



**Universidade Federal da Paraíba**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSOS DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
CAMPOS II – CAMPINA GRANDE**

**MODELO MATEMÁTICO DA FILTRAÇÃO RÁPIDA PARA  
PROJETOS DE FILTRO DE AREIA**

**MANOEL DO VALE SALES**

**CAMPINA GRANDE**

**JULHO — 1990**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA


CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - C C T

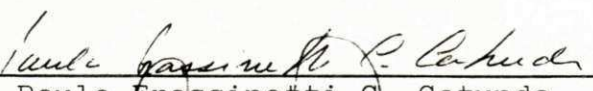
" MODELO MATEMÁTICO DA FILTRAÇÃO RÁPIDA PARA  
PROJETO DE FILTROS DE AREIA "

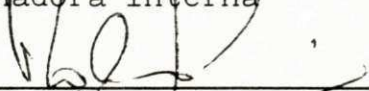
MANOEL DO VALE SALES

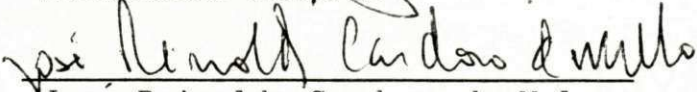
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DE PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIENCIA (M.Sc).

APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
Adrianus C. Van Haandel  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Paula Frassinetti C. Catunda  
Examinadora Interna

  
\_\_\_\_\_  
Roberto Sérgio Farias de Souza  
Examinador Externo

  
\_\_\_\_\_  
José Reynolds Cardoso de Melo  
Examinador Externo

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAIBA - BRASIL  
JULHO - 1990

---

S163m Sales, Manoel do Vale  
Modelo matematico da filtracao para projeto de filtros de areia / Manoel do Vale Sales. - Campina Grande, 1990. 142 f. : il.

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

1. Filtracao 2. Analise Matematica 3. Filtros de Areia para Tratamento da Agua 4. Agua - 5. Engenharia Sanitaria 6. Dissertacao I. Haandel, Adrianus Cornelius Van II. Catunda, Paula Frassinetti C. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 628.16.067.1(043)

---

A Lísia, Rachel e Lucas

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

Aos professores Adrianus Van Haandel e Paula F. Catunda - orientadores e amigos - que com sua eficiência, dedicação e incentivo possibilitaram a conclusão desse trabalho.

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará; que permitiu a realização dessa pesquisa através de auxílio financeiro para construção dos filtros pilotos e por ter me concedido disponibilidade para frequentar o curso.

A minha família, pela compreensão demonstrada pelo meu afastamento durante a realização desse trabalho.

Aos colegas e amigos da estação de tratamento d'água do Gavião, pela ajuda na montagem dos filtros pilotos e na coleta de amostras dos testes de filtração e pelas horas de agradável convivência.

Aos funcionários da Cagece Fco. Lopes Neto e José Hélio Carioca pelos desenhos e serviços de datilografia.

R E S U M O

Esse trabalho procura demonstrar a viabilidade de uma análise matemática para a escolha ótima da areia para filtros rápidos. Através de testes realizados em filtros pilotos com a água decantada da estação de tratamento d'água do Gavião, em Fortaleza, e a partir de um modelo matemático de filtração rápida, desenvolveu-se equações para determinar a remoção de turbidez e a perda de carga na camada filtrante, em função da velocidade de filtração, profundidade da camada, tempo de filtração e turbidez e temperatura da água afluyente ao filtro.

Realizou-se testes de filtração com diversas taxas de filtração e através de análise dos dados coletados, fez-se uma adaptação do modelo matemático da filtração de Lerk (1), que utiliza como parâmetro a remoção de sólidos em suspensão, para um modelo que utiliza a remoção de turbidez.

As equações desenvolvidas foram utilizadas para demonstrar sua precisão comparando-se os seus resultados com os dados dos testes de filtração e para a otimização dos filtros da estação de tratamento do Gavião.

A B S T R A C T

In this work it is attempted to demonstrate the feasibility of a mathematical analysis to optimize rapid sand filters. From experimental filtration of decanted water from the Gavião Water Treatment Plant of Fortaleza and from a mathematical model for rapid filtration, equations were derived to describe turbidity removal and head loss over the filter bed as a function of filtration rate, depth of the filter layer, filtration time and turbidity and temperature of the filter influent.

Tests were carried out at different filtration rates and from an analysis of the collected data, a mathematical model was developed from Lerk's filtration theory, in which turbidity instead of suspended solids concentration is used as a parameter.

To demonstrate the precision as a parameter the theoretical results were compared with the experimental ones of filtration tests. The equations were subsequently used to optimize filtration at the Gavião Plant.

SÍMBOLOS USADOS

- $d_0$  - Diâmetro da areia
- $C_0$  - Concentração inicial de partículas em suspensão na água
- $C$  - Concentração de partículas em suspensão na água
- $p_0$  - Porosidade
- $v$  - Velocidade de filtração
- $\sigma$  - Concentração gravimétrica de impurezas na camada filtrante
- $\sigma_v$  - Concentração volumétrica de impurezas na camada filtrante
- $\rho_d$  - Massa específica dos depósitos na camada filtrante
- $\lambda$  - Coeficiente de filtro ou módulo de impedimento
- $H$  - Perda de carga
- $I_0$  - Perda de carga por unidade de comprimento
- $\nu$  - Viscosidade cinemática
- $\Phi$  - Coeficiente empírico conforme seja definido
- $k$  - Coeficiente empírico conforme seja definido



I N D I C E

	PÁGINA
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II - TEORIA MATEMÁTICA DA FILTRAÇÃO.....	3
2.1 - Introdução .....	3
2.2 - Mecanismos da Filtração .....	6
2.2.1 Mecanismos de Transporte .....	7
2.2.2 Mecanismos de Aderência.....	8
2.3 - Teoria Matemática .....	9
2.3.1 Remoção das Partículas em Suspensão...	9
2.3.2 Perda de Carga na Camada Filtrante....	12
2.4 - Aplicação da Teoria Matemática de fil- tração.....	16
CAPÍTULO III - EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA .....	19
3.1 - Filtros Pilotos .....	19
3.1.1-Colunas de Filtração .....	19
3.1.2-Dispositivos de Coleta de Amostras....	19
3.1.3-Sistema de Entrada .....	23
3.1.4-Sistema de Saída .....	23
3.1.5-Sistema de Lavagem .....	24
3.1.6-Piezômetros .....	24
3.2 - Operação dos Filtros Pilotos .....	24
3.2.1-Testes de Filtração .....	24
3.2.2-Lavagem dos Filtros .....	25

		PÁGINA
	3.3 - Material Filtrante .....	26
	3.3.1 Peso Específico da Areia .....	26
	3.3.2 Porosidade .....	26
	3.2 - Adaptação das Equações da Teoria de Lerk .....	29
CAPÍTULO	IV - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
	4.1 - Análise dos Dados Experimentais .....	34
	4.2 - Resultados da Pesquisa .....	37
	4.3 - Considerações Sobre o Modelo de Lerk...	59
CAPÍTULO	V - APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS..	63
	5.1 - Escolha do Material Filtrante para a Estação de Tratamento do Gavião .....	63
	5.2 - Otimização dos Filtros .....	65
CAPÍTULO	VI - CONCLUSÕES.....	74
CAPÍTULO	VII - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	76
ANEXO	I - Apresentação de Quadros e Gráficos Comparativos entre Dados Experimentais e Valores Teóricos .....	77
ANEXO	II - Fluxogramas dos Programas para Computador Utilizados na Pesquisa .....	136
BIBLIOGRAFIA	.....	141

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A filtração rápida em camadas de areia, com fluxo descendente, é um processo comumente utilizado em plantas de tratamento de água para abastecimento público. A eficiência desse processo é comprovada, embora condicionada por diversos fatores que influem de maneira significativa na qualidade da água filtrada. Dentre esses fatores, além do tipo de meio filtrante e da velocidade de filtração, as características físico-químicas da solução aquosa e o tratamento prévio a que a água é submetida tem uma importância fundamental na eficiência do processo. Assim, a escolha adequada de um material filtrante deve ser precedida de uma investigação experimental.

O objetivo da pesquisa foi procurar determinar a adaptação necessária aos modelos matemáticos existentes, que descrevem o processo da filtração com respeito à remoção de sólidos em suspensão presentes na água, para um modelo que explicasse satisfatoriamente o processo para a remoção de turbidez. A turbidez foi escolhida como parâmetro de avaliação por ser facilmente determinável com acurada precisão e estar mundialmente incluída nos padrões de potabilidade.

Dentre os modelos matemáticos conhecidos, o modelo de Lerk ( 1 ) apresentou-se como o mais apropriado para o objetivo do estudo, por ser bastante simples e semelhante a alguns outros modelos. Ao fim da pesquisa, as equações estabelecidas para determinação da remoção de turbidez e aumento da perda de carga deveriam ser suficientemente precisas, de modo a permitir sua utilização na escolha da granulometria da areia em projetos de plantas de tratamento de água.

A pesquisa desenvolveu-se em filtros pilotos adequadamente montados e operados na Estação de Tratamento de água do Gavião, responsável pelo abastecimento de Fortaleza-Ce, no período de abril a dezembro de 1988.

O estudo dividiu-se em 3 etapas:

1. Montagem da bancada dos filtros pilotos e preparação da areia.
2. Testes de filtração, utilizando-se como afluente dos filtros a água normalmente produzida pela estação de tratamento através dos processos de coagulação-floculação e decantação. As taxas de filtrações aplicadas aos filtros variaram desde  $120\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$  até valores superiores a  $500\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ .
3. Análise dos dados coletados através de microcomputador. Procurou-se, a partir dos resultados experimentais, determinar as interrelações entre as variáveis e os parâmetros estudados.

A equação da perda de carga, determinada pela pesquisa, mostrou-se de uma precisão bastante satisfatória, quando comparados os valores calculados pela equação como os valores experimentais. Quanto à equação de remoção de turbidez, embora não tenha demonstrado precisão para determinar o valor da turbidez remanescente em diversas profundidades, apresentou resultados satisfatórios quanto à profundidade em que ocorria a remoção máxima, considerando-se que havia um valor mínimo de turbidez que os filtros praticamente não conseguiam diminuir, independentemente da velocidade de filtração aplicada ou do meio filtrante utilizado. Ou seja, a equação de remoção determina, com razoável precisão, a profundidade além da qual não ocorre modificação na qualidade da água.

## CAPÍTULO II

### TEORIA MATEMÁTICA DA FILTRAÇÃO

#### 2.1 Introdução

Um modelo matemático para descrição do processo de filtração rápida, que produza resultados aceitáveis quando comparados com dados experimentais e que possa ser utilizado com razoável facilidade, permite a escolha da melhor concepção para o projeto de filtros. Apesar de os experimentos para fazer a aferição desse modelo exigirem algum tempo, este será bastante inferior ao tempo necessário para a realização de testes com os diversos arranjos que se pode fazer com as variáveis que interferem na filtração. Inevitavelmente, porém, o desenvolvimento de um modelo matemático para a filtração requer, além de experimentação com a água que se deseja filtrar, conhecimento dos mecanismos envolvidos nesse processo.

Filtração é o processo de purificação que consiste na remoção de partículas em suspensão e coloidais presentes na solução aquosa que passa através de um meio poroso. Em geral, a filtração é a operação final que se realiza em um estação de tratamento de água antes da cloração e, por consequência, é a principal responsável pela produção de água com qualidade que atenda aos padrões de potabilidade.

Em abastecimento público de água, normalmente camadas de areia são usadas como material filtrante. A areia apresenta como vantagens a larga disponibilidade, baixo custo para sua preparação, sua estabilidade mecânica, e



resultados satisfatórios amplamente comprovados.

Durante o processo de filtração, as impurezas são removidas da água acumulando-se sobre os grãos e nos interstícios da camada filtrante, dessa forma reduzindo o espaço efetivo entre os grãos, acarretando o crescimento da resistência à passagem do fluxo da água e diminuindo a eficiência da filtração. Após algum tempo, essa resistência torna-se tão alta ou a qualidade do efluente tão baixa que a lavagem do filtro é necessária. O intervalo entre as lavagens e a maneira como são feitas determinam a distinção entre os dois grupos de filtros: filtros lentos e filtros rápidos, que também diferem grandemente em relação à taxa de filtração aplicada, definida como a divisão da vazão pela área da camada filtrante.

Nos filtros lentos a água passa por gravidade, em sentido descendente, através de uma camada de areia fina, em baixa velocidade. Usualmente as taxas de filtração variam de 3 a  $5\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ . Essas velocidades são tão baixas que somente após um longo período de serviço as lavagens tornam-se necessárias. Como a camada filtrante é composta de areia fina, as impurezas retidas acumulam-se no topo do leito e a limpeza dos filtros é feita pela raspagem e retirada de uma fina capa de poucos centímetros de espessura. Normalmente os intervalos entre as lavagens são superiores a uma semana.

Os filtros rápidos de fluxo descendente são projetados para serem operados a taxas de filtração relativamente elevadas. Nos filtros com camada única de areia a taxa historicamente usada é de cerca de  $120\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ . A areia é cuidadosamente preparada com granulometria geralmente variando de 0,5mm a 2,0mm. Em decorrência da velocidade de filtração elevada, a obstrução do leito filtrante acontece rapidamente, tornando-se inevitável que as lavagens sejam feitas em intervalos curtos, de cerca de um dia. Como o leito filtrante é composto de areia variando de

média a grossa, as impurezas retidas penetram profundamente no leito, fazendo com que a limpeza do filtro somente seja possível com um fluxo d'água em sentido inverso ao sentido de filtração.

A lavagem em contrafluxo provoca a fluidificação e expansão do leito, carreando junto com a água de lavagem as impurezas acumuladas no filtro. Esse tipo de lavagem causa uma estratificação no leito filtrante, fazendo com que os grãos menores se localizem sobre os grãos maiores. Dessa forma, a água a ser filtrada passa primeiro pelas camadas de material mais fino, ocasionando o aumento muito rápido da perda de carga e reduzindo as corridas de filtração (intervalo entre as lavagens). Essa desvantagem pode ser atenuada com o uso de areia muito pouco de suniforme que, no entanto, tem o custo de preparação muito elevado.

Os filtros de camada múltiplas foram desenvolvidos para permitir a aplicação de taxas de filtração elevadas com corridas relativamente longas, já que parte do problema causado pela estratificação deixa de existir com a utilização de material de maior granulometria e menor peso específico que a areia, colocado na parte superior da camada filtrante. Assim, a água passa primeiro pela camada de maior permeabilidade.

No entanto, como a obstrução, e conseqüentemente o aumento da perda de carga, são causados pela retenção de matéria em suspensão presente na água, essa dificuldade torna-se menor no tratamento de águas com baixa concentração de sólidos em suspensão.

No caso do Nordeste do Brasil, onde é comum o uso de açudes como mananciais de água bruta, normalmente são encontradas água com pequenas concentrações de sólidos em suspensão. Os filtros de camada única de areia podem, então, ser uma solução adequada para taxas de filtração elevadas.

## 2.2 Mecanismos da Filtração

A água que entra em um filtro, independente de ter recebido um pré-tratamento ou não, contém uma variedade muito grande de partículas em suspensão, com tamanhos diversos, desde flocos relativamente grandes até vírus. Pode-se então encontrar partículas com cargas elétricas ou não, ou microflocos com polímeros adsorvidos. A retenção dessas impurezas ocorre em maior ou menor proporção no leito filtrante, principalmente pela aderência à superfície dos grãos, formando-se uma película sobre eles. A resistência dessa aderência aos esforços produzidos pela passagem da água, em velocidade sempre crescente causada pela diminuição dos espaços vazios do leito filtrante, é função da grandeza das forças que mantêm agregados as partículas a cada elemento do meio granular. À medida que as forças de arraste causadas pelo fluxo da água aumentam, como consequência da velocidade sempre maior, muitas partículas vão se desagregando do meio filtrante, penetrando cada vez mais, até, eventualmente, saírem juntas ao efluente.

Os flocos grandes, com volume maior que os poros da camada granular, ficam retidos pela simples ação de coar. As partículas de menor diâmetro, no entanto, penetram livremente no leito e percorrem distâncias relativamente grandes antes de aderirem aos grãos da camada filtrante.

A filtração é, então, considerada, como o resultado de dois mecanismos distintos e complementares: transporte e aderência. De início, as partículas a serem removidas são transportadas da suspensão para a superfície dos grãos e permanecerão aderidas a eles sempre que resistam às forças de cisalhamento resultante das condições hidrodinâmicas do fluxo.

## 2.2.1 Mecanismos de Transporte

### a) Ação de Coar

Mecanismo predominante na filtração de ação superficial, onde ocorre pequena penetração das impurezas no interior do filtro. O material retido deposita-se principalmente nas primeiras capas do meio filtrante e ocorre, obviamente, com as partículas que têm volume maior que o volume dos poros.

### b) Sedimentação

Em 1904 Hazen ( 2 ) considerando os poros da areia como pequenas unidades de sedimentação, sugeriu que a remoção de partículas menores que o volume dos poros seriam retidas pela ação da gravidade. A sedimentação, no entanto, somente pode acontecer com o material em suspensão relativamente grande e denso, cuja velocidade de assentamento seja alta e em região do leito filtrante onde a carga hidráulica seja baixa.

### c) Intercepção

Normalmente, o regime de fluxo durante a filtração é laminar, o que faz com que as partículas em suspensão se movam segundo as linhas de corrente. Assim, como as partículas tem densidade praticamente igual à da água, sempre que a distância entre as linhas de corrente e os grãos do meio filtrante seja menor que a metade do diâmetro das partículas que conduzem, ocorrerá a intercepção.

### d) Impacto Inercial

Durante o fluxo, as linhas de corrente divergem ao aproximar-se dos grãos da camada filtrante fa-

zendo com que partículas com quantidade de movimento suficiente para manter sua trajetória choquem-se com os grãos.

#### e) Difusão

Partículas relativamente pequenas quando em suspensão em um meio líquido, apresentam um movimento errático causado por um intenso bombardeio das moléculas de água. Esse fenômeno é conhecido como movimento browniano. Há, como consequência, uma tendência dessas partículas se difundirem em áreas randômicas percorrendo distâncias proporcionais à raiz do tempo de difusão.

### 2.2.2 Mecanismos de Aderência

Para que o contato das partículas transportadas da suspensão com os grãos do leito filtrante resulte efetivo, produzindo a aderência, não apenas fenômenos físicos mas também fatores químicos precisam estar atuando. Dentre esses fatores físico-químico, os mais importantes são:

#### a) Forças de Van der Waals combinadas com forças eletrostáticas.

Para esse mecanismo ser responsável pela aderência, três casos podem ocorrer:

- i. Os grãos e as partículas de suspensão possuem cargas elétricas opostas;
- ii. Os grãos do meio filtrante são negativos e as partículas não possuem carga elétricas;
- iii. Os grãos e as partículas possuem cargas iguais. No entanto, as forças hidrodinâmicas podem aproximar o suficiente as partículas aos grãos para que as forças de Van der Waals possam predominar sobre a repulsão causada pelas cargas elétricas iguais.



## b) ponte química

As cadeias poliméricas, resultante da desestabilização dos coloides, aderidas às partículas em suspensão, deixam seus segmentos estendidos na água, podendo ser absorvidas por partículas aderidas aos órgãos, por segmentos de cadeias de partículas já aderidas ao meio filtrante, ou por locais ainda vazios entre os grãos do filtro.

## 2.3 Teoria Matemática

### 2.3.1 Remoção das partículas em suspensão

A teoria matemática da filtração supõe inicialmente a camada filtrante limpa, com espessura  $L$ , composta de grãos esféricos com diâmetro uniforme  $d_0$  e porosidade  $p_0$ . Durante a filtração as impurezas da água bruta são removidas e depositadas sobre a superfície dos grãos. A concentração inicial das impurezas  $C_0$  diminui para a concentração  $C$ , a uma profundidade  $y$  abaixo da superfície do leito, enquanto que o diâmetro dos grãos aumenta de  $d_0$  para  $d$  e a porosidade diminui de  $p_0$  para  $p$ . Para  $v$  como taxa de filtrante constante, a velocidade real do fluxo no interior da camada filtrante aumenta de  $v/p_0$  para  $v/p$ .

Para desenvolvimento da análise matemática, a maioria dos autores utiliza duas equações básicas: (1) a equação de remoção de impurezas e (2) a equação da continuidade. O decréscimo de concentração de impurezas, quanto à equação de remoção, é considerado como proporcional à concentração ainda presente. Tem-se, assim, a equação da remoção de partículas:

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \lambda c$$

$c$  - concentração de sólidos em suspensão remanescente.

$\lambda$  - coeficiente do filtro ou módulo de impedimento.

Com as anotações da fig. 2.1, a equação de continuidade pode ser escrita como:

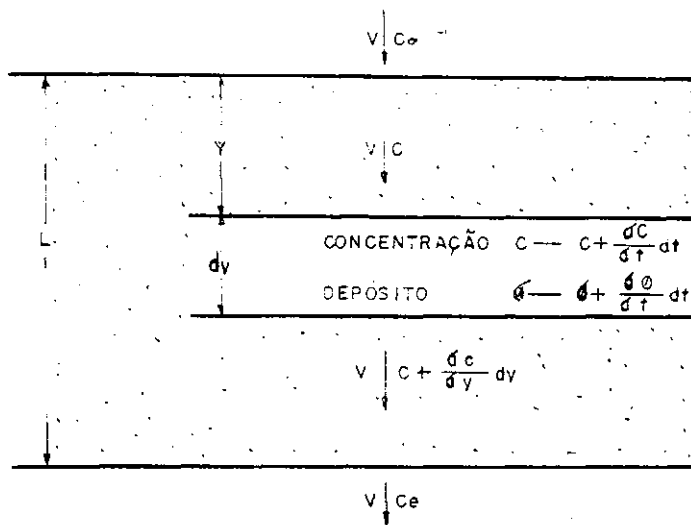


FIG. 2.1 - VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.

$$v.c.dt = v. (c + \frac{\partial c}{\partial t} . dy).dt + p \frac{\partial c}{\partial t} d\sigma dy + \frac{\partial c}{\partial t} d\sigma dy, \quad \text{ou}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - v \frac{\partial c}{\partial t} - p \frac{\partial c}{\partial t}.$$

A concentração varia intensamente com a profundidade mas muito pouco com o tempo, permitindo simplificar para

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = - v \frac{\partial c}{\partial t}$$

Com  $\sigma$  como a concentração gravimétrica de impurezas. A redução da porosidade  $p_0$  determinada pela concentração volumétrica de impurezas,

$$\sigma v = \frac{\sigma}{\rho d} \quad \text{onde}$$

$\sigma v$  - concentração volumétrica

$\rho d$  - massa específica dos depósitos

Para resolução das equações de remoção e da continuidade, o valor de  $\lambda$  precisa ser conhecido. Considerações teóricas são insuficientes, e muitos pesquisadores tem procurado determinar  $\lambda$  como função de diferentes parâ-

metros relativos a características do leito filtrante e da água a ser filtrada. No entanto, devido a variações na composição da água, os resultados encontrados diferem entre si.

