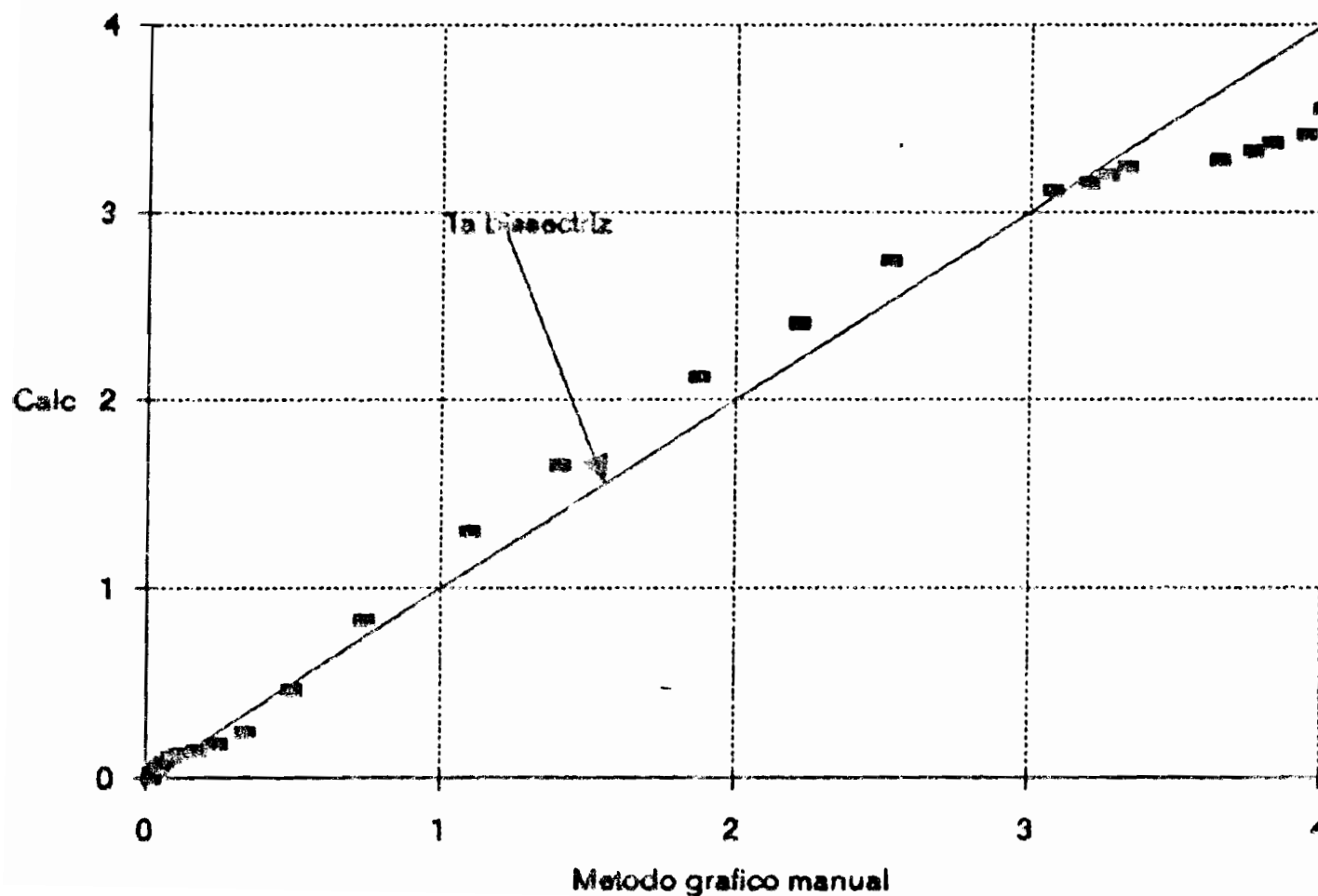


Fig. 6c - COMPARACAO DOS METODOS : grafico manual e automatizado por calculo  
Lisimetro 3 - Profundidade 25 cm  
Avaliacao de  $dH/dz$  a partir das curvas  $H(t)$  - ( $R^2 < 0.$ )

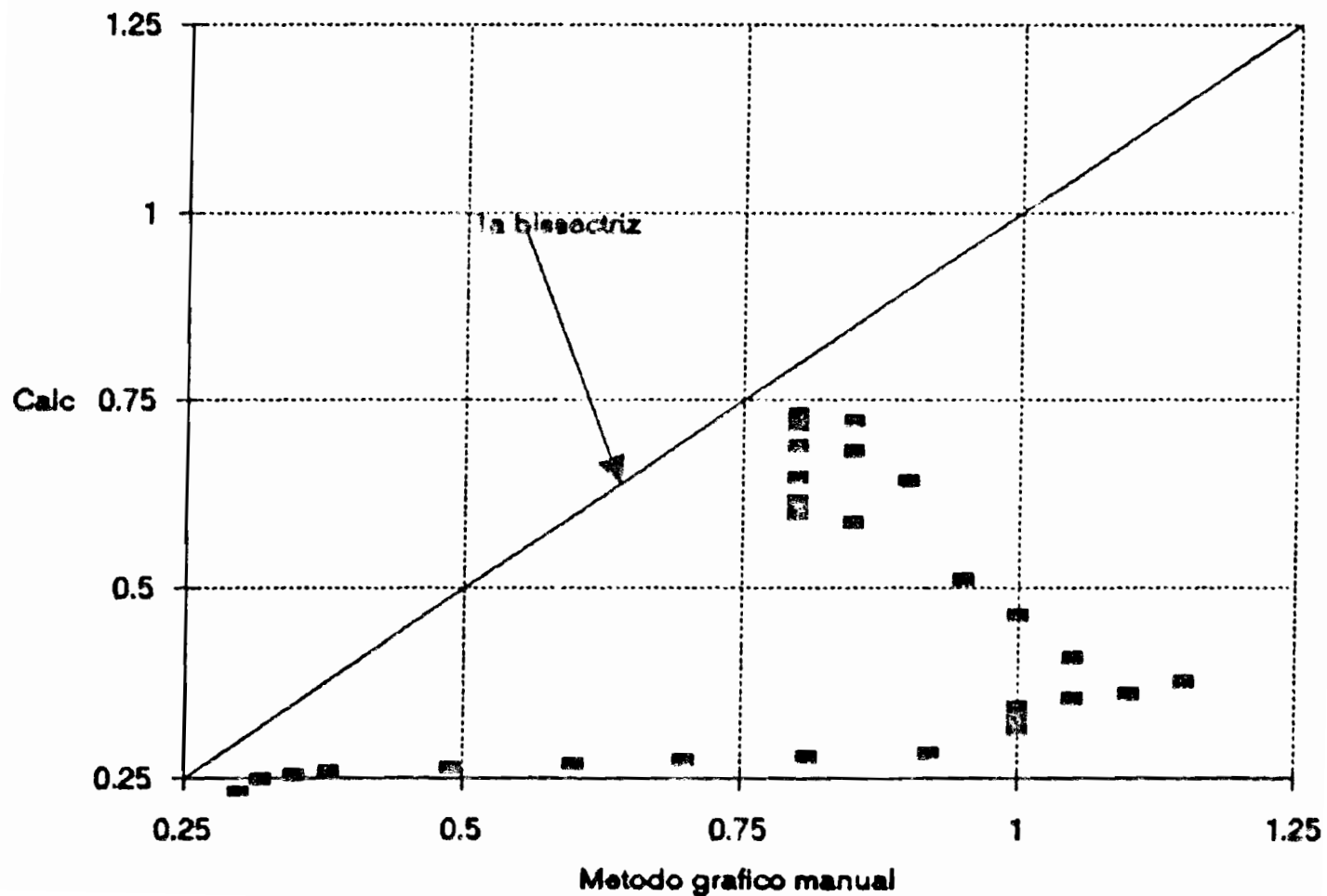




Fig. 7a - RELACAO CONDUTIVIDADE HIDRAULICA ( K cm/dia )  
vs UMIDADE ( Teta cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> )  
Lisimetro 3 - Profundidade 25 cm  
Unidades aritmeticas