Abaixo são mostrados algumas fórmulas:

$$\text{Iwasaki (3)} \quad \lambda = \lambda_0 (1 + k_1 \sigma v)$$

$$\text{Lerk (7)} \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma v}{n p_0}\right)$$

$$\text{Maroudas (4)} \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 - k_2 \frac{\sigma v}{p_0}\right)$$

$$\text{Ives (5)} \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 + k_3 \sigma v - k_4 \frac{\sigma v^2}{\rho_0 - \sigma v}\right)$$

$$\text{Mackale (6)} \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 + k_5 \frac{\sigma v}{\rho_0}\right)^{n_1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma v}{\rho_0}\right)^{n_2}$$

Com  $k_i$  como coeficiente e  $n_j$  como expoente a serem determinados experimentalmente.

Substituindo-se o valor de  $\lambda$ , conforme a teoria de Lerk, nas equações de remoção e da continuidade,

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \lambda c = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma v}{n p_0}\right) c$$

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{v} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{p d}{v} \frac{\partial \sigma v}{\partial t}, \text{ e}$$

Com as condições de contorno:

$$y = 0, C = C_0 \text{ e}$$

$$t = 0, \sigma v = 0, \text{ fazendo-se ainda}$$

$$\alpha = \frac{v \cdot C_0 \cdot \lambda_0}{n \cdot p d \cdot \rho_0}, \text{ essas equações tem como solução:}$$

$$C = C_0 \frac{e^{\alpha t}}{e^{\lambda_0 y} + e^{\alpha t} - 1}$$

$$\sigma v = n p_0 \frac{e^{\alpha t} - 1}{e^{\lambda_0 y} + e^{\alpha t} - 1}$$

O valor de  $\lambda_0$  ainda precisa ser conhecido.

Os trabalhos de pesquisas mencionados anteriormente determinaram a interrelação de  $\lambda_0$  com a taxa de filtração apli-

cada e diferentes diâmetros dos grãos.

Todos os resultados podem ser escritos como:

$$\lambda_0 \sim \frac{1}{v^a v^b d_0^c}$$

No entanto, os valores de a, b e c diferem bastante. Abaixo alguns desses valores:

	a	b	c
Iwasaki	0	1	1
Lerk	1	1	3
Maroudas	0	1	0
Ives	2	1	1
Mackle	- 0,5	1	2

Segundo a teoria de Lerk, e adotando, segundo Huisman (7), o valor da constante de proporcionalidade em  $9 \times 10^{-18}$ , tem-se:

$$\lambda_0 = \frac{9 \times 10^{-18}}{v \cdot v \cdot d_0^3}$$

### 2.3.2 Perda de carga na camada filtrante

A perda de carga por unidade de comprimento oposta ao fluxo de água que atravessa uma tubulação, com diâmetro hidráulico D, pode ser calculado por,

$$I_0 = \frac{H}{L} = f \frac{v^2}{D \cdot 2g}, \text{ onde:}$$

v - velocidade do fluxo.

g - aceleração da gravidade.

f - coeficiente de rugosidade.

Quando o número de Reynolds

$Re = \frac{vD}{\nu}$  é menor que 2000, o fluxo é laminar e f é calculado por

$f = \frac{a}{Re}$ , onde a é uma constante que varia de 64 a 96, dependendo da seção transversal da tubulação.

Adotando o valor médio a = 80, e substituindo na equação anterior, tem-se:

$$I_0 = 40. \frac{v}{g} \frac{v}{D^2}$$

Para aplicação dessa fórmula ao fluxo da água que atravessa a camada de areia de um filtro, supõe-se que os poros entre os grãos formam  $m$  tubos capilares por  $m^2$ , com diâmetro  $e_0$  e comprimento  $l$  ( $l > L$ ).

A figura 2.2 ilustra essa suposição.

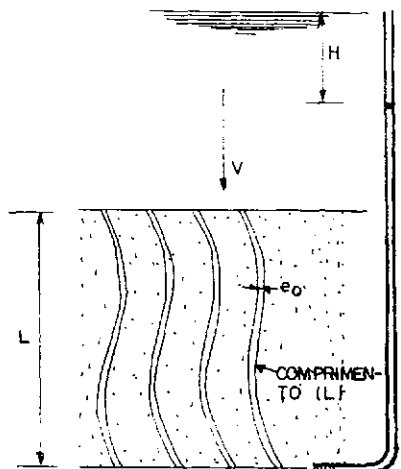


FIG. 2.2 — MODELO DOS TUBOS CAPILARES.

Para  $v$  como taxa de filtração, a velocidade no capilar calcula-se por

$$v_{\text{cap}} = \frac{\frac{v}{m}}{\frac{\pi e_0^2}{4}}$$

A perda de carga inicial no capilar torna-se

$$I_0 = \frac{H}{e} = \frac{160}{\pi} \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{v}{m e_0^4} \cdot 4, \text{ e na camada filtrante}$$

$$I_0 = \frac{H}{L} = \frac{160}{\pi} \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{v}{m e_0^4} \cdot \frac{l}{L}$$

O volume dos capilares é igual ao volume dos poros,  $P_0 L$ .

Pode-se então fazer



$$P_0 L = m l \frac{\pi}{4} e_0^2$$

Para  $S_0$  como área por  $m^3$ , tem-se

$$S_0 L = m e \pi e_0$$

Dessas igualdades, pode-se calcular:

$$e_0 = \frac{4 p_0}{S_0}, \quad m = \frac{S_0^2}{4 \pi p_0} \cdot \frac{L}{l}.$$

Substituindo na equação da perda de carga inicial

$$I_0 = 2,5 \frac{v}{g} \frac{S_0^2}{p_0^3} \left(\frac{l}{L}\right)^2 \cdot v$$

Para o valor do fator de tortuosidade

$(l/L)$  estimado em  $\sqrt{2}$

$$I_0 = \frac{5v}{g} \frac{S_0^2}{p_0^3} \cdot v.$$

Durante a filtração, as partículas retidas depositadas no interior dos poros, reduzem a porosidade de  $p_0$  para  $p$  e a área específica de  $S_0$  para  $S$ , aumentando a perda de carga de  $I_0$  para  $I$ :

$$I = 5 \frac{v}{g} \frac{S^2}{p^3} \cdot v, \text{ ou}$$

$$I = I_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^3 \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^2$$

No modelo dos tubos capilares, o diâmetro dos poros diminui de  $e_0$  para  $e$ , mas o número e o comprimento dos capilares permanece constante,

$$m = \frac{S_0^2}{4 \pi p_0} \cdot \frac{l}{L} = \frac{S^2}{4 \pi p} \cdot \frac{l}{L} \text{ ou}$$

$$\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 = \frac{p}{p_0}$$

$$I = I_0 \left( \frac{p_0}{p} \right)^2 \text{ e com } \sigma v = p_0 - p$$

$$I = I_0 \left( \frac{p_0}{p_0 - \sigma v} \right)^2$$

A perda de carga por unidade de comprimento  $I$  não é constante, aumentando com o tempo. A perda de carga total, a uma profundidade  $y$ , pode ser calculada por

$$H = \int_0^y I dy$$

Com o valor de  $\sigma v$  calculado anteriormente

$$\sigma v = n p_0 \frac{e^{\alpha t} - 1}{e^{\lambda_0 y} + e^{\alpha t} - 1}, \text{ substituindo e resolvendo a integral}$$

definida, tem-se

$$H = \frac{I_0}{\lambda_0} \frac{\lambda_0 y}{(1-n)^2} \frac{n^2 \cdot (e^{\lambda_0 y} - 1) \cdot (e^{\alpha t} - 1)}{(1-n)(e^{\lambda_0 y} + (1-n)(e^{\alpha t} - 1))((1-n)e^{\alpha t} + n)} -$$

$$\frac{n(2-n)}{(1-n)^2} \cdot \ln \frac{e^{\lambda_0 y} + (1-n)(e^{\alpha t} - 1)}{(1-n) e^{\alpha t} + n}$$

Tem-se, então, duas equações da forma

$$C = C_0 \cdot f_1(y, t), \quad e$$

$$H = f_2(y, t)$$

O modelo de Lerk foi desenvolvido para descrição do processo de filtração, quanto à remoção de sólidos em suspensão. No entanto, a determinação dessa concentração é bastante imprecisa e não muito prática, dificultando a aplicação desse modelo. Procurou-se, portanto, fazer alterações nessas equações de modo a permitir o uso da turbidez em substituição à concentração de sólidos em suspensão.

## 2.4 Aplicação da teoria matemática de filtração

Um tratamento matemático apresenta uma impressão exata do processo de filtração. Contudo, não deve ser esquecido que o desenvolvimento da teoria matemática está baseado em pressuposições que, na prática, não são inteiramente verdadeiras.

Segundo a teoria de Lerk

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma v}{n p_0}\right) \quad \text{com} \quad \sigma v = \frac{\sigma}{\rho d} \quad \text{e}$$

$$\lambda_0 = \frac{\beta}{v a v^b d_0^c}$$

Os valores de  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$ , que tem enorme influência nos resultados calculados pelas equações apresentadas, precisam ser determinados experimentalmente. Quanto aos diâmetros e à forma dos grãos, supostos esféricos e uniformes pela teoria matemática da filtração, algumas considerações precisam ser feitas:

1. Para grãos esféricos e uniformes, com diâmetro  $d_0$ , a área específica  $S_0$  é calculada por

$$S_0 = \frac{6}{d_0} (1 - p_0), \quad \text{com } p_0 \text{ como a porosidade;}$$

2. Para grãos esféricos com diâmetro variando de  $d_i$  a  $d_j$ , esta área é calculada, com grande aproximação, por

$$S_0 = \frac{6}{\sqrt{d_i d_j}} (1 - p_0), \quad \text{válido para } \frac{d_j}{d_i} < \sqrt{2};$$

3. Para grãos não esféricos, o valor de  $S_0$  pode ser calculado com o auxílio do fator de forma  $\Phi$ ,

$$S_0 = \frac{6}{\Phi \sqrt{d_i d_j}} (1 - p_0).$$

Para uma camada filtrante com grãos de formas constantes, o valor de  $\phi$  pode ser calculado. Na prática, porém, muitas formas ocorrem simultaneamente e determina-se o valor de  $\phi$  através de equação de Carman-Kozeny. Mede-se a perda de carga inicial oposta ao fluxo de água que atravessa a camada de areia composta por grãos com diâmetros entre duas peneiras consecutivas, e pela fórmula

$$H_0 = \frac{180\nu}{8} \left( \frac{1-P_0}{P_0} \right)^2 \frac{V}{(\phi \sqrt{d_i d_j})^2}$$

calcula-se o valor de  $\phi$

Para uma amostra de areia, de peso  $W$ , contendo várias frações de peso  $W_1$  a  $W_n$  e diâmetros dos grãos entre peneiras consecutivas  $d_1$  a  $d_{n+1}$ , a área específica pode ser calculada por adição:

$$S_0 = \frac{W_1}{W} S_1 + \frac{W_2}{W} S_2 + \dots + \frac{W_n}{W} S_n \text{ ou}$$

$$S_0 = \frac{6(1-P_0)}{W} \cdot \left( \frac{W_1}{\phi_1 \sqrt{d_1 d_2}} + \frac{W_2}{\phi_2 \sqrt{d_2 d_3}} + \dots + \frac{W_n}{\phi_n d_n d_{n+1}} \right)$$

Fazendo  $ds = \phi \sqrt{d_i d_j}$ , ( $ds$  com o valor do diâmetro de areia a ser usado na teoria matemática de filtração) e substituindo na equação

$$S_0 = \frac{6 \cdot (1-p_0)}{\phi \sqrt{d_i \cdot d_j}}, \text{ tem-se}$$

$$ds = \frac{6 \cdot (1-p_0)}{S_0}, \text{ ou}$$

$$\frac{W}{ds} = \frac{W_1}{\phi_1 \sqrt{d_1 \cdot d_2}} + \frac{W_2}{\phi_2 \sqrt{d_2 d_3}} + \dots + \frac{W_3}{\phi_n \cdot \sqrt{d_n \cdot d_{n+1}}}$$

O uso dessa equação permite calcular o diâmetro de uma amostra de areia não uniforme a ser adotada

pelas equações de teoria matemática.

Após a transformação das equações para permitir o uso da remoção de turbidez como parâmetro para avaliação do processo de filtração, pode-se resolver as equações

$$T = T_0 \cdot f_1'(y,t), \text{ e}$$

$$H = f_2'(y,t),$$

para diferentes diâmetros de areia e velocidades de filtração, determinando-se os valores ótimos da perda de carga ao fim da corrida de filtração, altura do leito filtrante, diâmetro da areia e velocidade de filtração para a água estudada.

## CAPÍTULO III

### EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Filtros Pilotos

Para desenvolvimento da pesquisa foram construídos três filtros sobre uma bancada de madeira. A planta piloto pode ser dividida em 6 partes: colunas de filtração, dispositivos de coleta de amostra, sistema de entrada, sistema de saída, sistema de lavagem e piezômetros. As figuras 3.1 e 3.2 mostram uma vista frontal e o isométrico das tubulações da ETA - piloto.

##### 3.1.1 Colunas de Filtração

Os filtros foram construídos em tubos de PVC, com diâmetro interno de 140mm, de 1,80m de comprimento. Ao longo de cada tubo fez-se uma abertura de 5cm por 1,50m e colou-se uma placa de acrílico, para permitir a visualização do leito filtrante. Os tubos foram fechados na parte superior por placas de teflon, com um furo central. Uma mangueira transparente com diâmetro de 3/8 de polegada foi fixada nesse furo, para possibilitar a medição da altura da coluna de água sobre o leito filtrante e permitir a saída de ar.

Na parte inferior de cada filtro, uma outra placa de teflon com furos de diâmetros de 1/16" foi colocada, formando assim um fundo falso. A figura 5.2 mostra um desenho esquemático de um filtro piloto.

##### 3.1.2 Dispositivos de coleta de amostras

Para extração de amostras, foi feita uma adaptação em válvulas utilizadas em lampiões a gás. Soldou-se

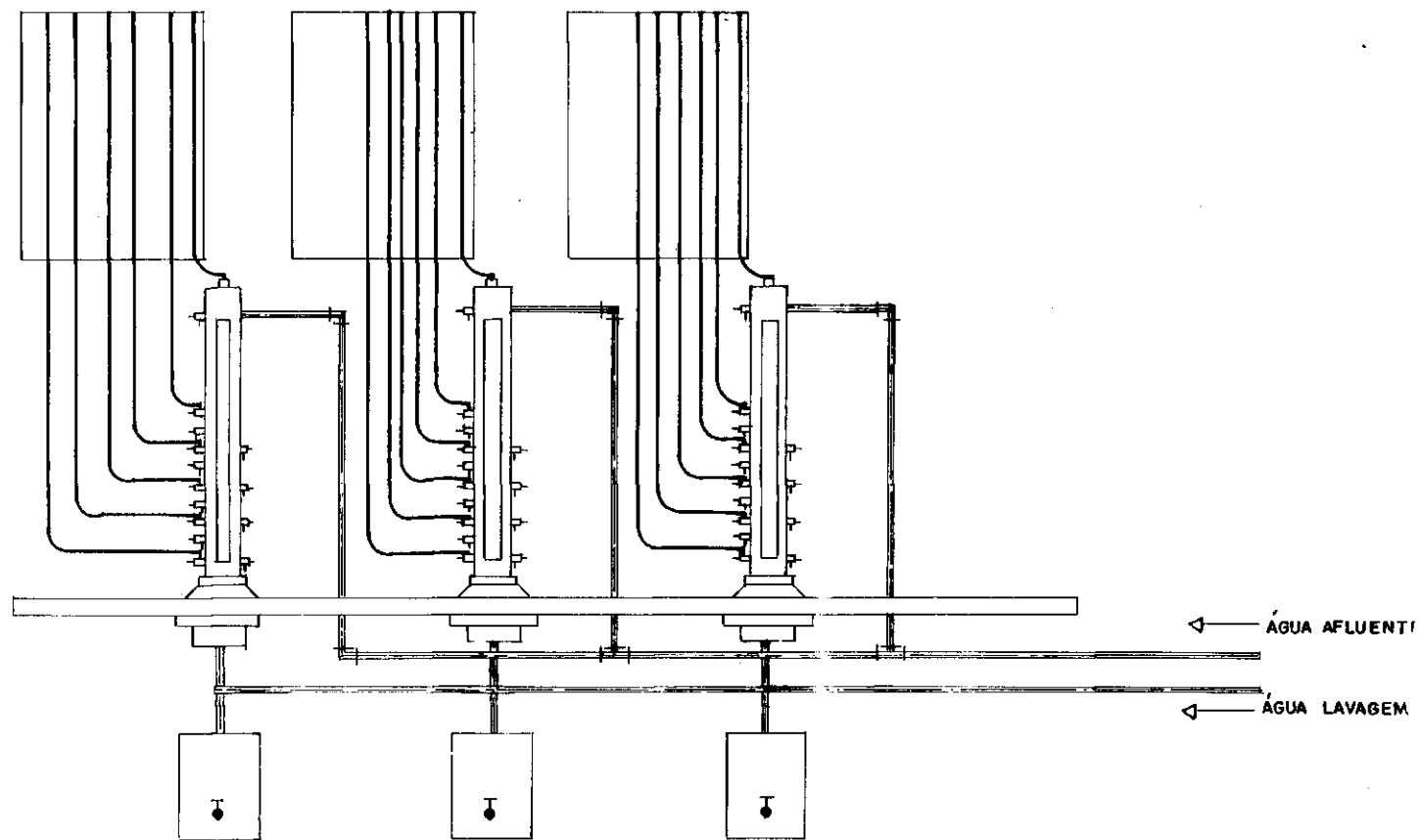


FIG. 3.1 - VISTA FRONTAL DOS FILTROS PILOTOS.

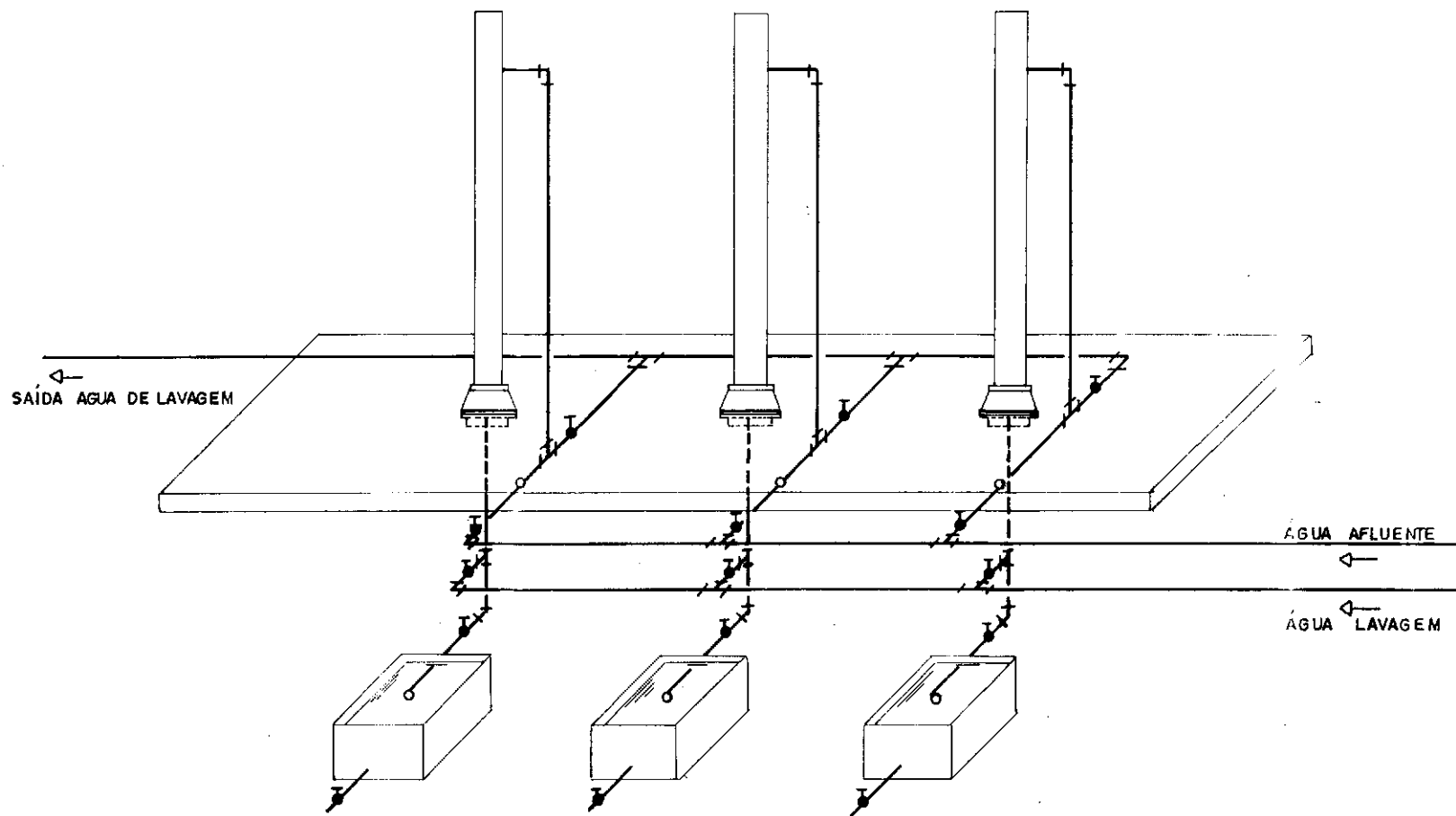


FIG. 3.2 - ISOMÉTRICOS DAS TUBULAÇÕES DOS FILTROS PILOTOS.