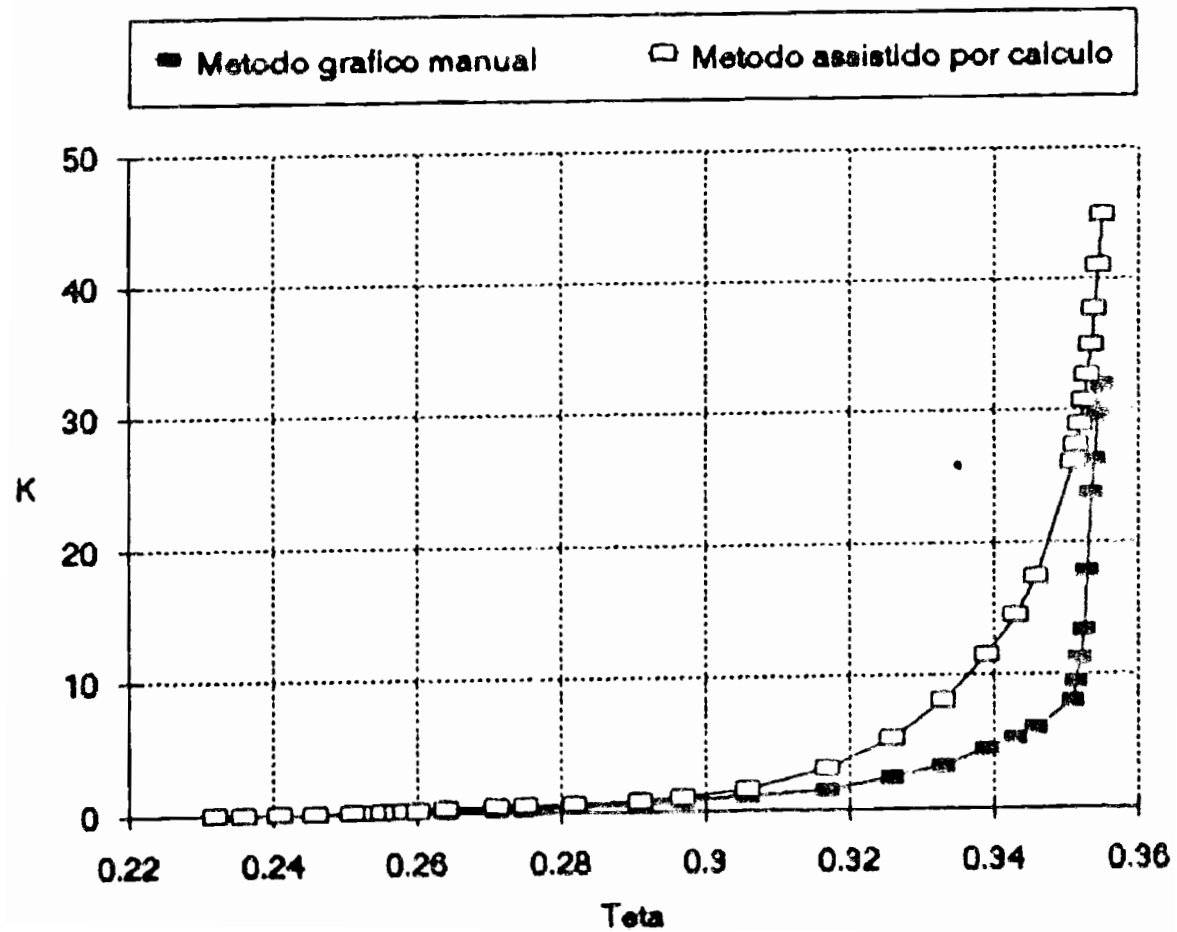


Fig. 7b - RELACAO CONDUTIVIDADE HIDRAULICA ( K cm/dia )  
vs UMIDADE ( Teta cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> )  
Lisimetro 3 - Profundidade 25 cm  
Unidades : log(K) - Teta aritm.