### LEGENDA

- ① - PAPEL MILIMETRADO.
- ② - PIEZÔMETROS.
- ③ - FILTROS.
- ④ - REGISTRO DE ENTRADA DA ÁGUA DE LAVAGEM.
- ⑤ - REGISTRO DE ÁGUA FILTRADA.
- ⑥ - REGISTRO REGULADOR DA VAZÃO DE FILTRAÇÃO.
- ⑦ - HIDRÔMETRO.
- ⑧ - REGISTRO DE ÁGUA AFLUENTE.
- ⑨ - REGISTRO DE SAÍDA DE ÁGUA DE LAVAGEM.
- ⑩ - ROTÂMETRO.
- ⑪ - RESERVATÓRIO DE ÁGUA DE LAVAGEM.
- ⑫ - RESERVATÓRIO DE ÁGUA DECANTADA.

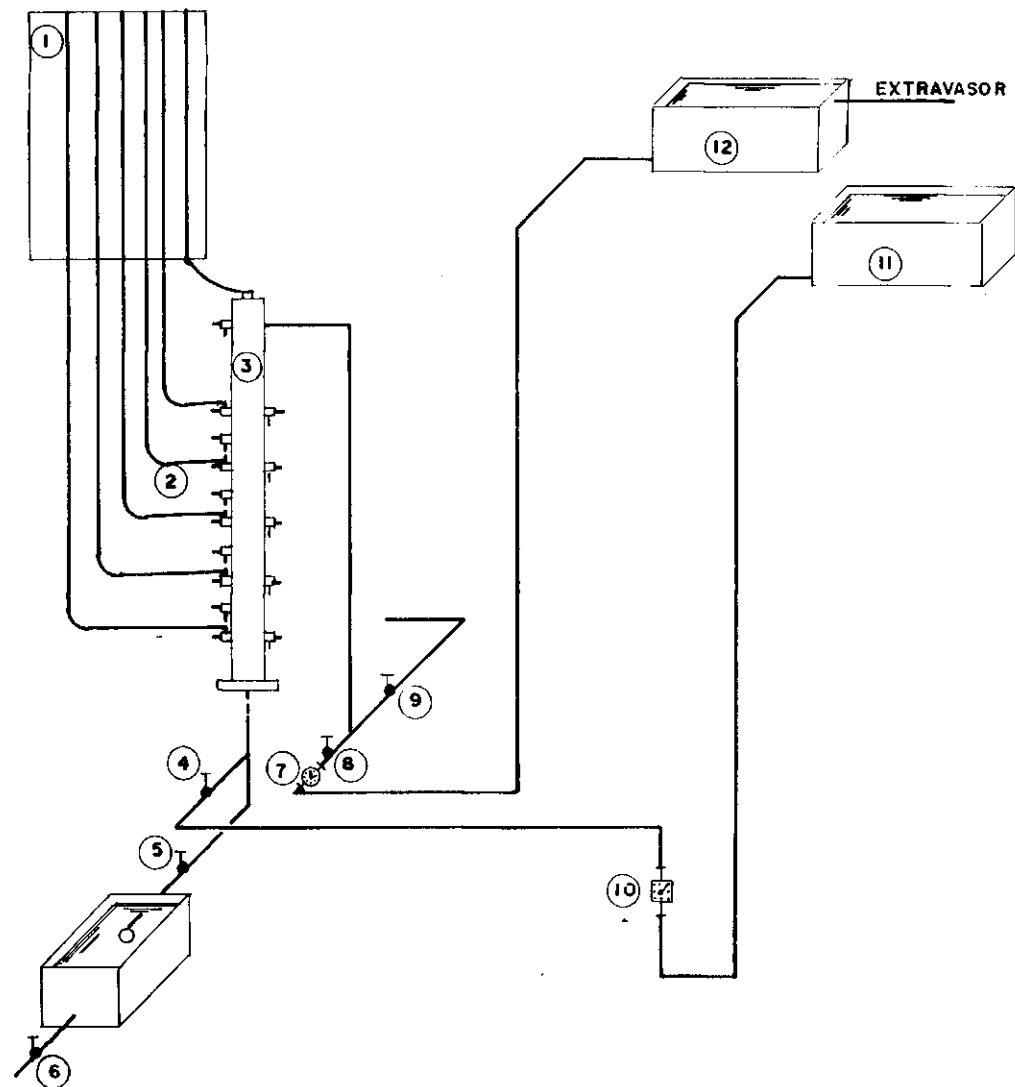


FIG. 3-3. DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM FILTRO PILOTO.

uma das extremidades de um pequeno tubo metálico com um fino corte longitudinal em cada válvula, de modo que a retirada de amostras não arrastasse junto com a água material já depositado ou mesmo grãos de areia. A outra extremidade foi fechada através de rebite.

Em cada filtro foram colocadas oito válvulas, em profundidades distanciadas entre si em 10cm (a primeira válvula foi colocada a 10cm da superfície do leito filtrante), com os pequenos tubos metálicos penetrando na areia aproximadamente 5cm. Assim pode-se fazer coleta de amostras em profundidades diversas, até no máximo 80cm.

### 3.1.3 Sistema de entrada

Instalou-se uma bomba sobre o canal que recebe a água proveniente dos três decantadores da estação de tratamento. Essa bomba aduzia a água até uma caixa de cimento amianto de 250 litros, com um extravasor para manter o nível da água constante dentro da caixa, já que a vazão da bomba é superior à soma das vazões dos três filtros pilotos.

Pelo fundo da caixa a água decantada saía para os três filtros. Na tubulação de entrada de cada filtro, com diâmetro de 3/4", instalou-se um registro, para controle da vazão afluyente, e um hidrômetro para medição do volume filtrado.

### 3.1.4 Sistema de saída

A água filtrada era coletada do fundo do filtro através de uma tubulação de 3/4" de diâmetro e conduzida até uma caixa de cimento amianto com capacidade para 50 litros. Na interligação da caixa de cimento amianto com a tubulação de água filtrada, instalou-se uma válvula de bóia, para manutenção do nível da água constante dentro da caixa.

Por uma das laterais e próximo ao fundo da caixa, a água filtrada saía através de um tubo de 3/4" de diâmetro, onde instalou-se um registro para controle da vazão efluente.

A diferença entre o nível da bôia e o nível da saída determinava a vazão e conseqüentemente a taxa de filtração.

### 3.1.5 Sistema de lavagem

A lavagem era feita em contrafluxo, com a água tratada pela estação de tratamento do Gavião. Uma outra caixa de cimento amianto com capacidade para 250 litros era utilizada como reservatório de lavagem. Na tubulação de água de lavagem, instalou-se um rotâmetro para controle da velocidade ascensional no interior dos filtros, durante as lavagens.

A água, após a passagem pelos filtros, era conduzida através de tubulação de diâmetro de 1" para um dos canais de drenagem da estação de tratamento.

### 3.1.6 Piezômetros

Para medição de perda de água no interior da camada filtrante, construí-se piezômetros com o mesmo tipo de válvula utilizadas para coleta de amostras, conectadas a manguueiras transparentes que foram fixadas sobre papel milimetrado. O papel era colado na parede junto à qual montou-se a bancada com os filtros pilotos. Um dos piezômetros foi instalado sobre a camada filtrante, para servir de referência, e os outros a 20, 40, 60 e 80cm abaixo da superfície do leito.

## 3.2 Operação dos filtros pilotos

### 3.2.1 Testes de filtração

Após a bomba de captação da água decantada ser colocada em funcionamento, anotava-se as leituras dos hidrômetros e a hora do início do teste em quadro padronizado. Fazia-se o ajuste da taxa de filtração desejada, através de proveta e cronômetro, nos registros de saída das pequenas caixas de cimento amianto que recebiam a água filtrada, e

logo após igualava-se a vazão de entrada em cada filtro, através dos registros de água afluyente, a vazão já ajustada nos registros de saída para manter constante a altura da coluna d'água sobre o leito filtrante. Em intervalos regulares eram feitas as coletas de amostras e as medições de perda de carga nas diversas profundidades. Os resultados eram anotados no quadro. Os filtros podiam ser operados até atingir uma perda de carga máxima de 2,50m, sem risco de surgimento de pressões negativas no interior da camada filtrante. Ao término do teste, anotava-se novamente as leituras dos hidrômetros e a hora de interrupção da corrida. Através, então, do volume de água filtrada e do tempo de duração da corrida calculava-se com precisão a taxa de filtração aplicada aos filtros.

### 3.2.2 Lavagem dos filtros

Ao término dos testes de filtração, realizava-se a lavagem dos filtros. Inicialmente enchia-se o reservatório de lavagem com a água tratada pela estação de tratamento do Gavião, através de uma tubulação interligada à rede de distribuição da água de consumo da estação. A seguir, após o fechamento dos registros de água afluyente e de saída de água filtrada, abria-se lentamente o registro da tubulação de água de lavagem, até que o rotâmetro marcasse a vazão necessária para que a velocidade ascensional no filtro atingisse o valor predeterminado. Fazia-se as lavagens sempre com a velocidade de 90cm/minuto, já que a porosidade do leito está relacionada com a velocidade de lavagem e procurou-se manter as condições das camadas filtrantes invariáveis para possibilitar uma análise correta dos testes de filtração. Para a velocidade de lavagem adotada, a vazão medida pelo rotâmetro era de 14 litros/minuto. O tempo de duração das lavagens foi fixado em 10 minutos, tempo necessário para que a turbidez da água que saía do filtro praticamente se igualasse à turbidez da

água que entrava. Decorrido esse tempo, fechava-se os registros de entrada e de saída de água de lavagem.

### 3.3 Material filtrante

Utilizou-se areia do rio Banabuiú nos experimentos realizados. A preparação foi feita com peneiras da série Americana, sendo cada leito constituído de areia com a granulometria especificada abaixo:

Filtro nº 1: areia com granulometria entre 0,50mm e 0,59mm (peneiras com número de série 35 e 30);

Filtro nº 2: areia com granulometria entre 0,59mm e 0,71mm (peneiras com número de série 30 e 25);

Filtro nº 3: areia com granulometria entre 0,71mm e 0,84mm (peneira com número de série 25 a 20).

O tamanho efetivo da areia usualmente especificada para filtros rápidos está dentro da faixa de granulometria estudada.

#### 3.3.1 Peso específico da areia

O peso específico do material filtrante utilizado foi determinado através do procedimento discriminado a seguir:

- a) Secou-se uma amostra do meio filtrante durante 24 horas a 105°C;
- b) Pesou-se, da amostra dessecada, 150 gramas e colocou-se a amostra pesada em um becker de 200ml;
- c) Adicionou-se 100ml de água destilada ao becker e ferveu-se durante 5 minutos para retirada do ar;
- d) Pesou-se uma proveta dessecada de 250ml;
- e) Transportou-se a amostra, após a fervura e quando já estava fria, para a proveta de 250ml;

f) Completou-se com água destilada, até que o volume da amostra de areia e da água somasse 250ml;

g) Pesou-se, então, a proveta contendo a água e a amostra.

O cálculo para determinação do peso específico procedeu-se como segue:

Peso total = peso da proveta contendo a água e a amostra de areia.

Volume da água = peso da água = peso total - peso da proveta - 150grs.

Volume da areia = 250ml - volume da água.

Peso específico =  $\frac{150}{\text{volume da areia}}$

O peso específico médio de 6 amostras do material filtrante foi de 2,63kg/litro.

### 3.3.2 Porosidade

A porosidade deveria determinar-se de modo a expressar exatamente a porosidade da camada filtrante durante os testes de filtração. Infelizmente, no entanto, a porosidade no filtro não é constante, já que varia com a velocidade de lavagem e de sedimentação dos grãos de areia quando se interrompe o fluxo d'água.

O procedimento adotado para determinação da porosidade das camadas filtrantes utilizadas na pesquisa, apesar de não ter uma precisão absoluta, é normalmente, em alguns casos com pequenas variações, usado para determinação da porosidade de areia.

A porosidade foi determinada como segue:

- a) Com as amostras usadas para determinação do peso específico, anotava-se o volume da areia sedimentada na proveta graduada de 250ml;
- b) O volume dos grãos de areia foi calculado pelo procedimento anterior.

Tem-se assim:

$$\text{Porosidade} = \frac{\text{volume dos grãos}}{\text{volume da areia sedimentada, medido na proveta}}$$

A porosidade determinada, pela média de duas amostras para cada filtro, foi a seguinte:

- camada filtrante do filtro nº 1: 0,42
- camada filtrante do filtro nº 2: 0,45
- camada filtrante do filtro nº 3: 0,46

A porosidade adotada para determinação de perda de carga inicial por unidade de comprimento ( $I_0$ ), contudo, foi calculada a partir de dados experimentais. Com os dados de testes de filtração, em cujos inícios de corrida a água tinha a mesma temperatura, relacionou-se, em pares ordenados, velocidades de filtração e perda de carga iniciais, e através da técnica dos mínimos quadrados, determinou-se um segmento de reta que melhor se ajustasse aos pontos formados pelos pares ordenados em um gráfico cartesiano. As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 ilustram o procedimento.

Fez-se, então, a seguinte transformação na equação de Carman-Kozeney:

$$I_0 = 180 \frac{v}{g} \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v}{d_0^2}$$

$$I_0 = k'v, \text{ onde } k' = 180 \frac{v}{g} \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3 \times d_0^2}$$

Os valores de  $v$  e  $g$  são conhecidos. Para determinação do diâmetro uniforme equivalente para cada leito filtrante, adotou-se os fatores de forma estabelecidos por Corstjens (8) para areia no rio Mosa, conforme mostra o quadro 3.1:

Peneira inferior ( $d_i$ )	0,50 0,56 0,63 0,71 0,80
Peneira superior ( $d_j$ )	0,56 0,63 0,71 0,80 0,90
$\sqrt{d_i d_j}$	0,53 0,59 0,67 0,75 0,85
$\phi$	0,92 0,92 0,91 0,90 0,89

Quadro 3.1 - Valores dos fatores de forma para a areia do rio Mosa.

- filtro nº 1:  $d_o = \phi_1 \times \sqrt{0,50 \times 0,59} = 0,92 \times 0,54 = 0,50\text{mm}$
- filtro nº 2:  $d_o = \phi_2 \times \sqrt{0,59 \times 0,71} = 0,91 \times 0,65 = 0,59\text{mm}$
- filtro nº 3:  $d_o = \phi_3 \times \sqrt{0,71 \times 0,84} = 0,89 \times 0,77 = 0,69\text{mm}$

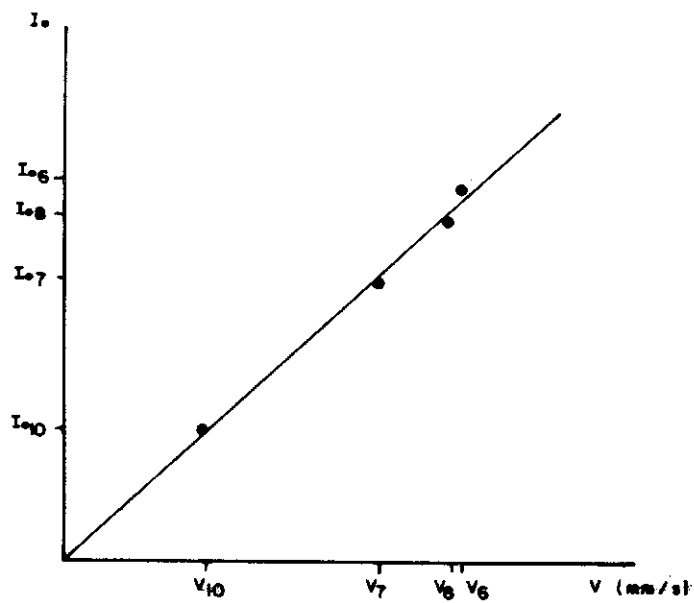
A porosidade de cada camada filtrante foi determinada igualando-se os valores das constantes de cada equação das retas de ajuste dos pontos experimentais ao  $k'$  da equação de Kozeney modificada:

- filtro nº 1:  $k' = a_1, = 0,46;$
- filtro nº 2:  $k' = a_2, = 0,46;$
- filtro nº 2:  $k' = a_3, = 0,46.$

### 3.4 Adaptação das equações da teoria de Lerk

Para transformação da equação de Lerk que estabelece a remoção de sólidos em suspensão, em função da profundidade e do tempo de filtração, para uma equação de remoção de turbidez, criou-se uma constante  $k$ , que relacionasse a concentração de sólidos em suspensão com a turbidez da água. O número, concentração e massa das partículas em suspensão, assim como sua forma, tamanho e índice de refração influenciam na medição da turbidez e há uma relação diretamente proporcional entre turbidez e concentração de sólidos em suspensão, embora essa proporcionalidade não seja necessariamente





TESTES DE FILTRAÇÃO: 06, 07, 08 e 10

DIÂMETRO DA AREIA: 0,50 mm.

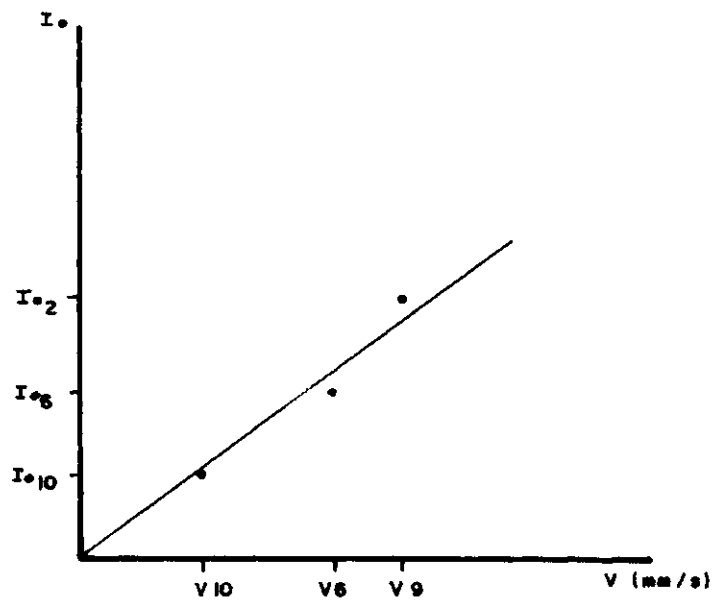
EQUAÇÃO DA RETA:  $Y = a_1 \cdot X$

$$a_1 = 181,21$$

$$K' = a_1 = 181,21$$

$$P_0 = 0,46$$

FIG.3.4 - RETA DE AJUSTE DOS PONTOS FORMADOS PELOS OS PARES ORDENADOS, PARA A AREIA COM DIÂMETRO DE 0,50 mm.



TESTES DE FILTRAÇÃO: 0,6, 0,9 e 1,0.

DIÂMETRO DA AREIA: 0,59 mm.

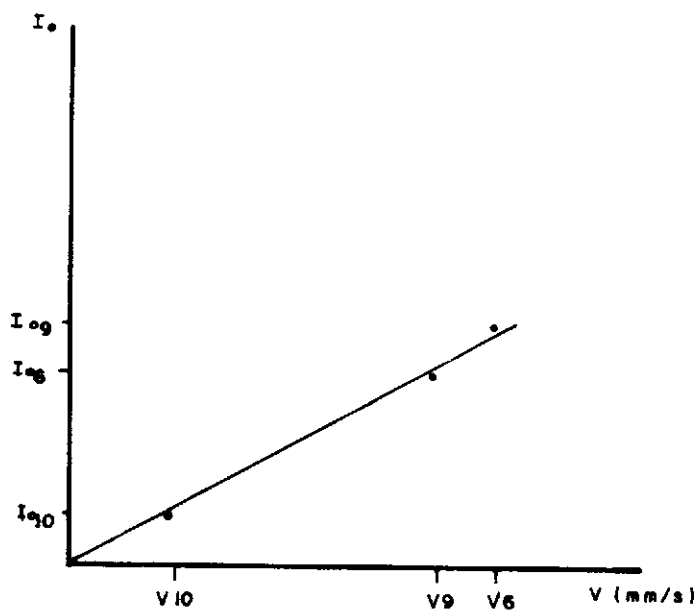
EQUAÇÃO DA RETA:  $Y = a_2 \cdot X$

$$a_2 = 136,84$$

$$K' = a_2 = 136,84$$

$$P_0 = 0,46$$

FIG.3.5- RETA DE AJUSTE DOS PONTOS FORMADOS PELOS OS PARES ORDENADOS, PARA A AREIA COM DIÂMETRO DE 0,59 mm.



TESTES DE FILTRAÇÃO: 06, 09 e 10.

DIÂMETRO DA AREIA: 0,69 mm.

EQUAÇÃO DA RETA:  $Y = a_3 \cdot X$

$$a_3 = 98,50$$

$$K' = a_3 = 98,50$$

$$P_0 = 0,46$$

FIG.3.6— RETA DE AJUSTE DOS PONTOS FORMADOS PELOS OS PARES ORDENADOS, PARA A AREIA COM DIÂMETRO DE 0,69 mm.

linear. Pode-se, porém, considerar a constante  $k$  como um valor médio que expresse a proporcionalidade existente entre turbidez e sólidos em suspensão, para a água estudada.

Da equação de Lerk:

$$C = \frac{C_0 e^{\alpha t}}{e^{\alpha t} + e^{\lambda_0 y - 1}} \quad \text{onde } \alpha = \frac{v \cdot C_0 \lambda_0}{n \cdot \rho d \cdot \rho_0}, \text{ fez-se:}$$

$$T_0 = \frac{C_0}{k \cdot \rho d}, \quad T = \frac{C}{k \cdot \rho d} \quad e$$

$$\alpha_1 = \frac{v \cdot T_0 \cdot k \cdot \lambda_0}{n \cdot \rho_0}$$

Em que:

$T_0$  - turbidez inicial

$T$  - turbidez remanescente

Tem-se, então, a equação de Lerk modificada:

$$T = T_0 \frac{e^{\alpha_1 t}}{e^{\alpha_1 \cdot t} + e^{\lambda_0 y - 1}}$$

A constante  $k$ , além de permitir a transformação de equação de Lerk, torna dispensável o conhecimento da massa específica dos depósitos retidos pelos filtros. A turbidez das amostras foi medida por turbímetro Hach, modelo 2100A.