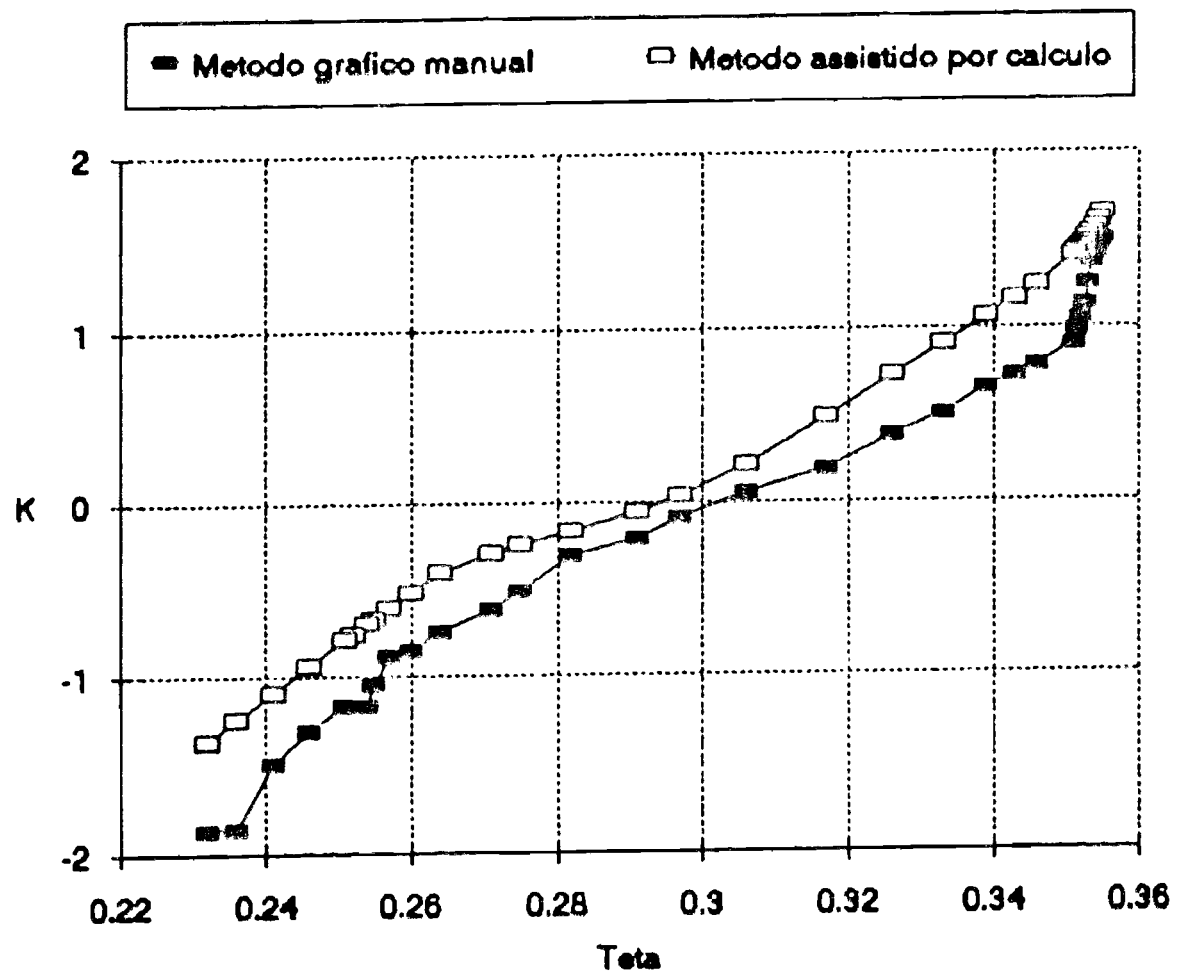


Fig. 7c • RELACAO CONDUTIVIDADE HIDRAULICA ( K cm/dia )  
vs UMIDADE ( Teta cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> )  
Lisimetro 3 - Profundidade 25 cm  
Unidades : log. - log.

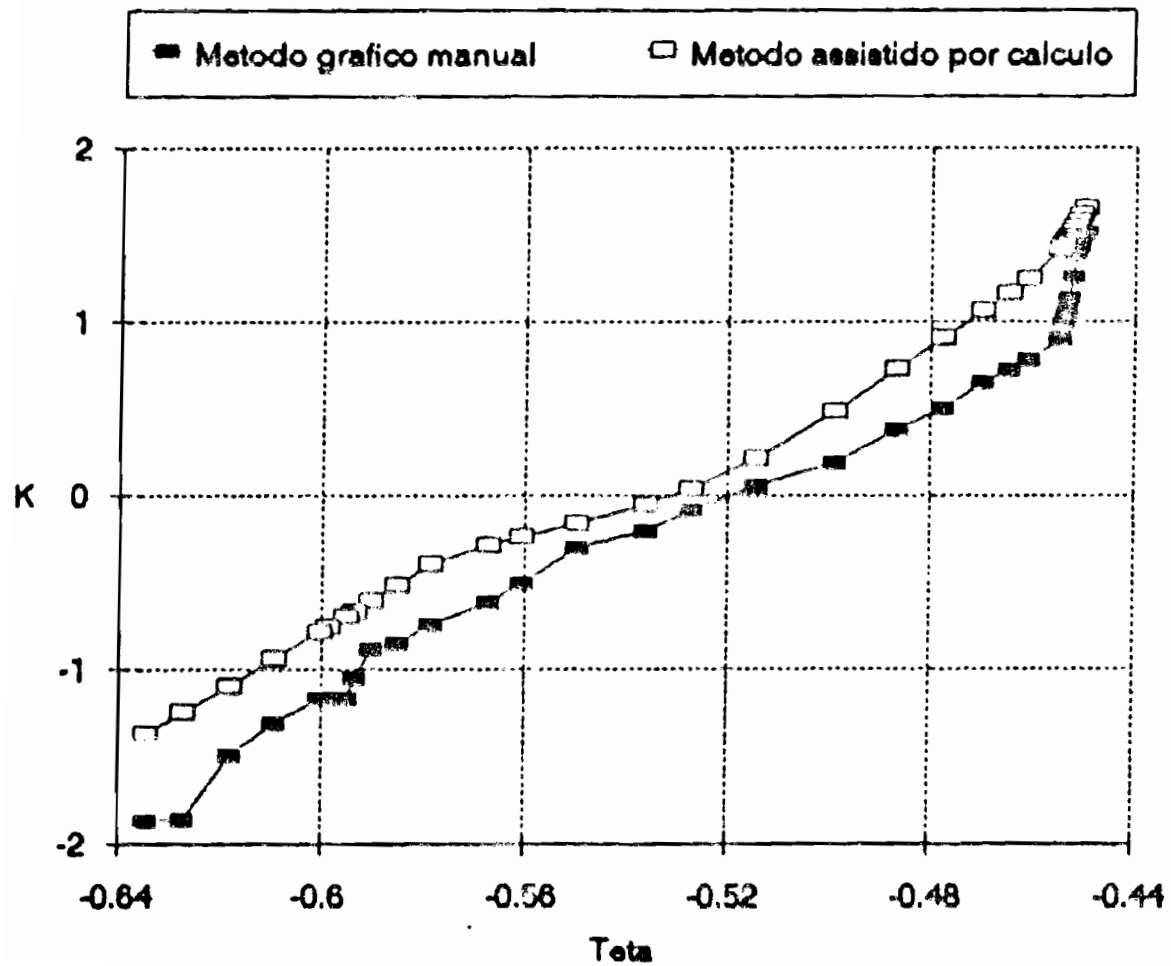


Fig. 8a . RELACAO CONDUTIVIDADE HIDRAULICA ( K cm/dia ) vs UMIDADE ( Teta cm3/cm3 )  
Ajustamento dos dados obtidos pelo metodo grafico manual  
Lisimetro 3 - Profundidade 25 cm  
Unidades aritmeticas