Analogamente, fez-se a transformação da equação da perda de carga:

$$H = \frac{I_0}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_0 y}{(1-n)^2} - \frac{n^2 \cdot (e^{\lambda_0 y - 1}) \cdot (e^{\alpha_1 \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot (e^{\lambda_0 y} + (1-n) \cdot (e^{\alpha_1 t} - 1)) \cdot ((1-n) \cdot e^{\alpha_1 t} + n)} \right) - \frac{n \cdot (2-n)}{(1-n)^2} \cdot \ln \frac{e^{\lambda_0 y} + (1-n) \cdot (e^{\alpha_1 t} + n)}{(1-n) \cdot e^{\alpha_1 t} + n}$$

## CAPÍTULO IV

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 4.1 Análise dos dados experimentais

A partir dos dados coletados nos testes de filtração, procurou-se determinar o valor da constante  $k$  e os fatores que influenciam  $n$  e  $\lambda_0$ , de modo a que as equações de remoção da turbidez e da perda de carga expressassem satisfatoriamente o processo de filtração observados nos testes. Preparou-se programas para microcomputadores, cujos fluxogramas são apresentados no anexo II, que permitissem, através de uma variação racional dos valores de  $k$ ,  $n$  e  $\lambda_0$ , atingir o objetivo procurado.

De início, procurou-se determinar o valor da constante  $k$ , sem uma preocupação em estabelecer como ocorreria a variação de  $n$  e  $\lambda_0$  com as condições de filtração.

Basicamente, o programa utilizado nesse primeiro passo pode ser descrito como segue:

- a) Entrada dos dados (diâmetro da areia, taxa de filtração, turbidez inicial, perda de carga inicial, turbidez remanescente a profundidade  $y_1$ , perda de carga a profundidade  $y_2$ , etc);
- b) Valor inicial para  $\lambda_0$  ( $\lambda_0 = \frac{\ln(T_0/T)}{y_1}$ );
- c) Valor inicial para  $n$  ( $n = 1,0$ );
- d) Valor inicial para  $k$  ( $k = 10^{-4}$ );
- e) Cálculo de turbidez remanescente pela equação teórica;
- f) Comparação com a turbidez remanescente experimental (se a diferença for inferior a 10%, seguir para g, se for

- igual ou superior, seguir para i);
- g) Cálculo de perda de carga teórica;
- h) Comparação com a perda de carga experimental (se a diferença for inferior a 10% imprimir o valor de k, se não seguir para i);
- i) Adicionar  $5 \times 10^{-5}$  ao valor de k;
- j) Se k for superior a  $2 \times 10^{-3}$  seguir para l, se não seguir para e;
- l) Subtrair 0,01 de n;
- m) Se n for inferior a 0,40 seguir para n, se não seguir para d;
- n) Adicionar 0,10 a  $\lambda_0$ ;
- o) Se  $\lambda_0$  for superior a 1000, sair da programação, se não seguir para c.

Esse programa, ilustrado pelo fluxograma I, fazia com que todos os arranjos possíveis com os valores de k, n e  $\lambda_0$ , dentro dos limites preestabelecidos, fossem testados até que as equações teóricas apresentassem resultados muito próximos aos valores experimentais. Valores de k, n e  $\lambda_0$  fora dos limites fixados tendiam a apresentar resultados absurdos. Os valores de k calculados por esse programa convergiam, em sua maioria, para um único valor, que foi o valor de k adotado por essa pesquisa.

O passo seguinte foi procurar determinar o valor de n, através de um programa semelhante mas um pouco mais simples porque considerou-se para a constante k o valor calculado pelo programa anterior. O fluxograma II ilustra o programa utilizado para determinação do valor de n.

Os valores de n calculados pelo computador variavam com o diâmetro de areia, mas muito pouco com a velocidade de filtração. Para cada diâmetro de areia, adotou-se os valores médios de n e, a partir desses valores, estabeleceu-se uma equação linear relacionando o valor de n com o diâmetro da camada filtrante.

O último passo foi procurar estabelecer do valor de  $\lambda_0$ . Como primeira referência, testou-se o valor adotado pela teoria de Lerk:

$$\lambda_0 = \frac{\beta}{v \cdot v \cdot d_0^3}$$

$v$  = viscosidade cinamática,

$v$  = velocidade de filtração,

$d_0$  = diâmetro dos grãos.

Observou-se que a utilização desse valor nas equações teóricas proporcionava resultados próximos aos valores experimentais de turbidez remanescente e da perda de carga, mas com diferenças superiores ao valor considerado como aceitável por essa pesquisa. Fez-se, então, um outro programa, que está ilustrado no fluxograma III, para procurar determinar os valores dos expoentes da velocidade de filtração e do diâmetro de areia.

O programa, simplificado, pode ser descrito como segue:

- a) entrada de dados;
- b) cálculo de  $n$ ;
- c) valor inicial para  $x$  ( $x = 0,50$ );
- d) valor inicial para  $w$  ( $w = 2,50$ );
- e) cálculo de  $\lambda_0$  ( $\lambda_0 = \frac{9 \times 10^{-13}}{v \cdot v^x \cdot d_0^w}$ );
- f) cálculo da turbidez remanescente;
- g) comparação com o valor experimental (se a diferença for inferior a 10% seguir para i, se não seguir para j);
- h) cálculo da perda de carga;
- i) comparação com a perda de carga experimental (se a diferença for inferior a 10%, imprimir os valores de  $x$  e  $w$ , se não seguir para j);
- j) adicionar 0,50 a  $w$ ;
- l) se  $w$  for superior a 3,50 seguir para m, se não seguir

para e;

m) adicional 0,05 a x;

n) se x for superior a 1,5 sair da programação, se não seguir para d.

Os resultados calculados através desse programa permitiram estabelecer a relação existente entre  $\lambda_0$  e as condições de filtração observadas nos testes.

#### 4.2 Resultados da pesquisa

Com a utilização dos procedimentos descritos anteriormente, e procurando-se determinar os valores de k, n e  $\lambda_0$  de modo que a turbidez remanescente teórica coincidissem com a turbidez remanescente experimental quando esta fosse igual a 0,20 NTU, chegou-se aos resultados abaixo:

$$k = 6,5 \times 10^{-4}$$

$$n = 0,65 + 100 \cdot (7,0 \times 10^{-4} - d_0)$$

$$\lambda_0 = \frac{9 \times 10^{-18}}{v \cdot v^{1,1} \cdot d_0^{3,05}}$$

O valor de 0,20 NTU foi escolhido como valor limite porque quando a turbidez remanescente atingia esse valor praticamente não ocorria mais remoção e porque, segundo Geldreich (9), acima de 0,20 NTU a eficiência da desinfecção é afetada.

Os quadros e gráficos do anexo I mostram comparação entre os valores teóricos e dados experimentais. Pode-se observar a grande precisão da equação da perda de carga, cujos valores quase sempre diferem em menos de 10% dos valores experimentais, com exceção de zonas com pequena profundidade. Quanto a equação de remoção de turbidez, apesar de não ter demonstrado precisão em diversos pontos da camada filtrante, apresenta valores muito próximos aos dados experimentais quando a turbidez remanescente atinge o valor



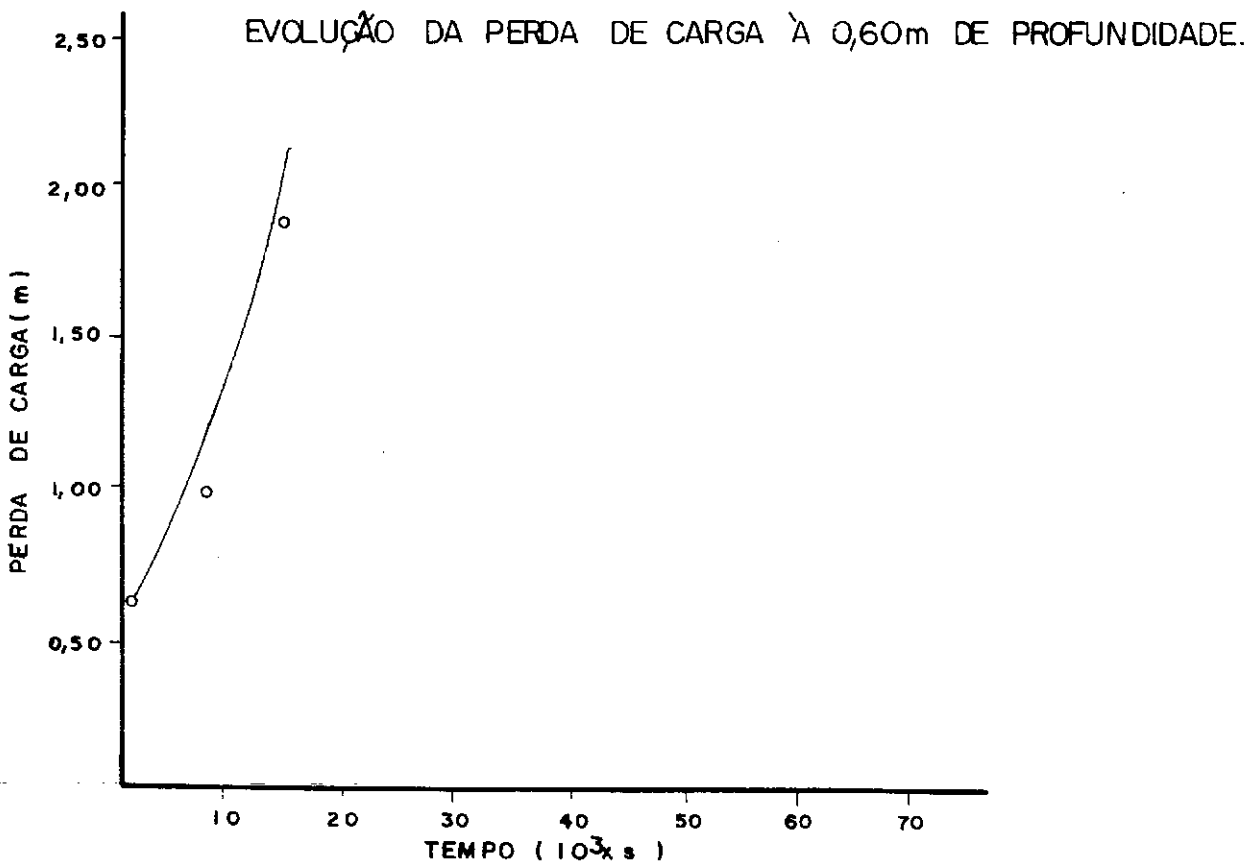
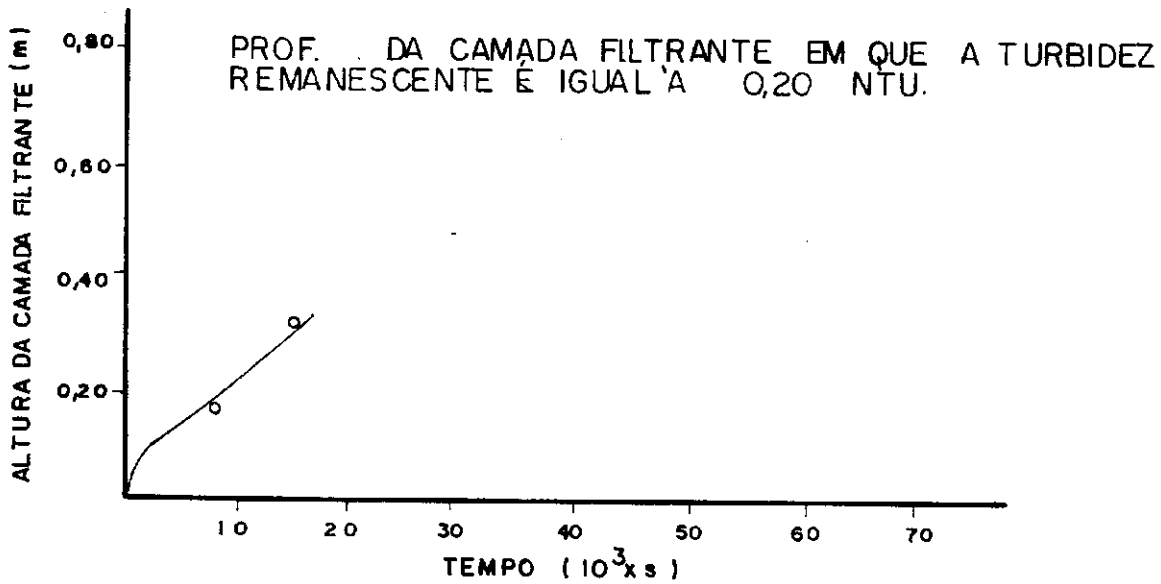
de 0,20 NTU.

Os gráficos apresentados a seguir comparam a profundidade teórica em que a turbidez remanescente atinge o valor de 0,20 NTU com a profundidade experimental em que a turbidez remanescente é igual a esse valor. Procurou-se trabalhar com um único valor de turbidez remanescente, já que a equação de remoção da teoria de Lerk não conseguia determinar com precisão a remoção ocorrida ao longo da coluna de filtração, mas mostrou-se eficaz para determinação da turbidez escolhida como limite de remoção. A profundidade experimental foi determinada graficamente por interpolação, já que o distanciamento entre os dispositivos de coletas de amostras não permitia estabelecer com precisão essa profundidade. Assim, construiu-se uma curva de interpolação entre os pontos experimentais dos gráficos mostrados no anexo II, e determinou-se, para cada teste de filtração e nos tempos em que se fez coletas, a altura de camada necessária para que a turbidez remanescente, marcada sobre a curva de ajuste, fosse igual a 0,20 NTU.

Mostra-se ainda nesses gráficos a comparação entre a evolução de perda de carga teórica com o tempo, à profundidade de 60cm, com o aumento da perda de carga experimental.

# TESTE N°: 06

FILTRO N° 01  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 5,30 mm/s. AREIA: 0,50 mm.

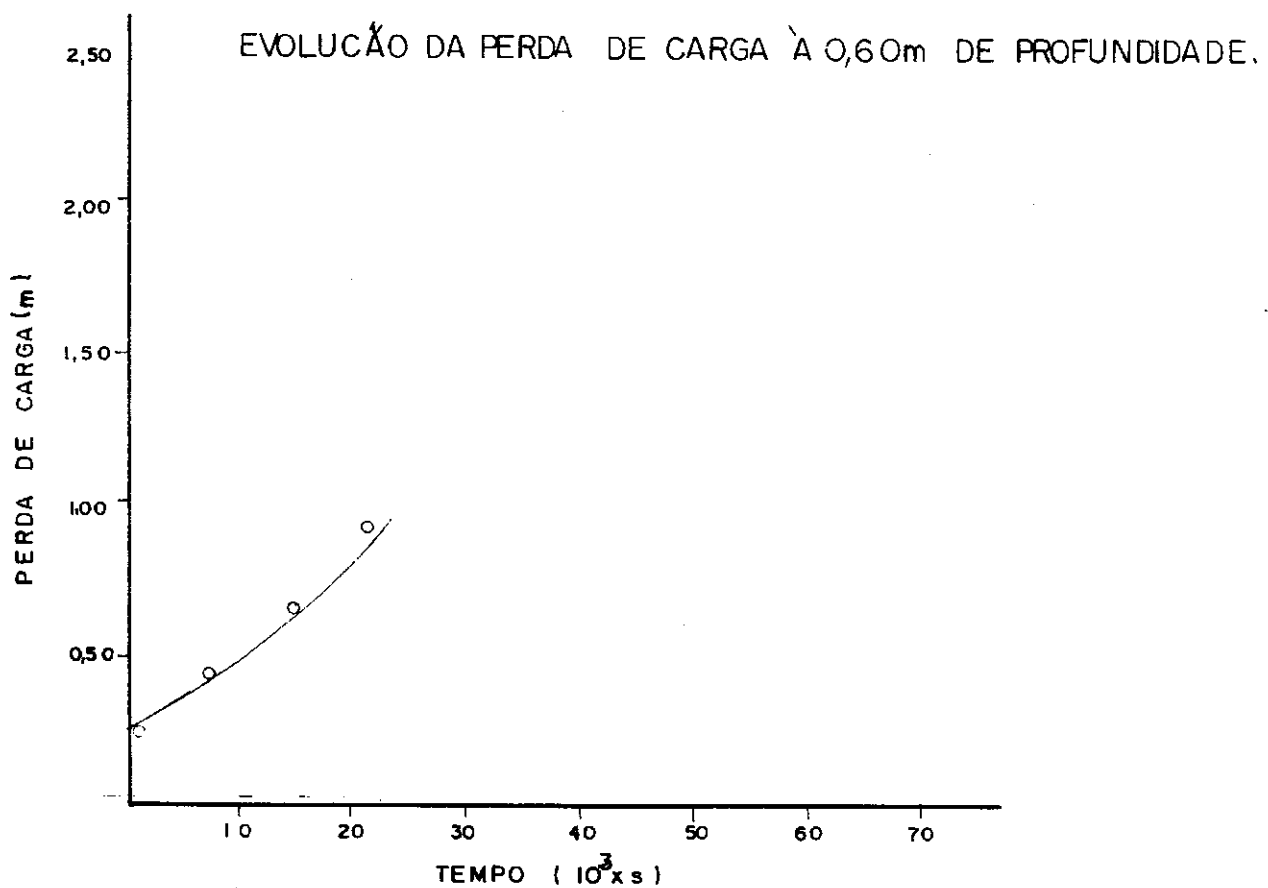
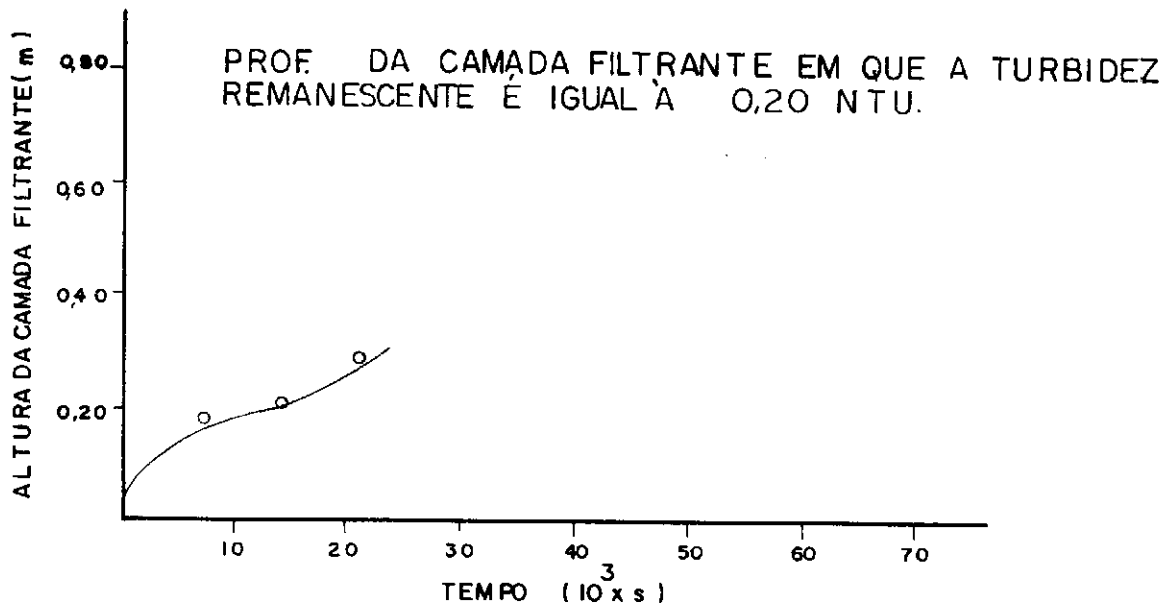


— CURVA TEÓRICA.