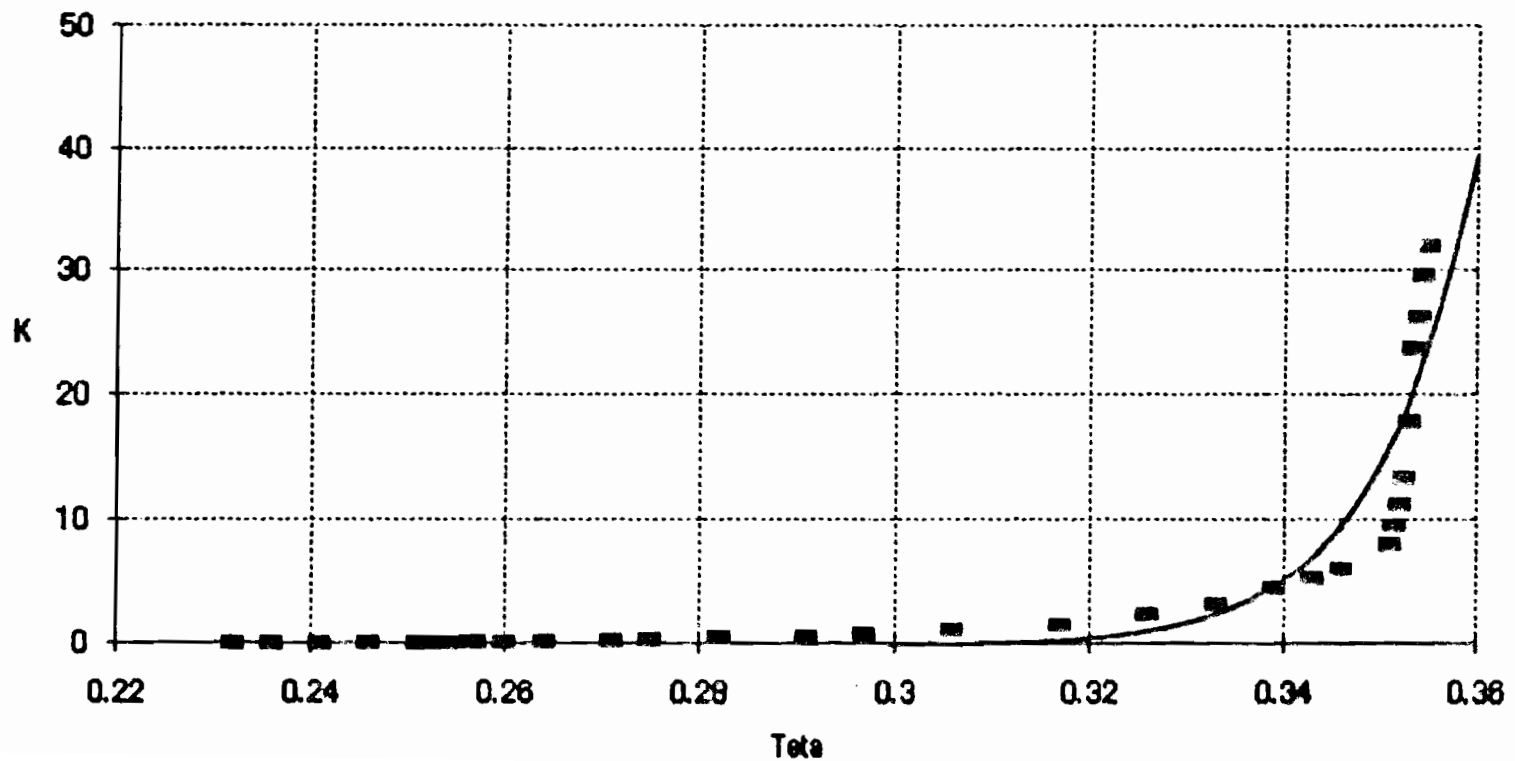
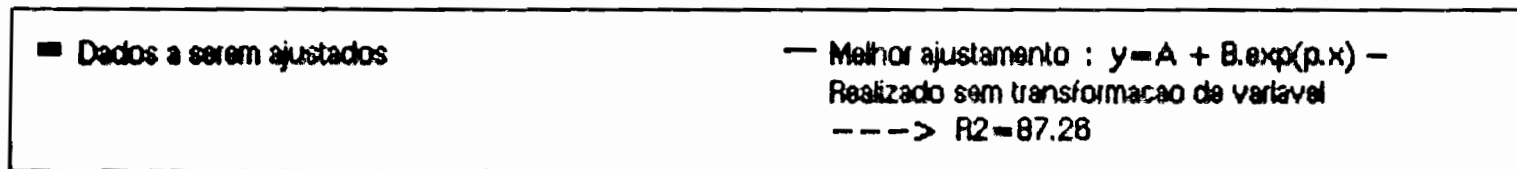