○ -- VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 06

FILTRO Nº 02  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 3,45 mm/s.      AREIA: 0,59 mm



— CURVA TEÓRICA  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

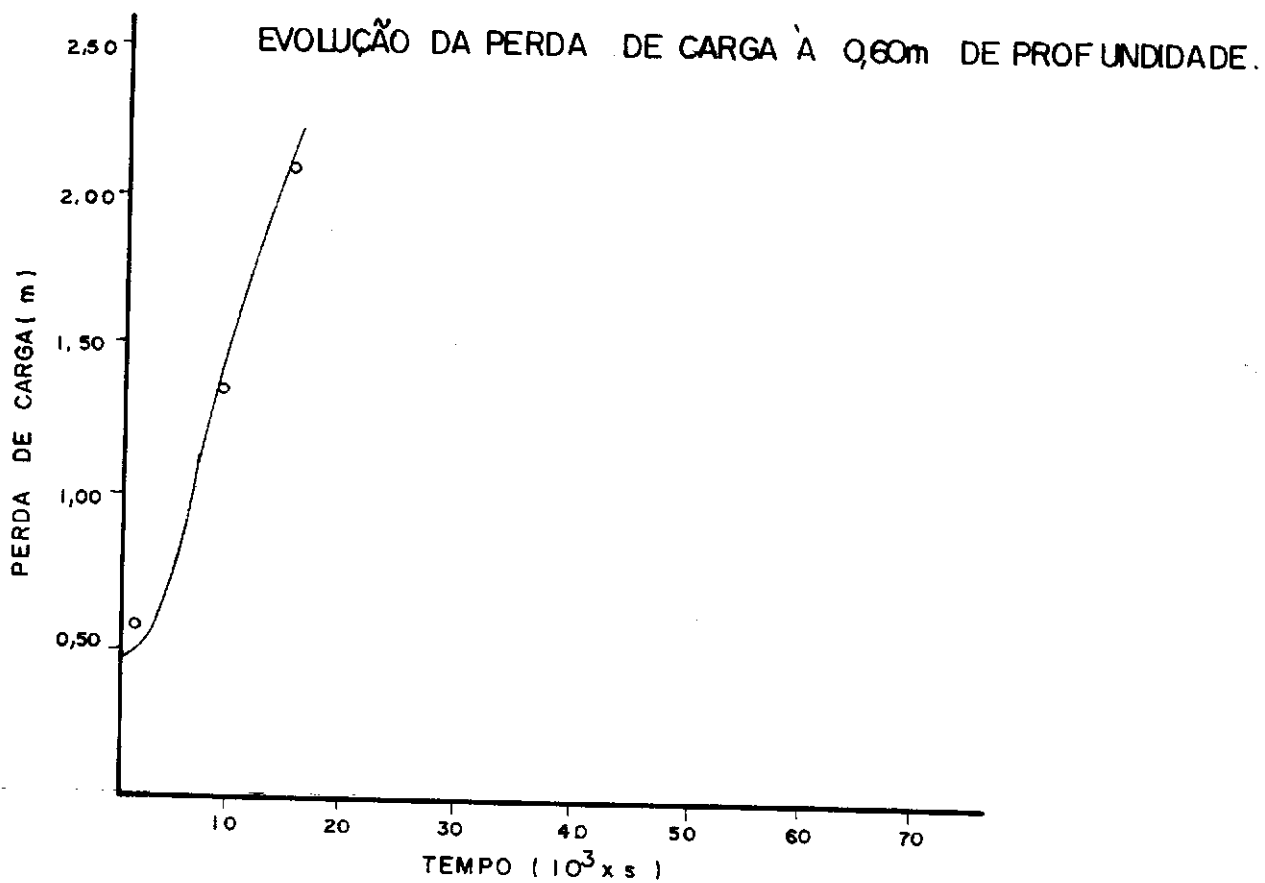
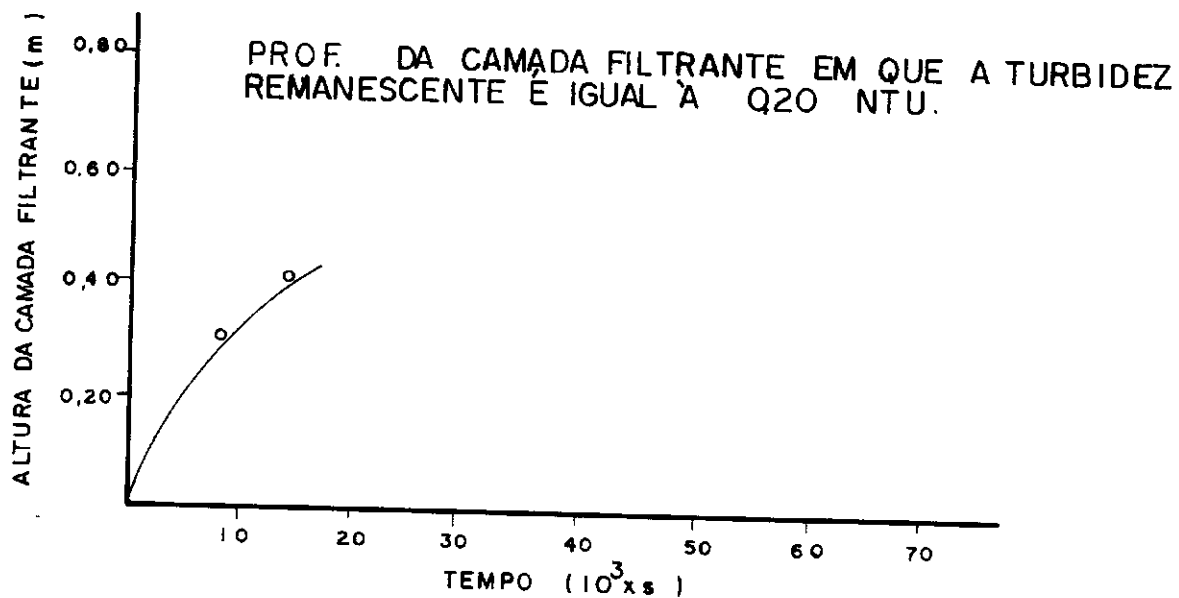


# TESTE Nº: 07

FILTRO Nº 01

AREIA: 0,50mm

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 4,20 mm/s



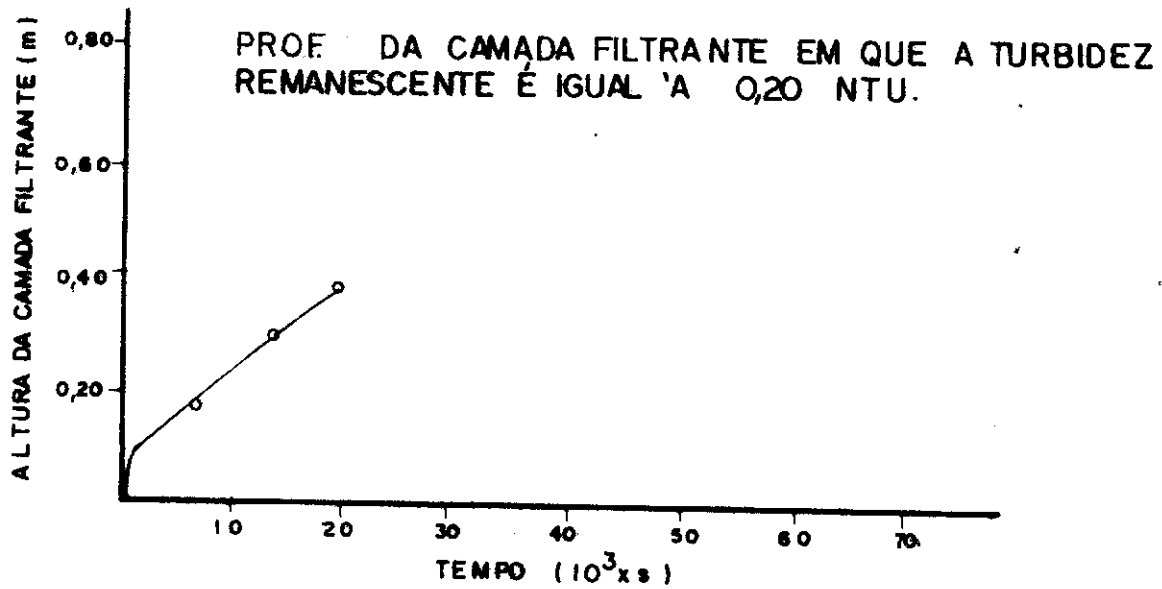
— CURVA TEÓRICA  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL

# TESTE N°: 08

FILTRO N° 01

AREIA: 0,50 mm

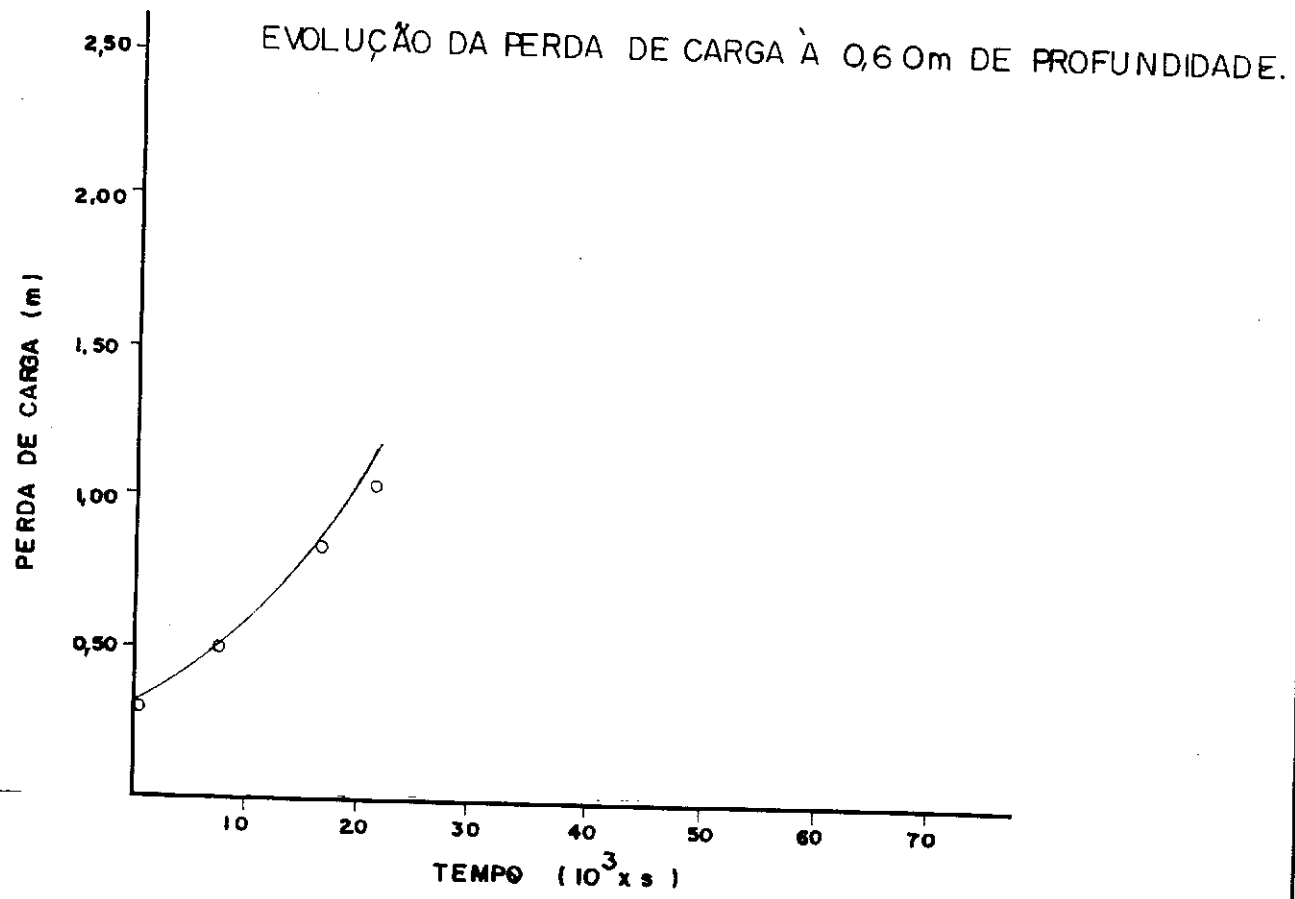
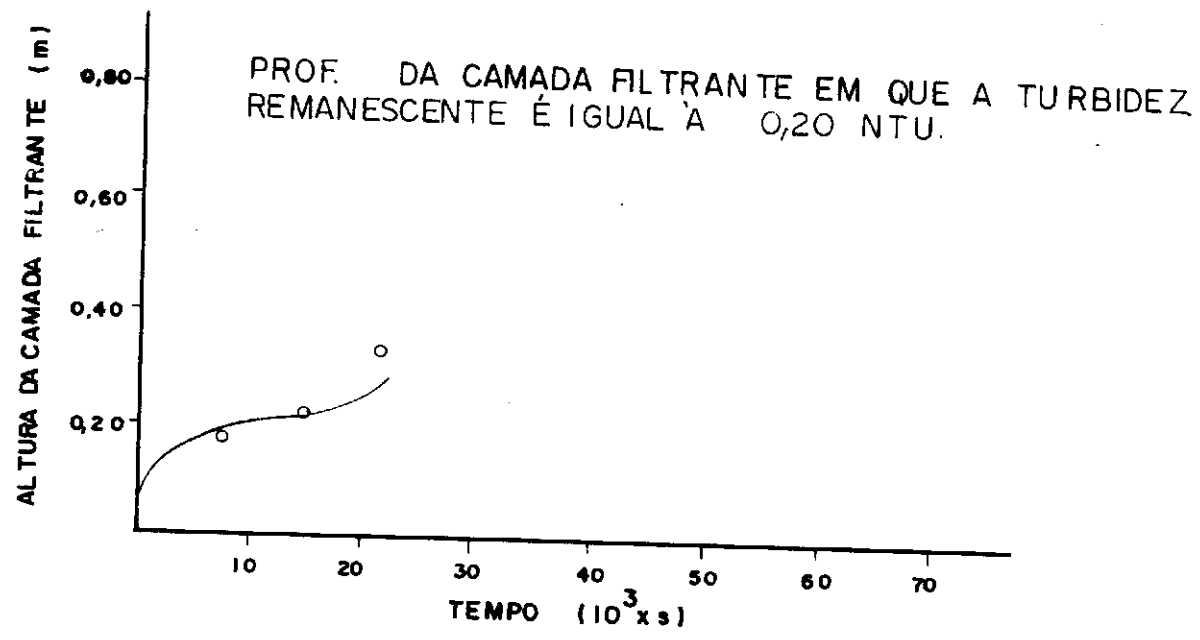
VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 5,15 mm/s



— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 08

FILTRO Nº 02  
VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 4,06 mm/s. AREIA: 0,59mm



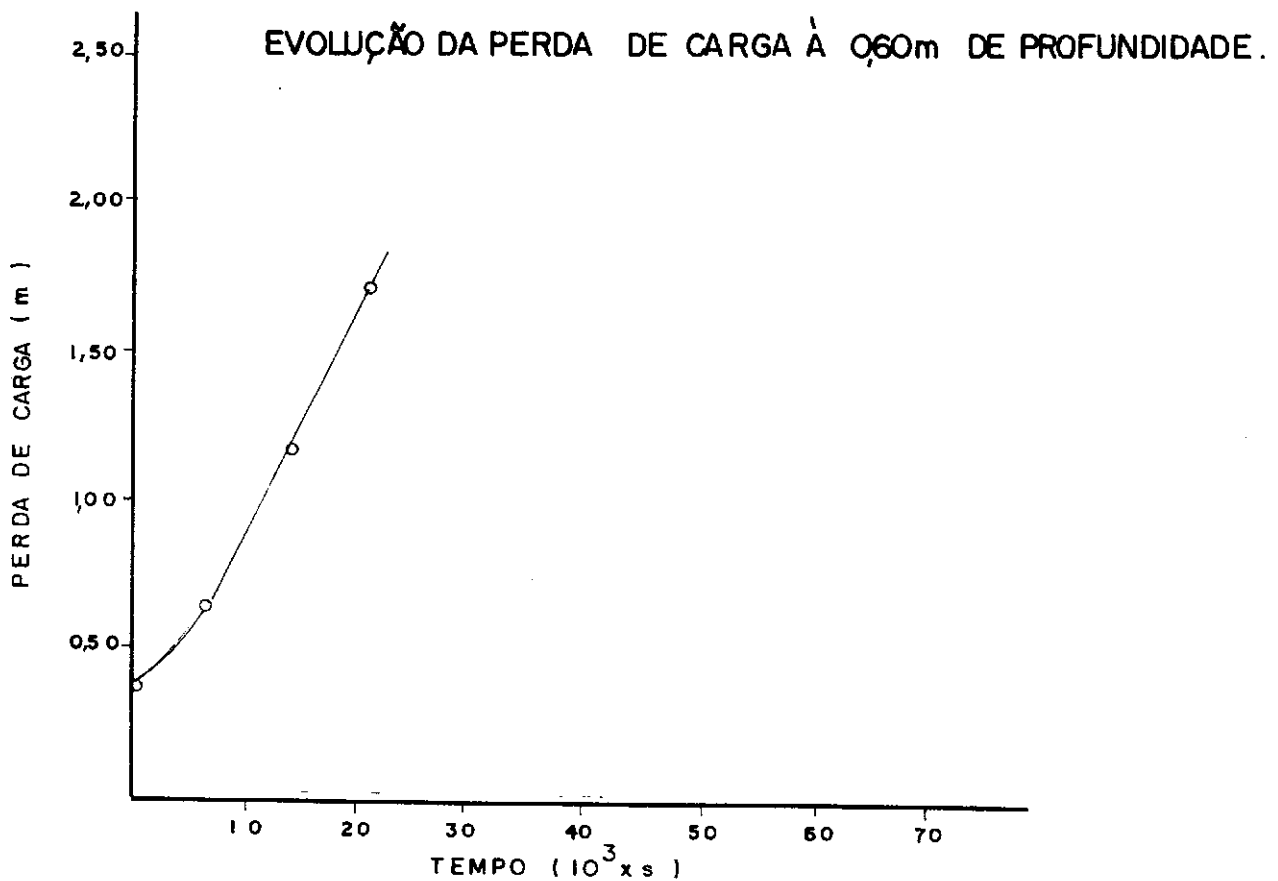
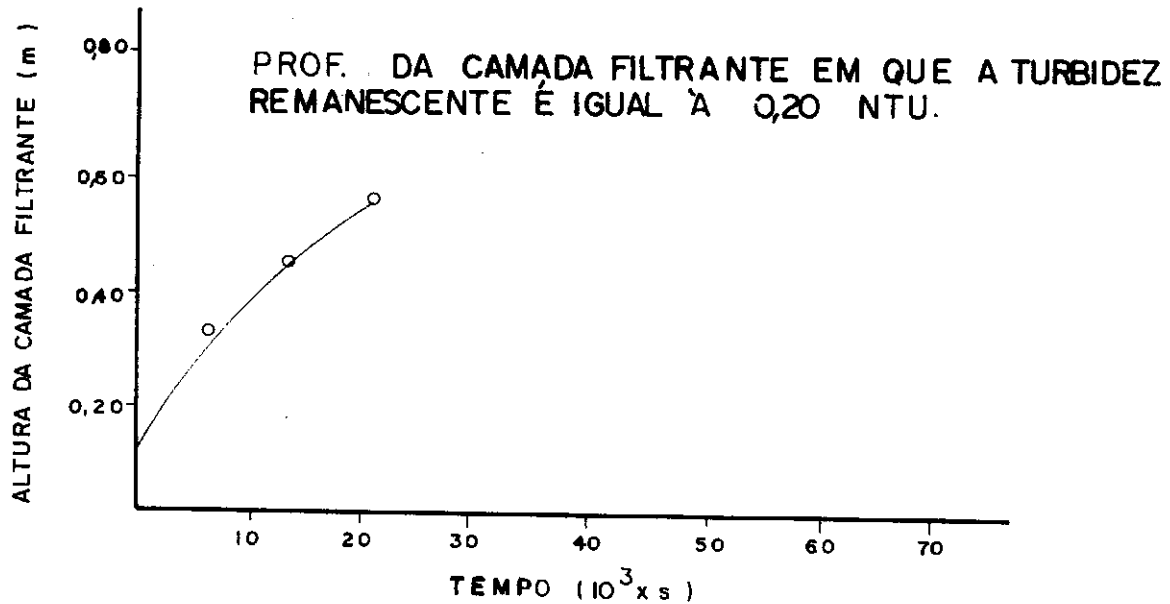
— CURVA TEÓRICA.  
○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº : 08

FILTRO Nº : 03

AREIA: 0,69 mm

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 6,53 mm / s.

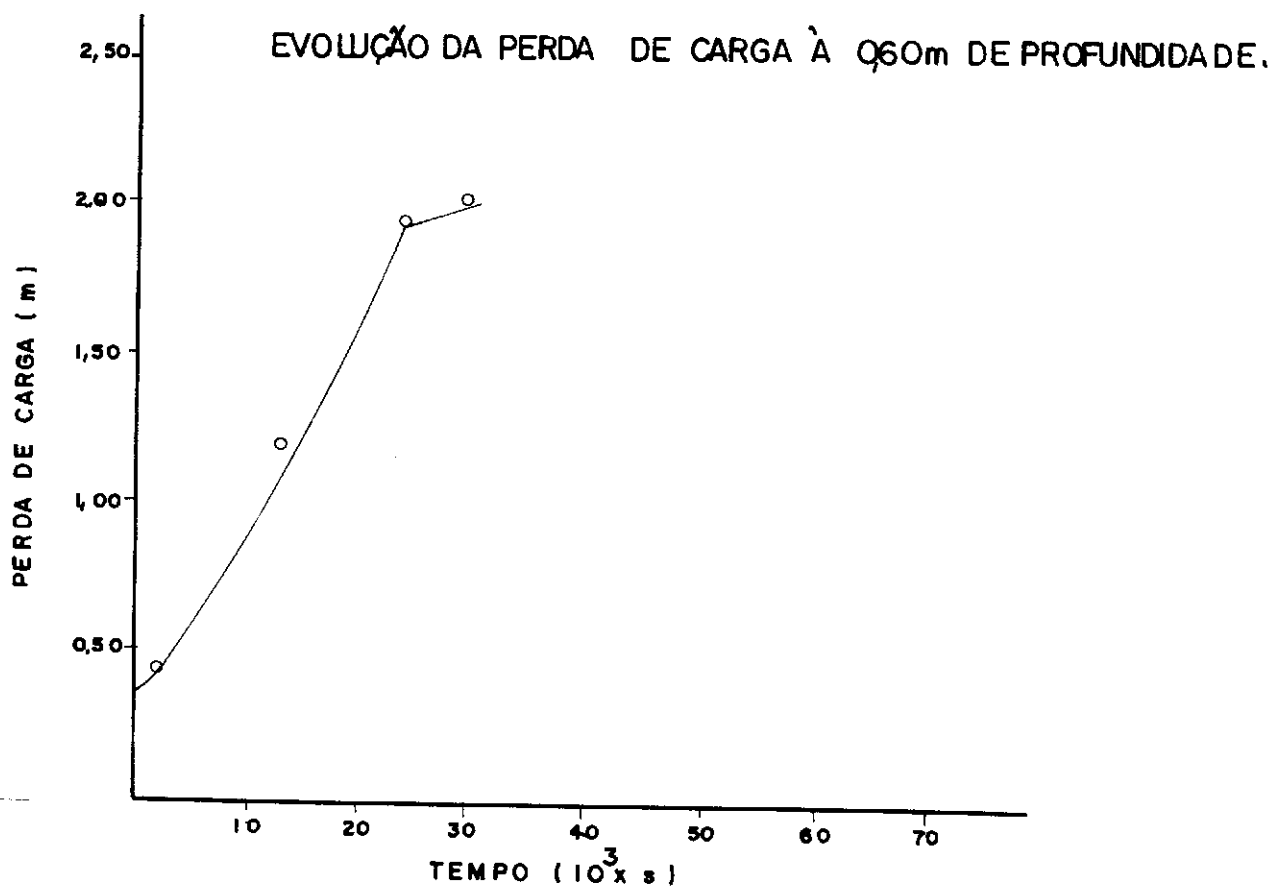
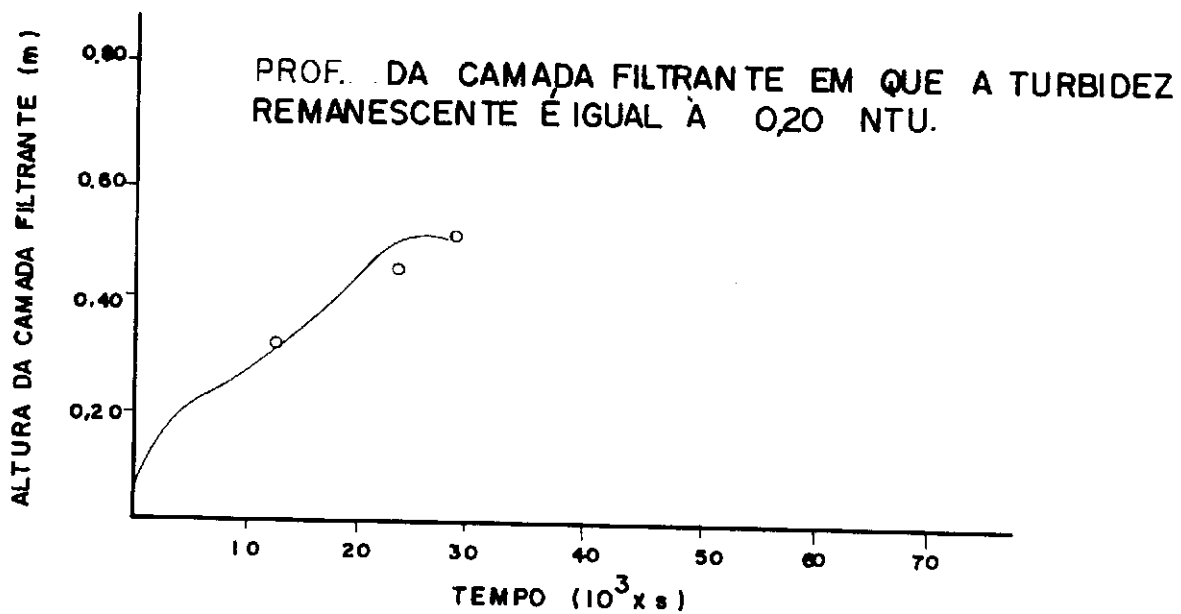


— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.



# TESTE Nº: 09

FILTRO Nº: 02  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 4,35 mm/s.  
 AREIA: 0,59 mm.



— CURVA TEÓRICA  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

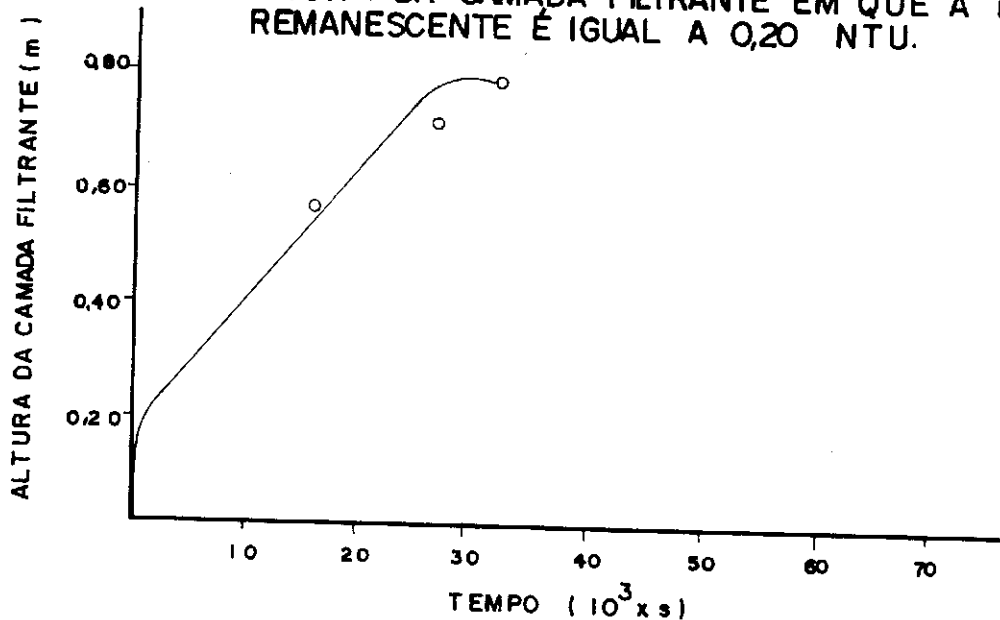
# TESTE Nº: 09

FILTRO Nº: 03

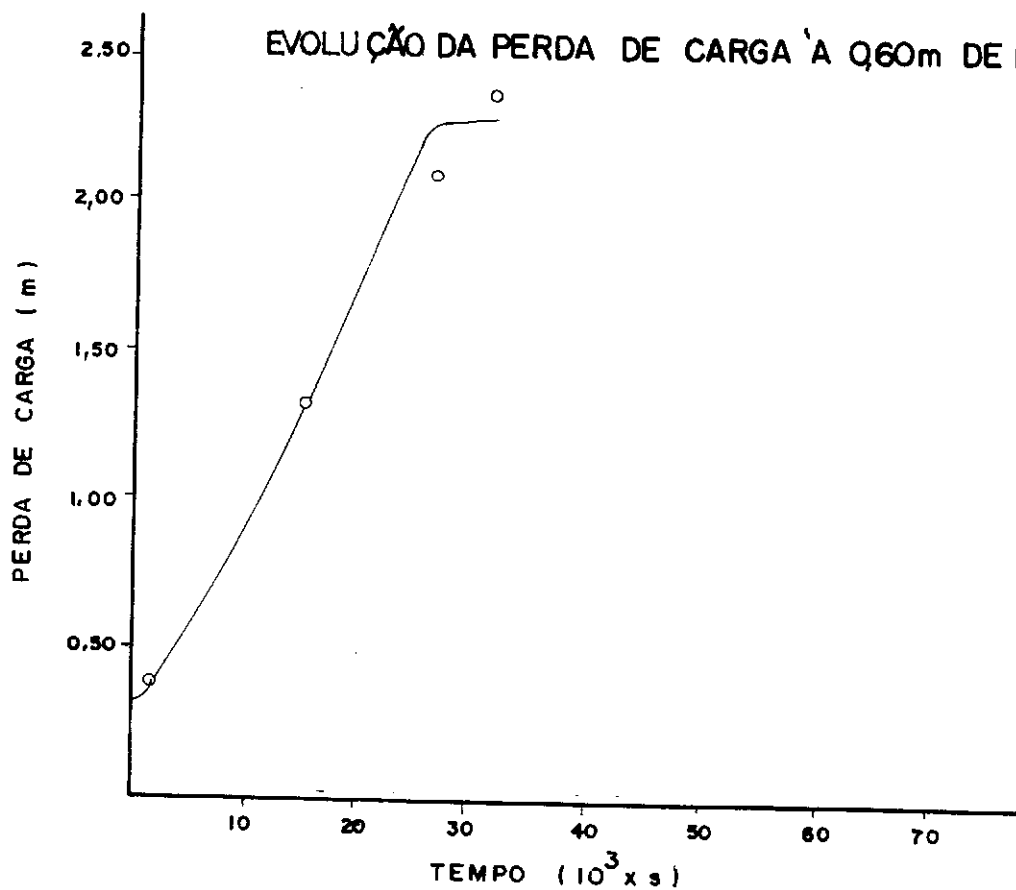
AREIA: 0,69 mm

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 5,70 mm/s

PROF. DA CAMADA FILTRANTE EM QUE A TURBIDEZ REMANESCENTE É IGUAL A 0,20 NTU.



EVOLUÇÃO DA PERDA DE CARGA A 0,60m DE PROFUNDIDADE.



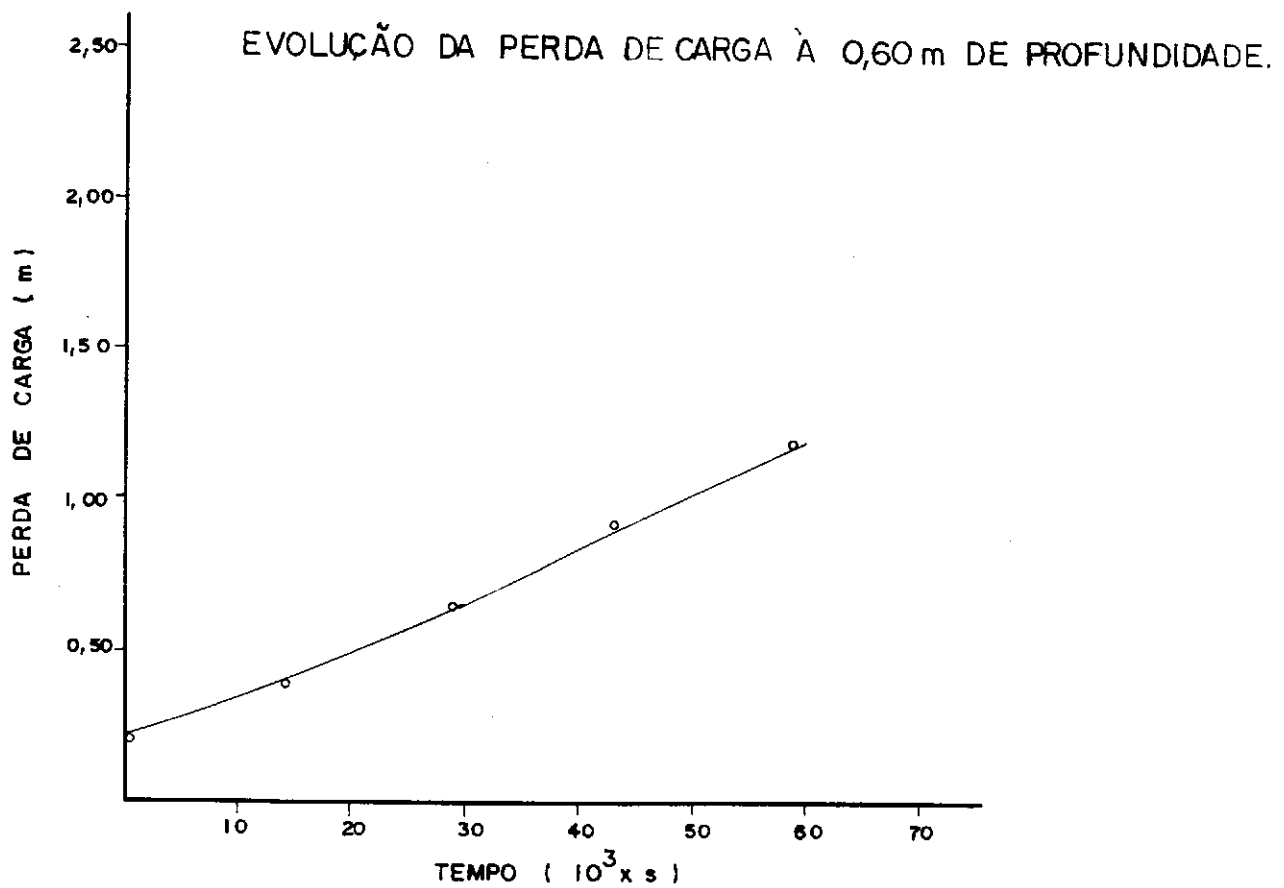
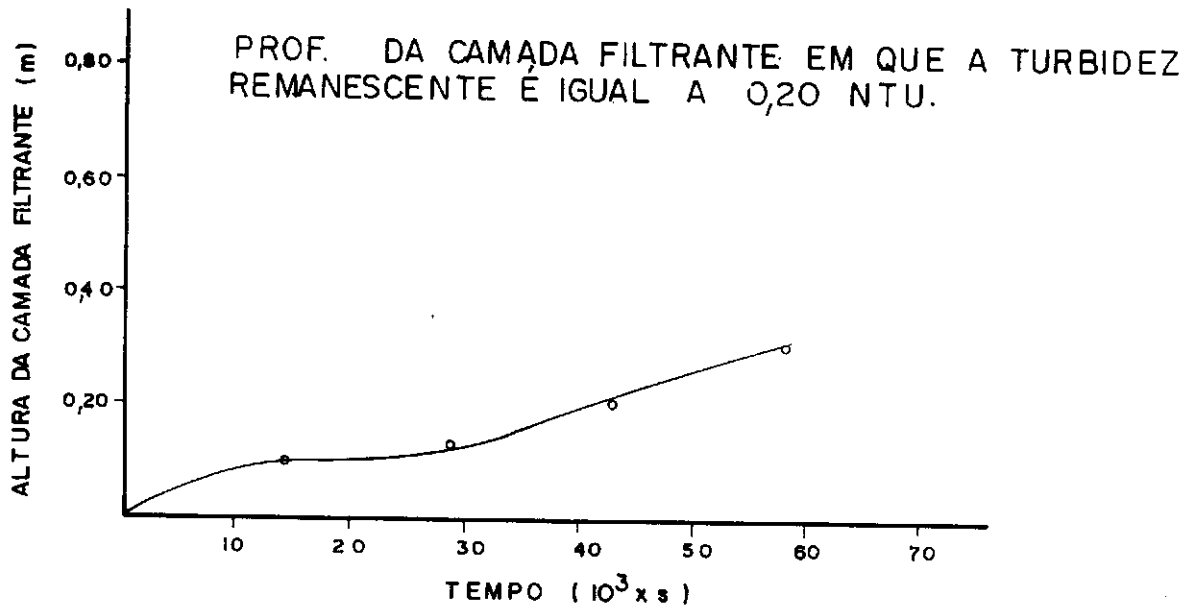
— CURVA TEÓRICA.  
○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 10

FILTRO Nº: 01

AREIA: 0,50 m m

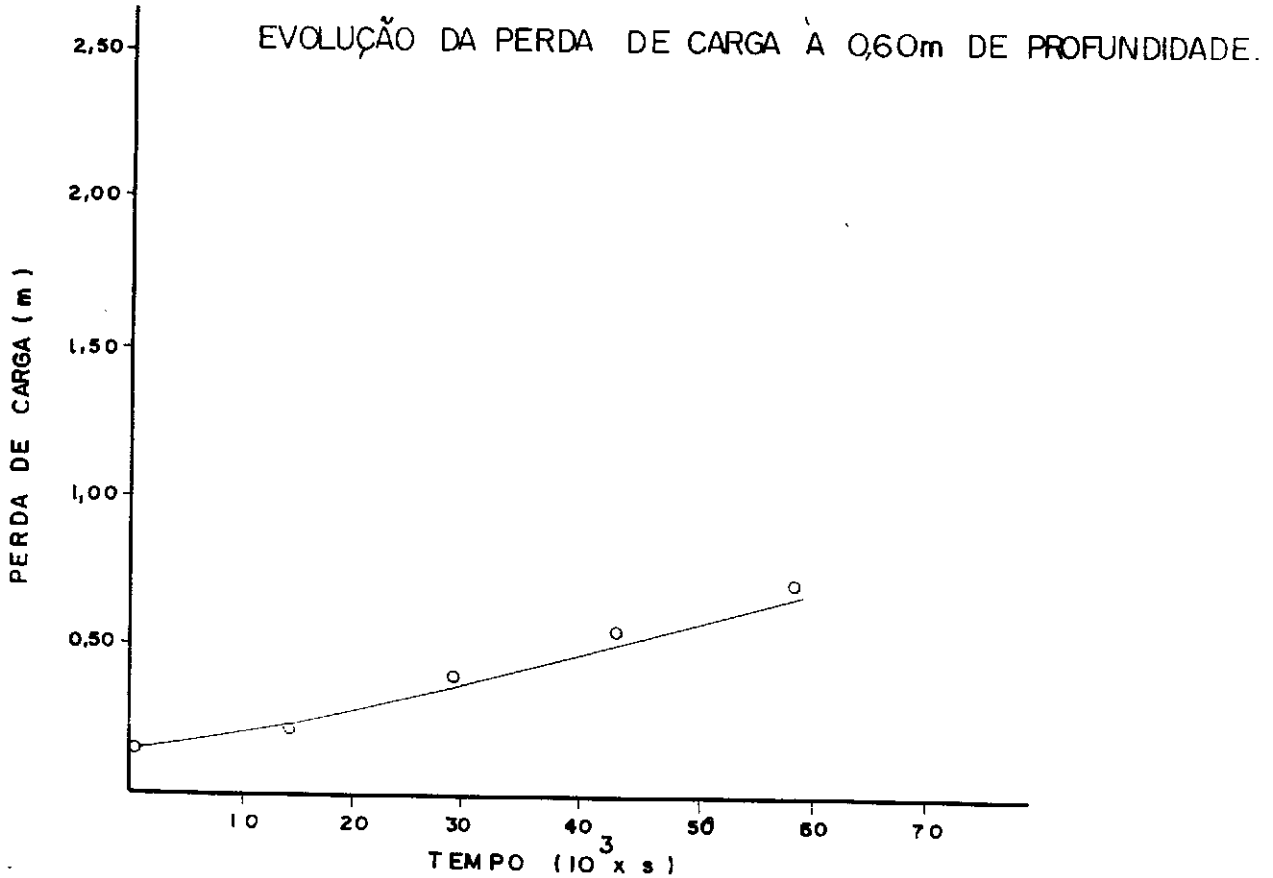
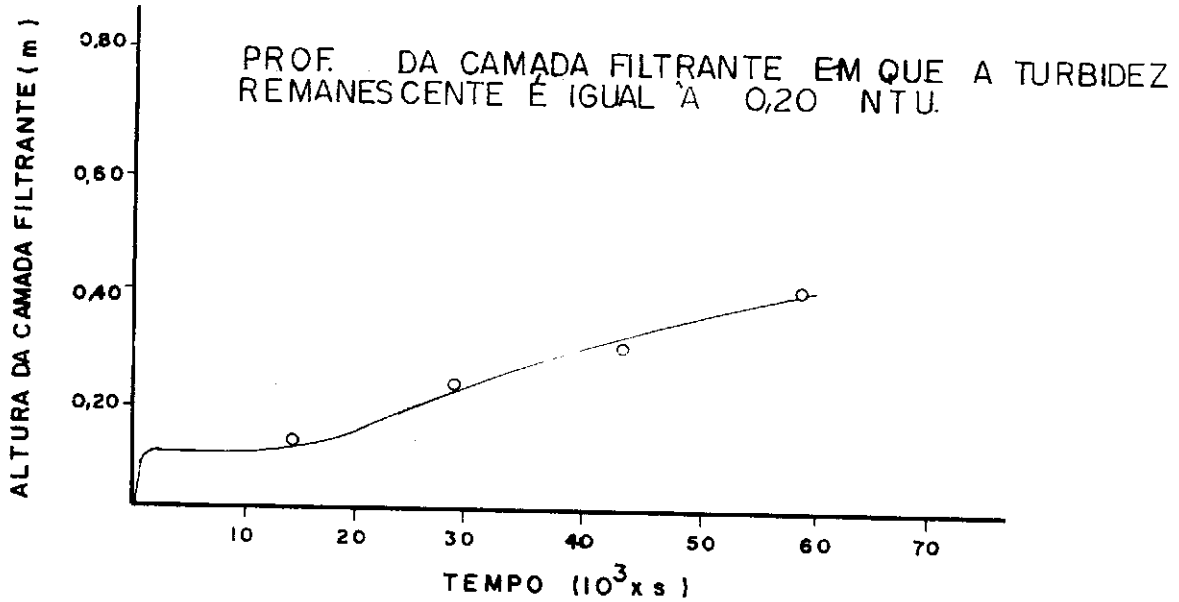
VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 1,90 mm / s



— CURVA TEÓRICA  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 10

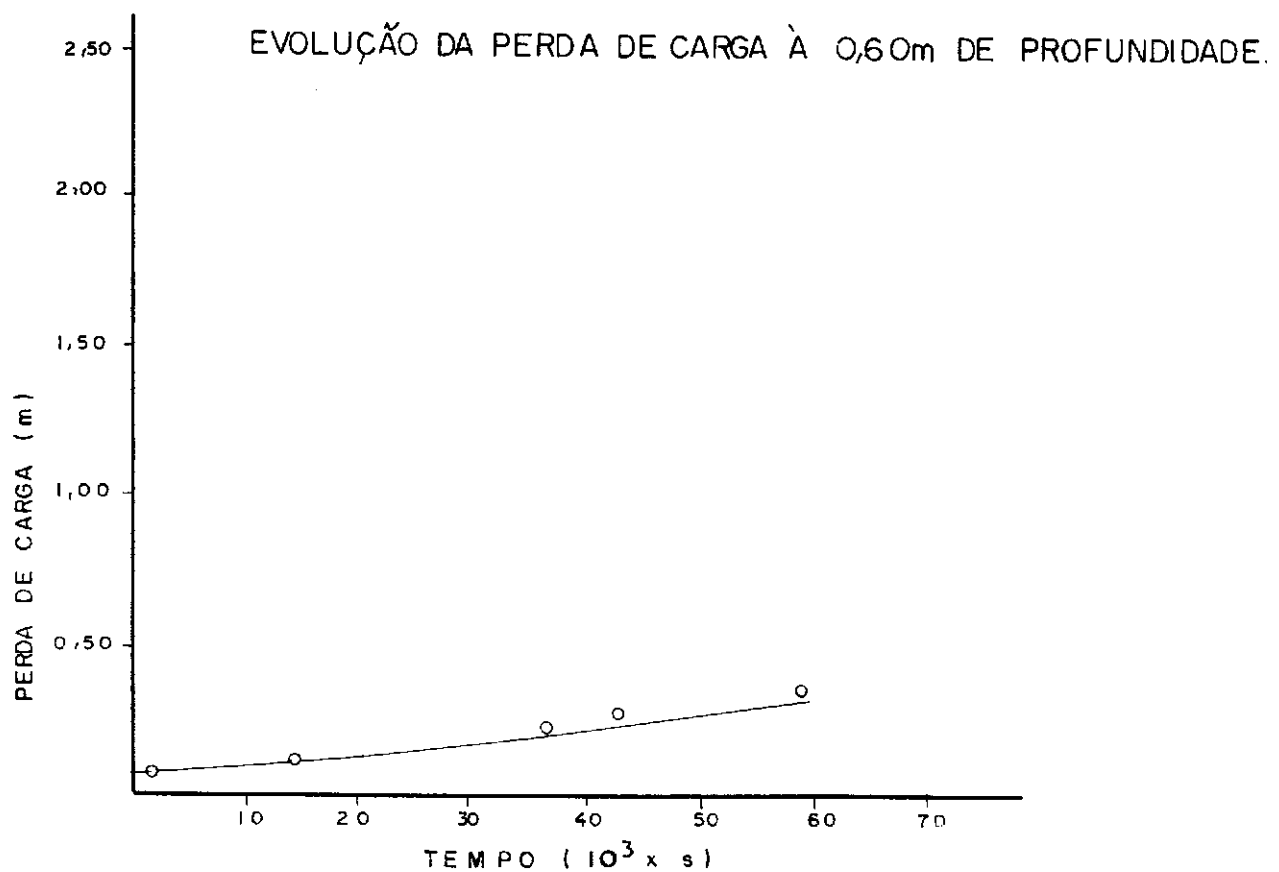
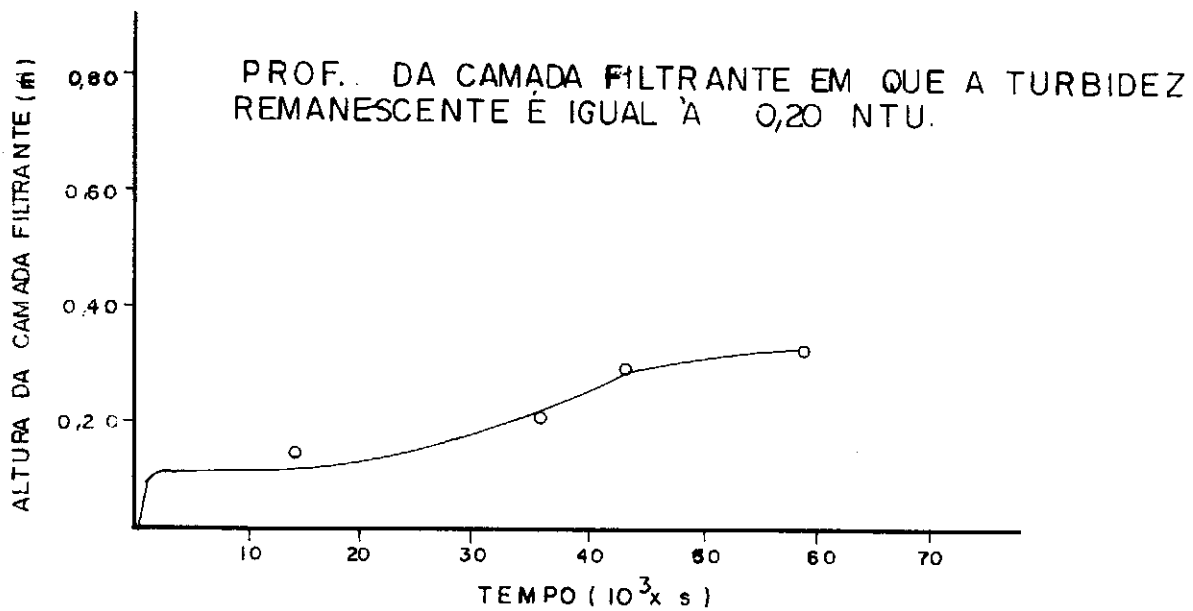
FILTRO Nº 02  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 1,70 mm/s. AREIA: 0,59 mm.



— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 10

FILTRO Nº 03  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 1,39 mm/s. AREIA: 0,69mm

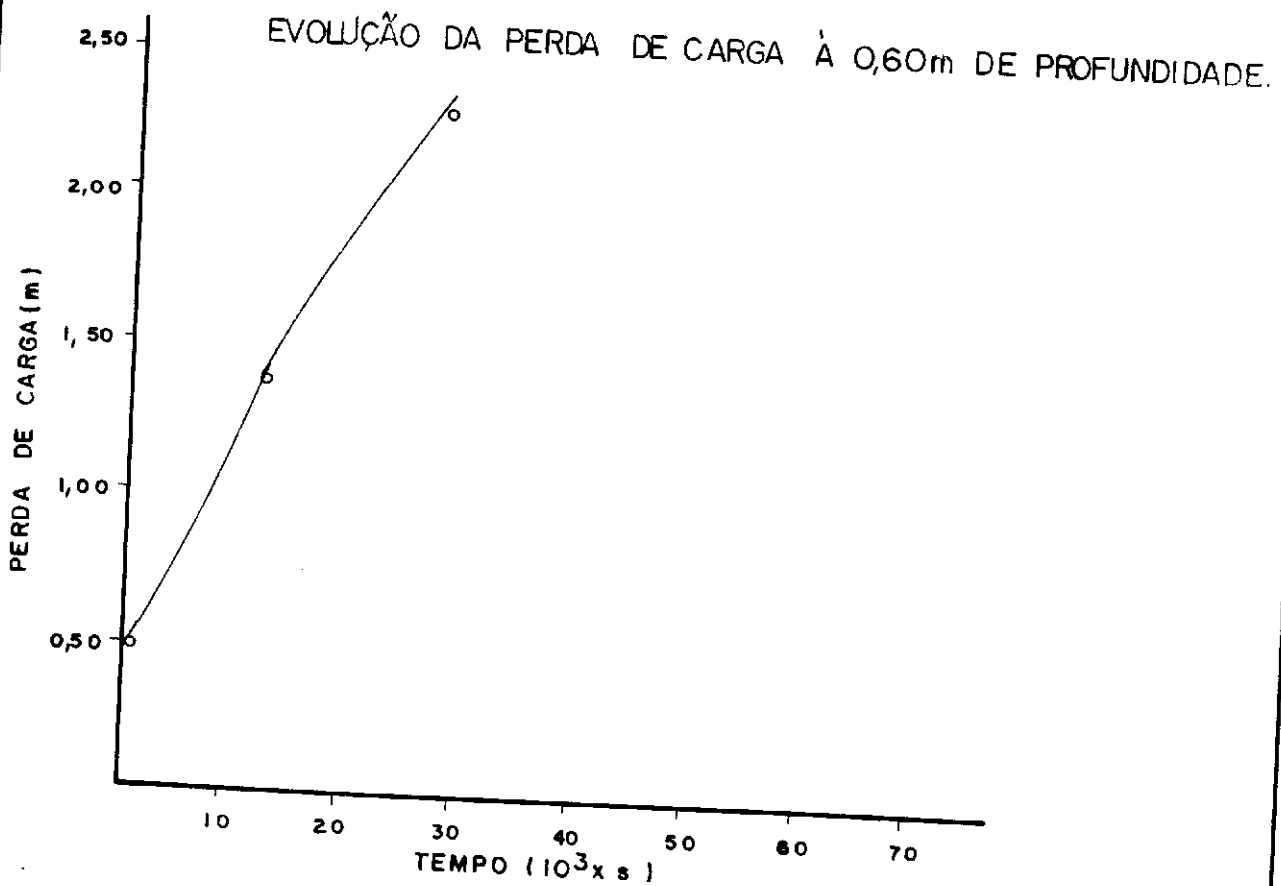
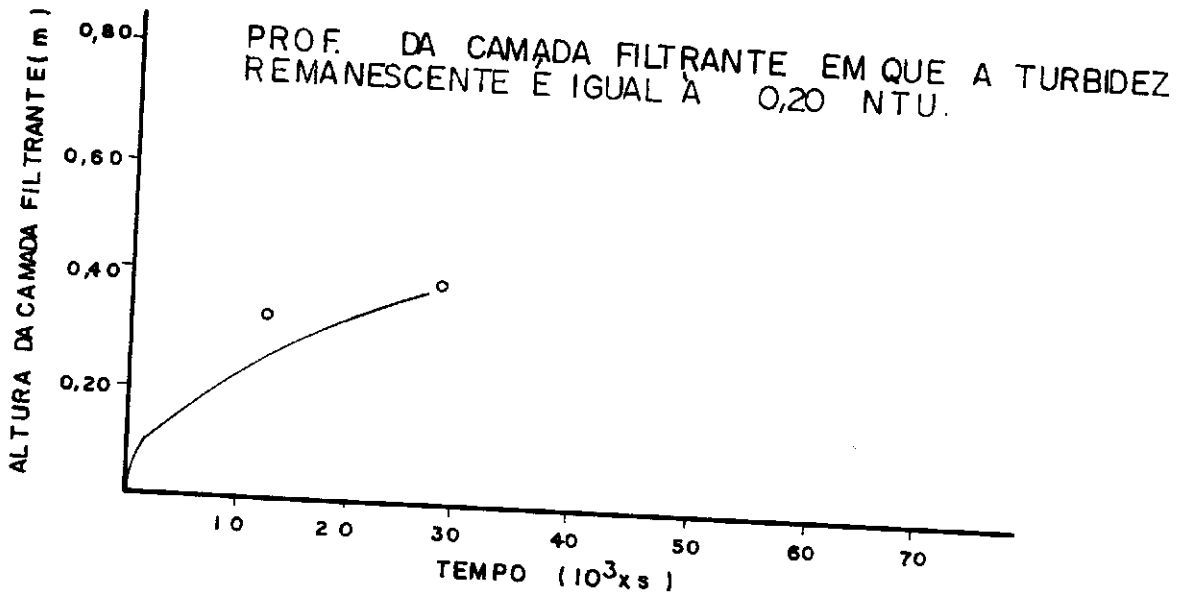


— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 12

51

FILTRO Nº: 01  
VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 3,99 AREIA: 0,50 mm.  
mm/s.



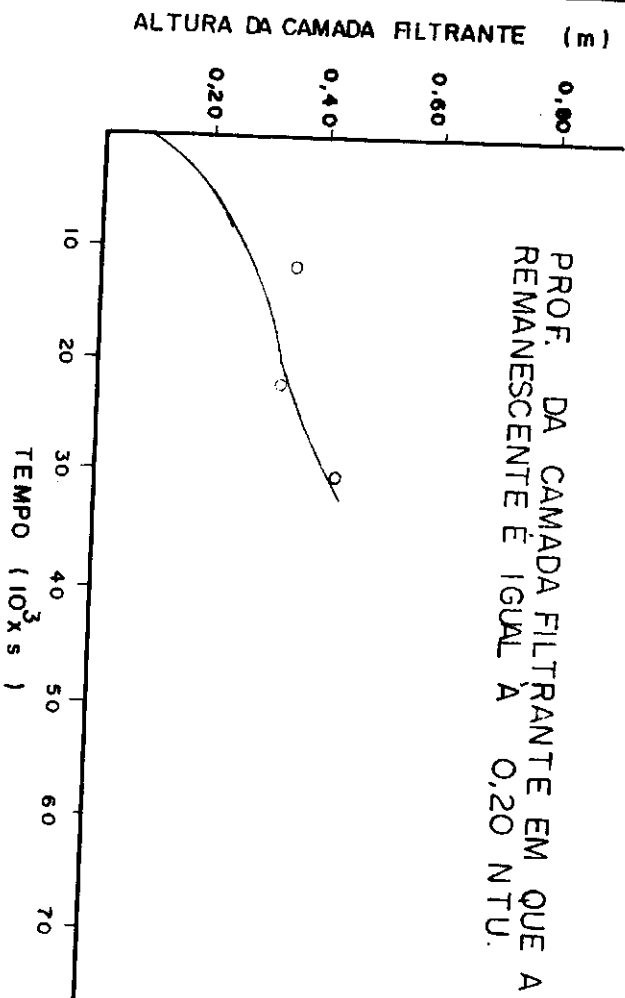
— CURVA TEÓRICA.

○ - VALOR EXPERIMENTAL.

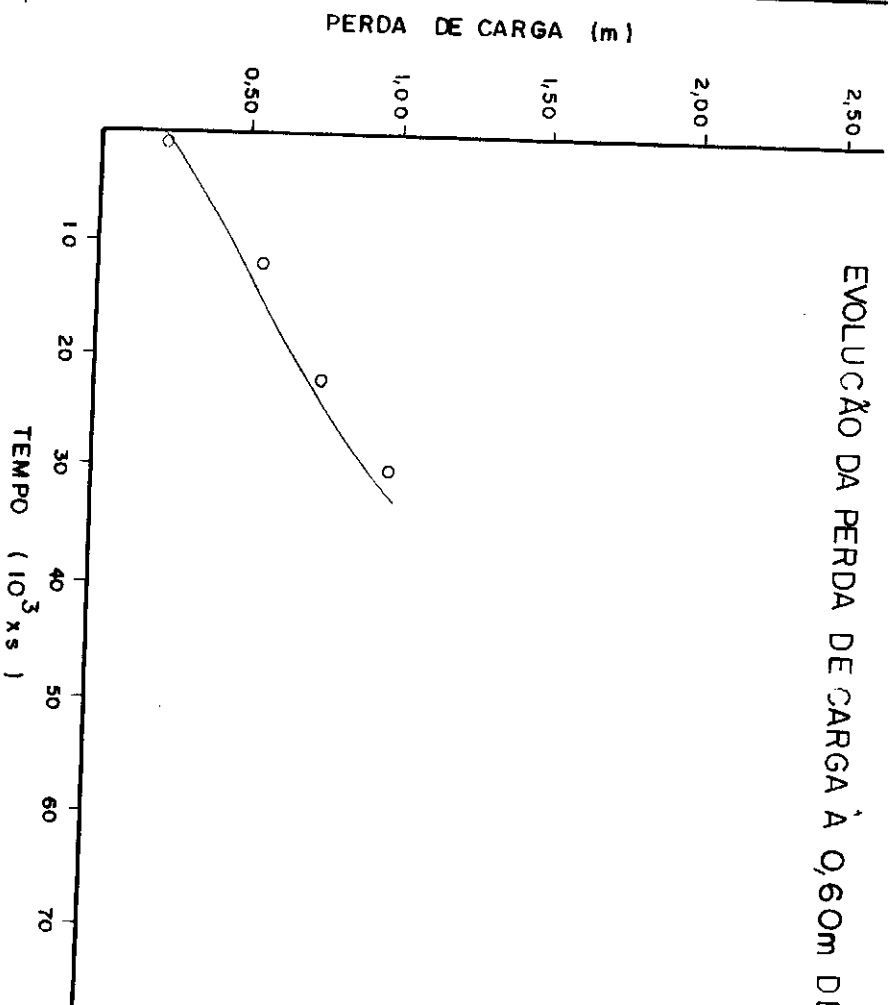
## TESTE Nº: 12

FILTRO Nº 03  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 3,69 mm/s. A REIA: 0,69mm

PROF. DA CAMADA FILTRANTE EM QUE A TURBIDEZ,  
 REMANESCENTE É IGUAL A 0,20 NTU.



EVOLUÇÃO DA PERDA DE CARGA À 0,60m DE PROFUNDIDADE.



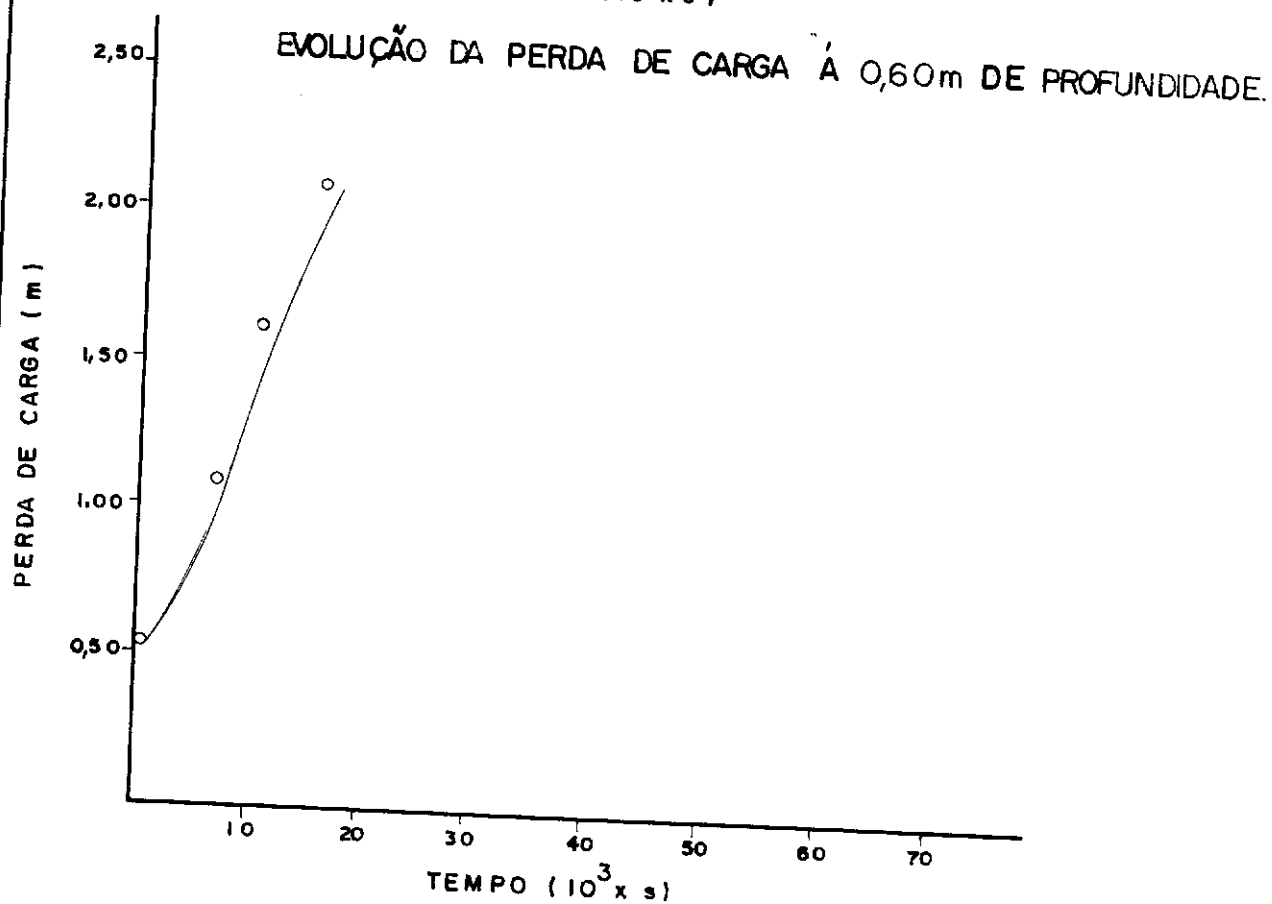
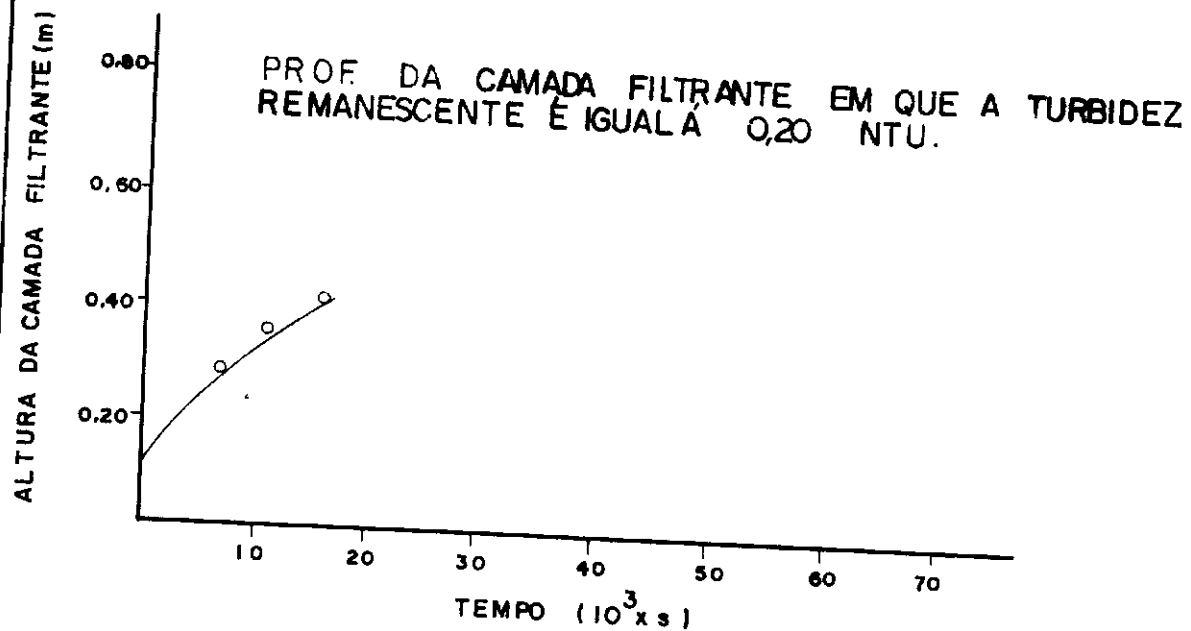
— CURVA TEÓRICA  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 13

FILTRO Nº: 02

AREIA: 0,59 mm

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 6,20 mm/s.