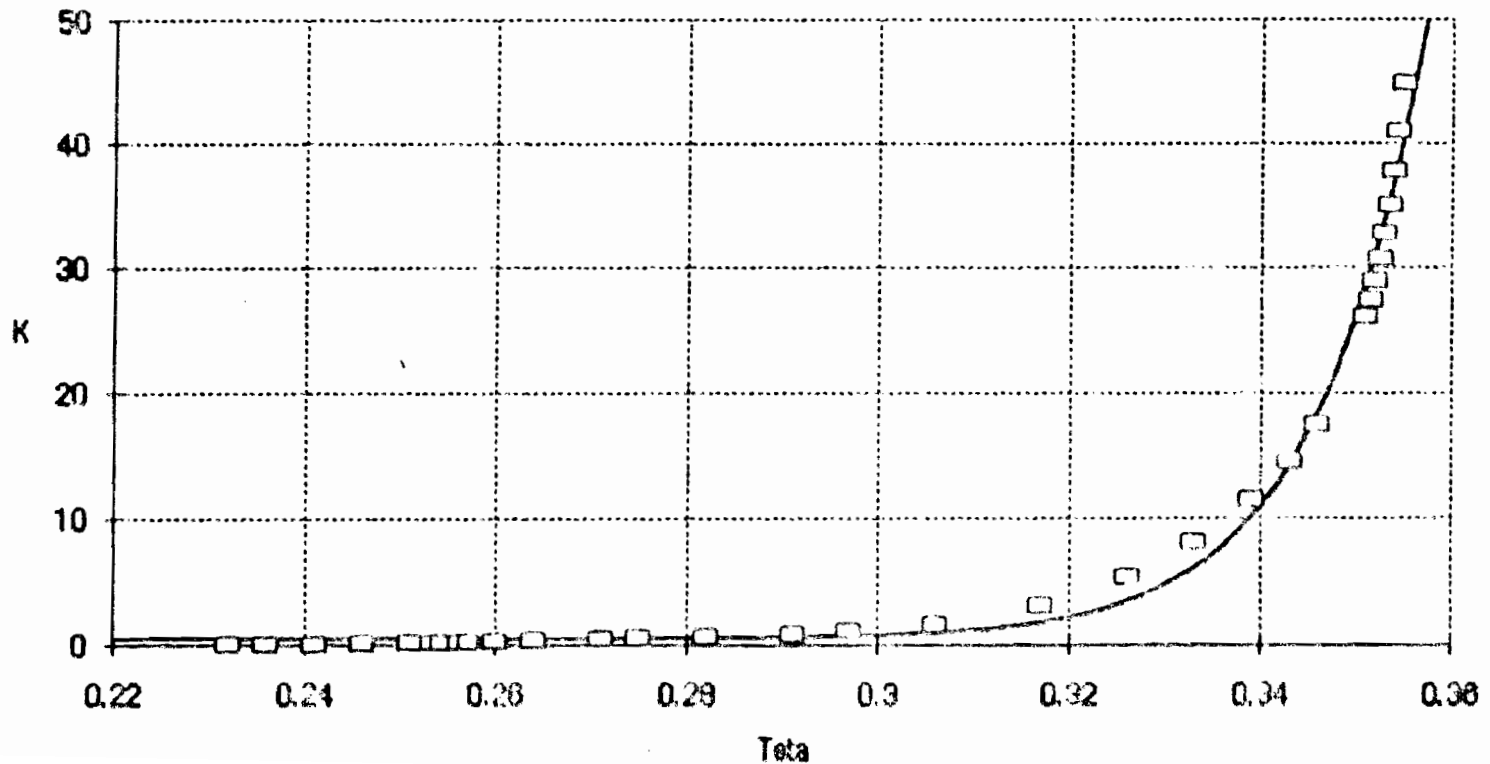
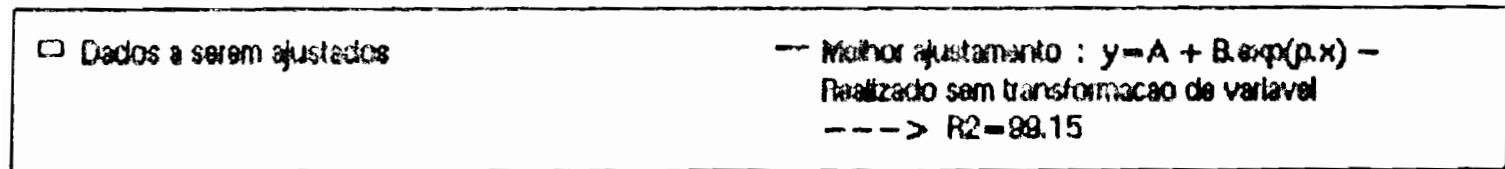


Fig. 8b - RELACAO CONDUTIVIDADE HIDRAULICA ( K cm/dia ) vs UMIDADE ( Teta cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> )  
 Ajustamento dos dados obtidos pelo metodo assistido por calculo  
 Ulimetro 3 - Profundidade 25 cm  
 Unidades aritmeticas



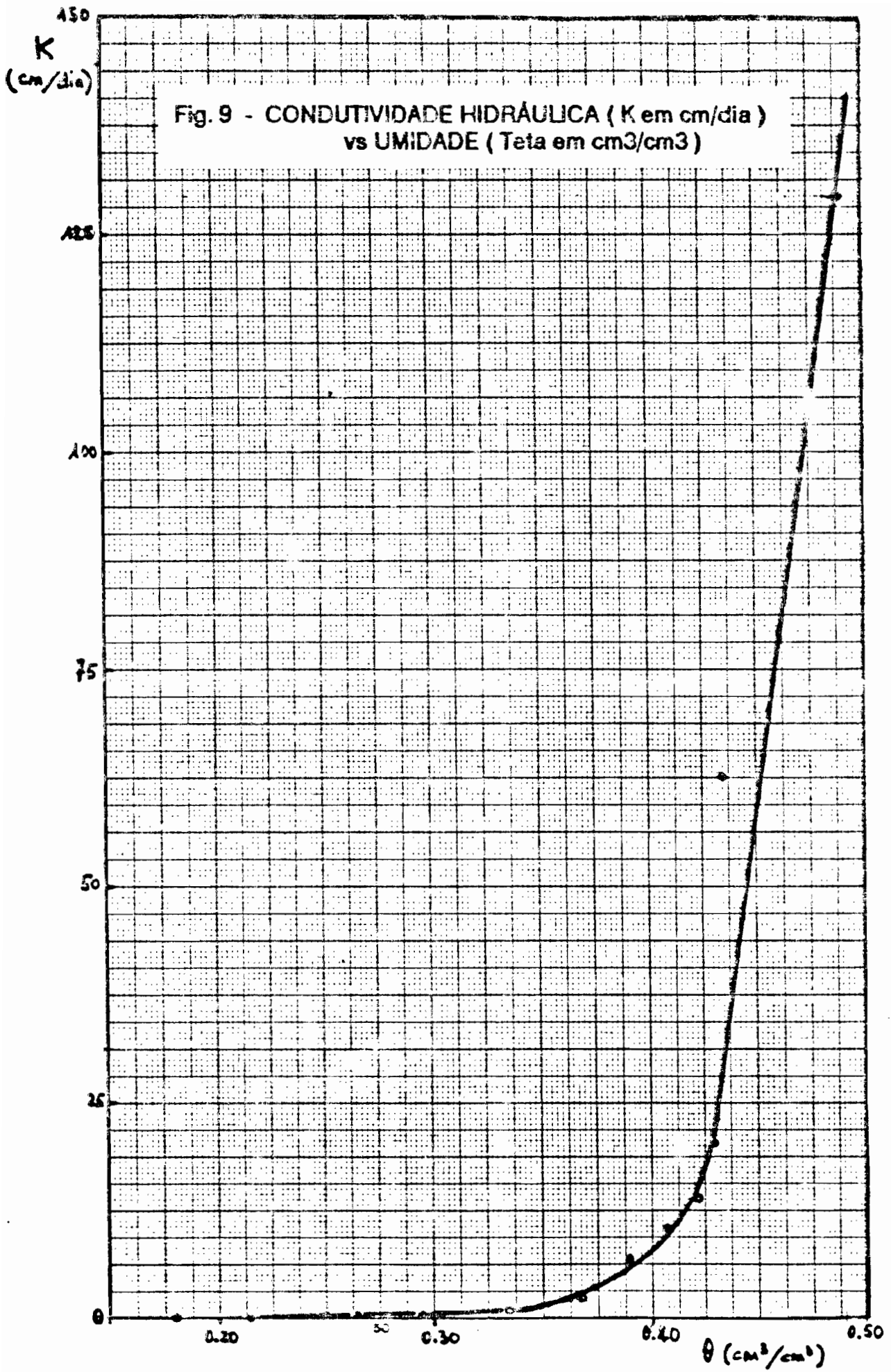


Fig. 10 - POTENCIAL MÁTRICO (h em cm de água)  
vs UMIDADE (Teta em cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

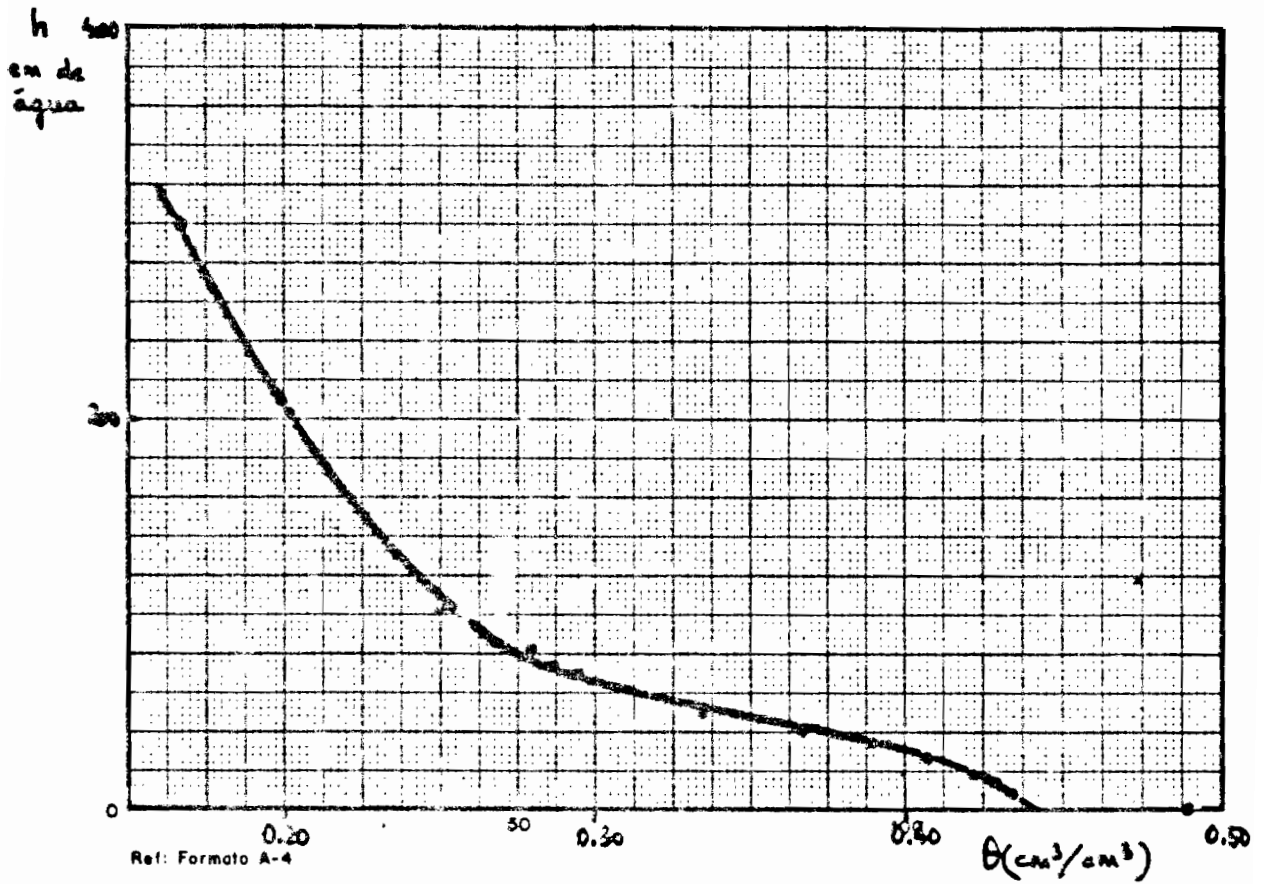


Fig. 11 - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA RELATIVA  
vs PERCENTAGEM DE Na+ TROCÁVEL