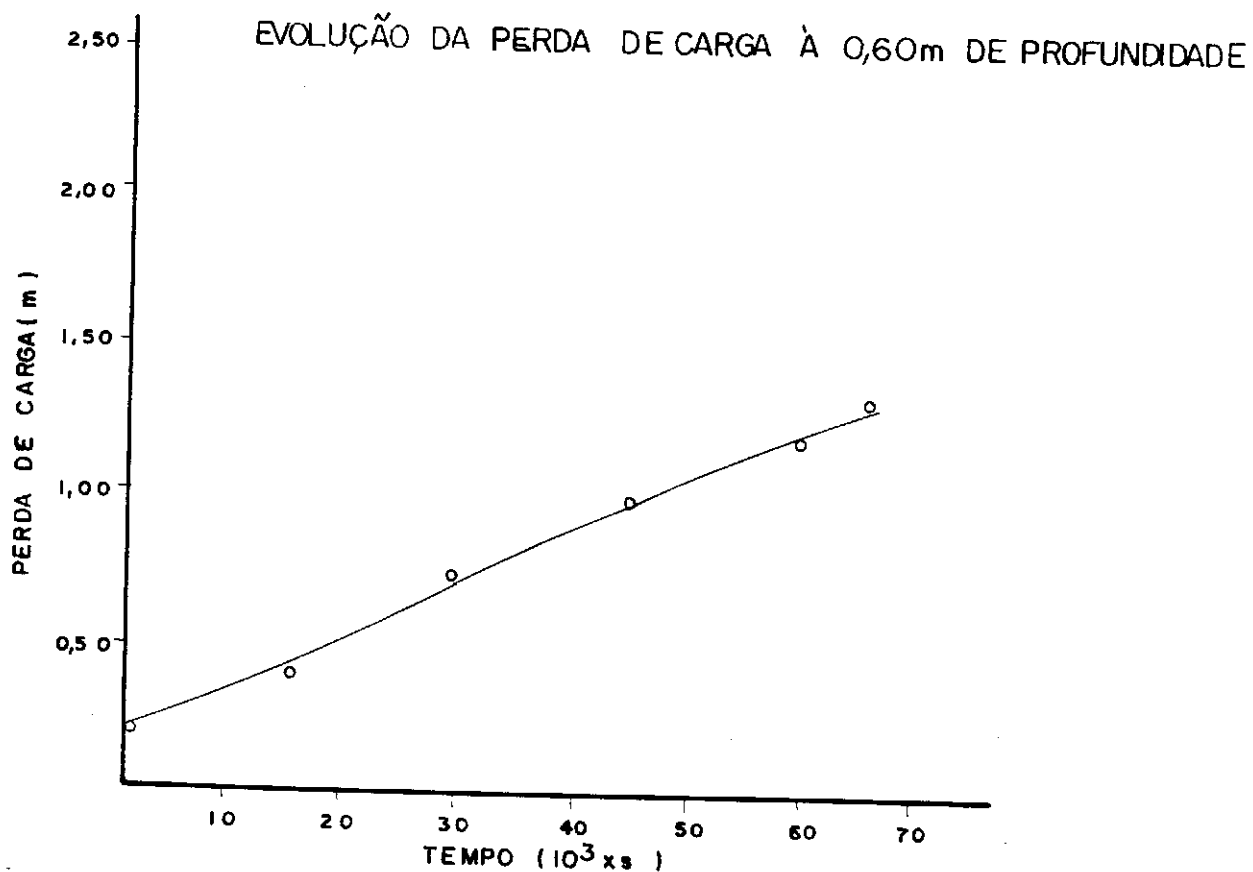
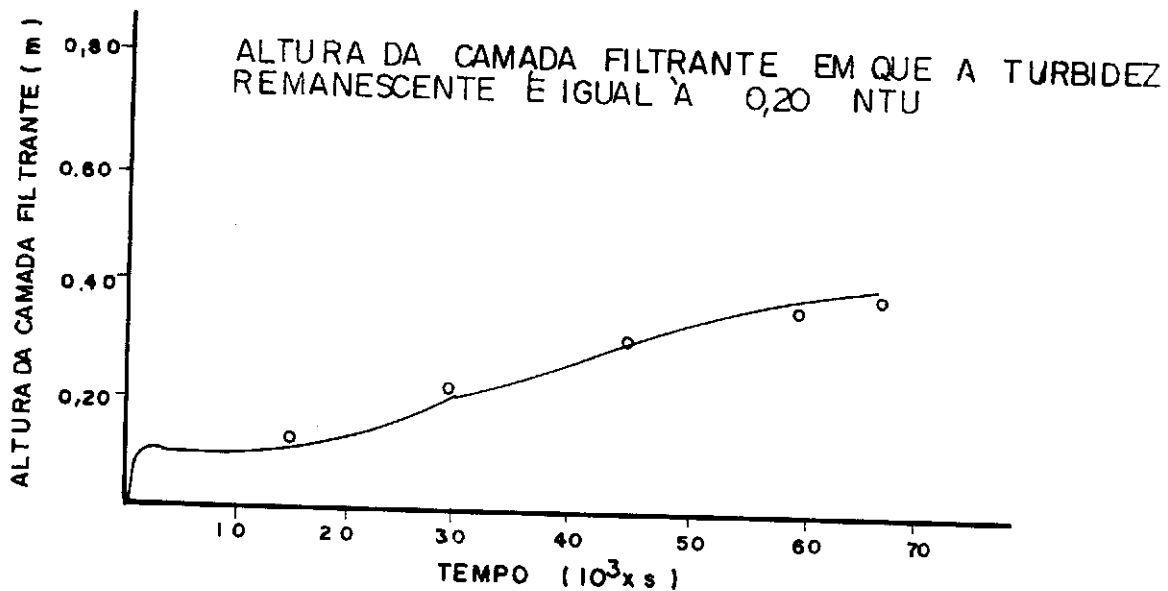


— CURVA TEÓRICA  
 ○ — VALOR EXPERIMENTAL.



# TESTE Nº: 14

FILTRO Nº 01  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 1,86 AREIA: 0,50mm.  
 mm /s.



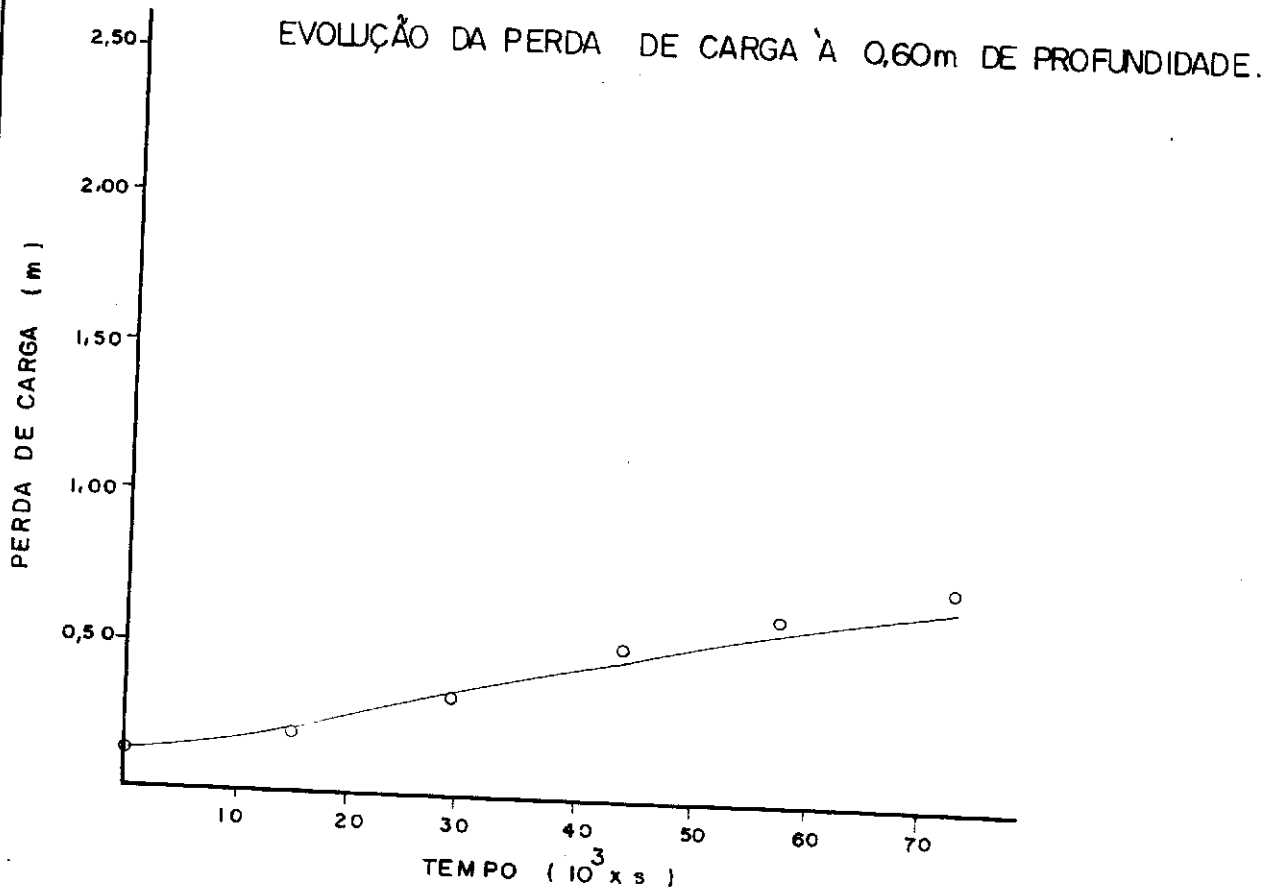
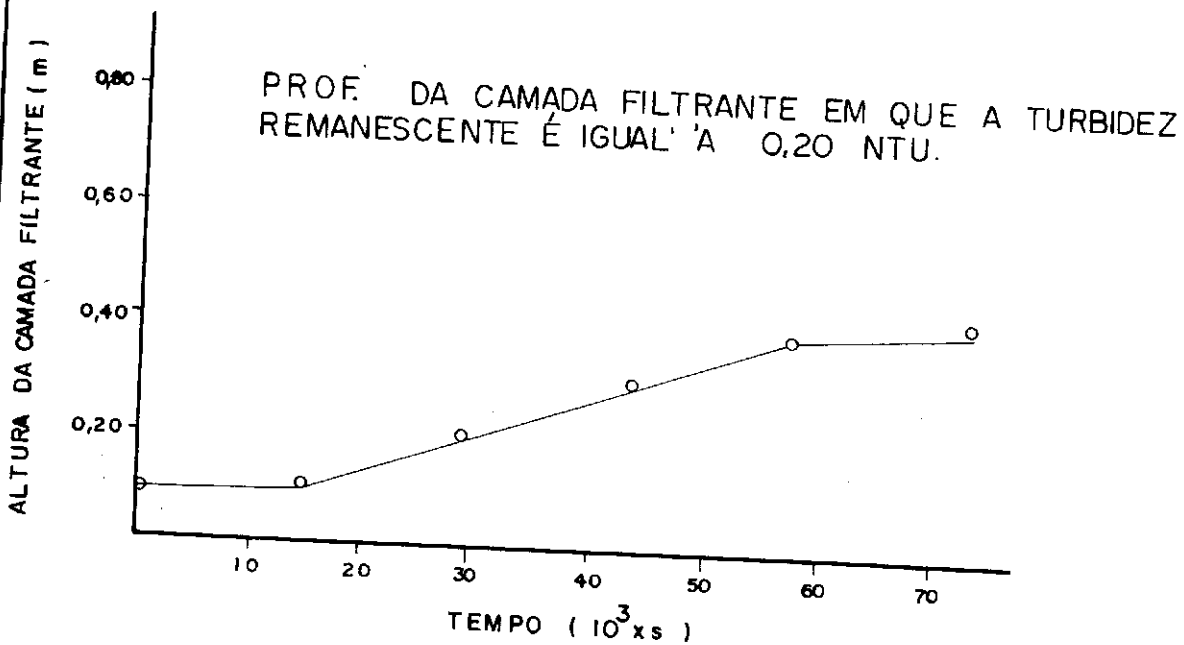
— CURVA TEÓRICA.  
 ○ - VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 14

FILTRO Nº 02

AREIA: 0,59 mm

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 1,54 mm/s.



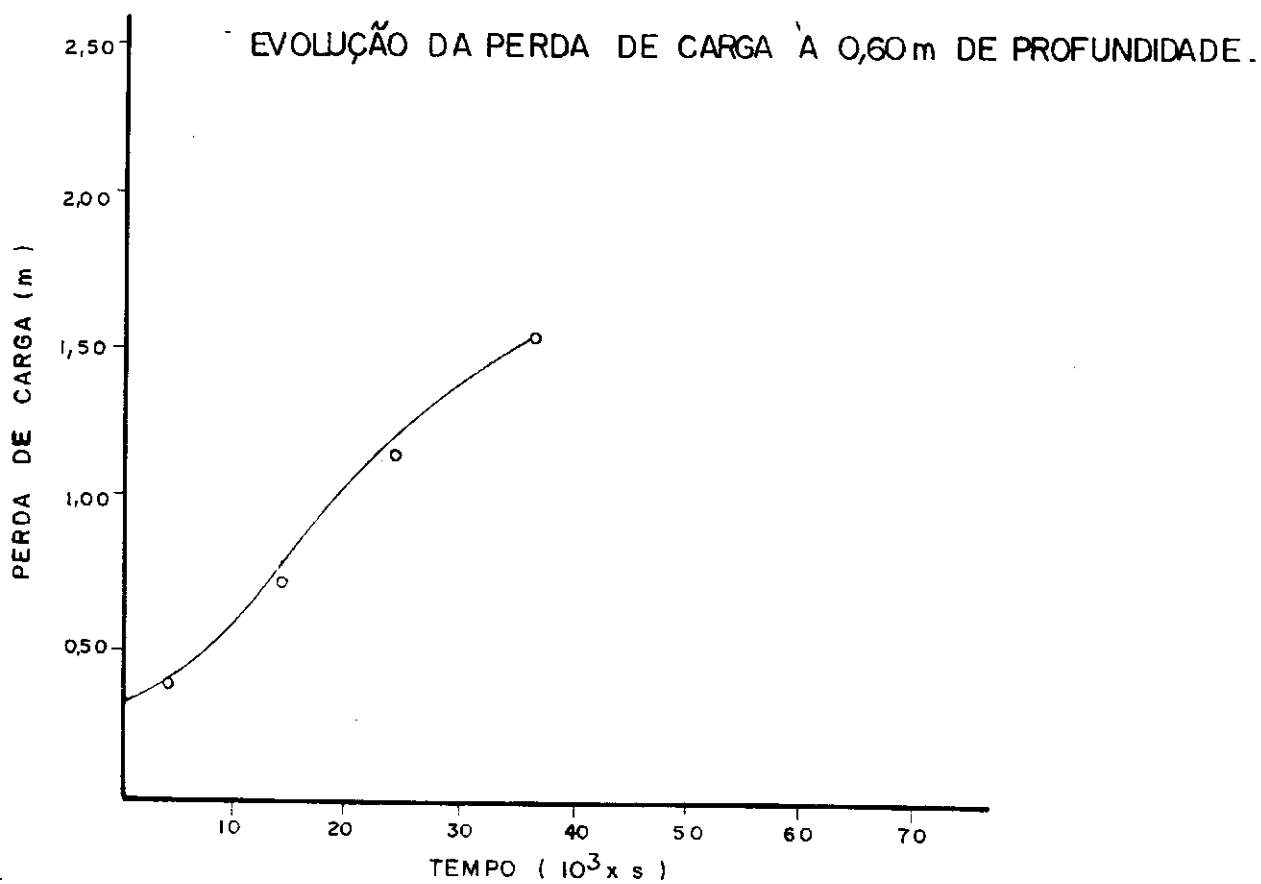
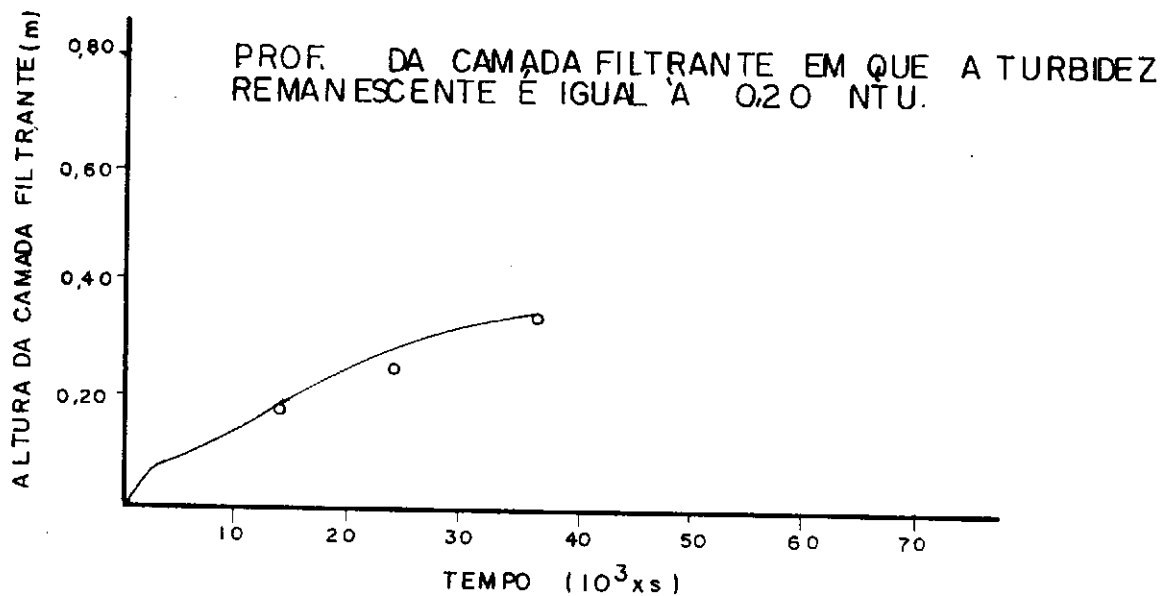
— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 15

FILTRO Nº 01

AREIA: 0,50mm.

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 2,88 mm/s



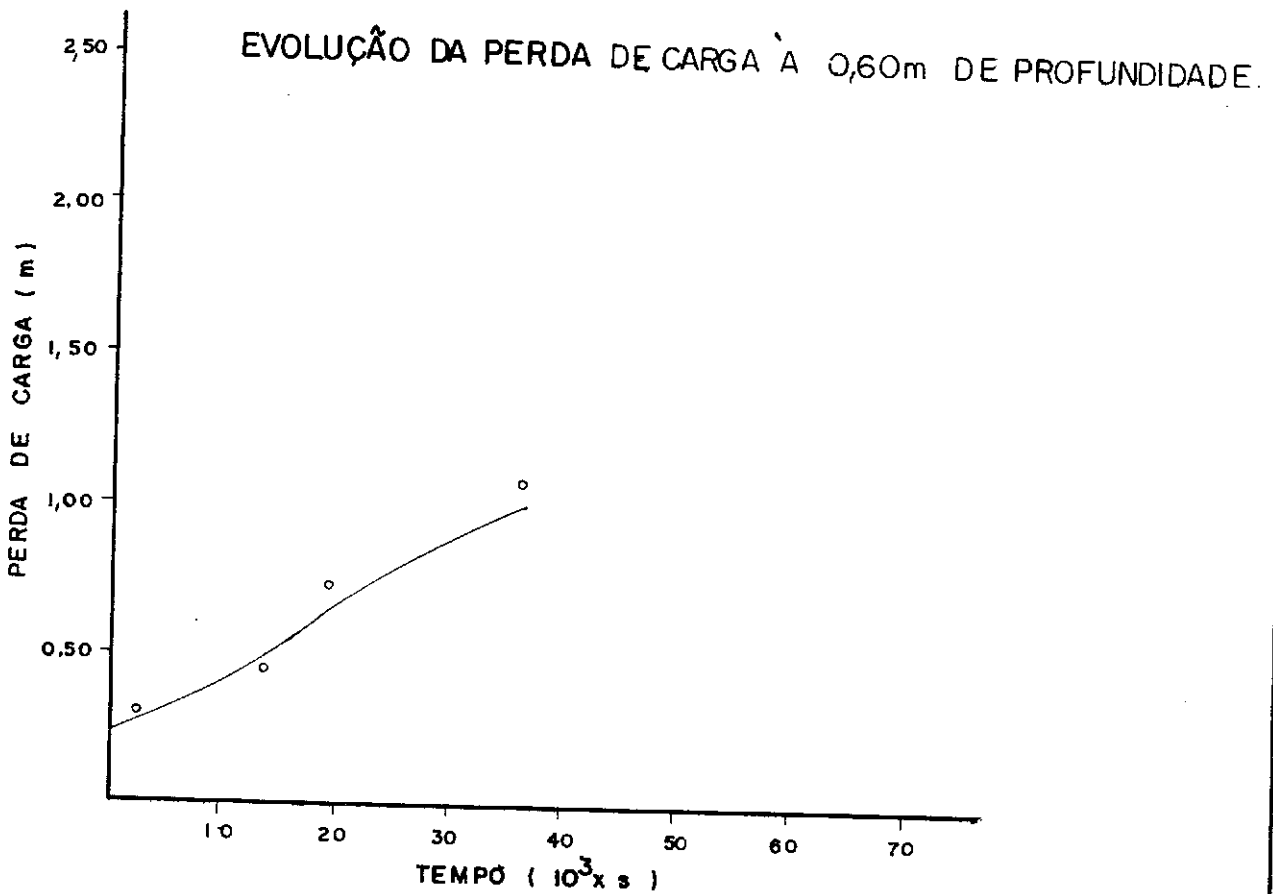
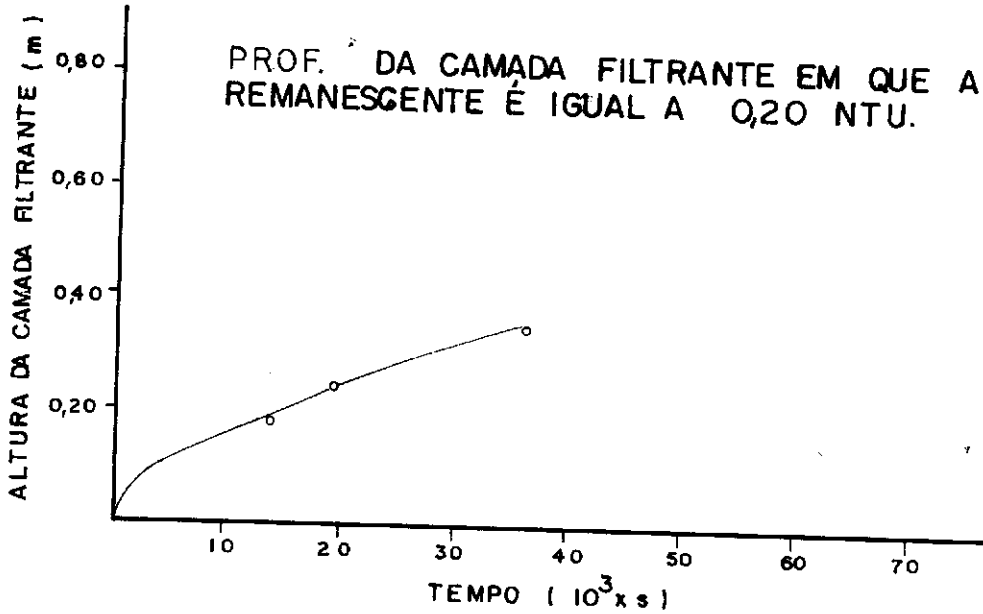
— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 15

FILTRO Nº: 02

AREIA: 0,59 mm.

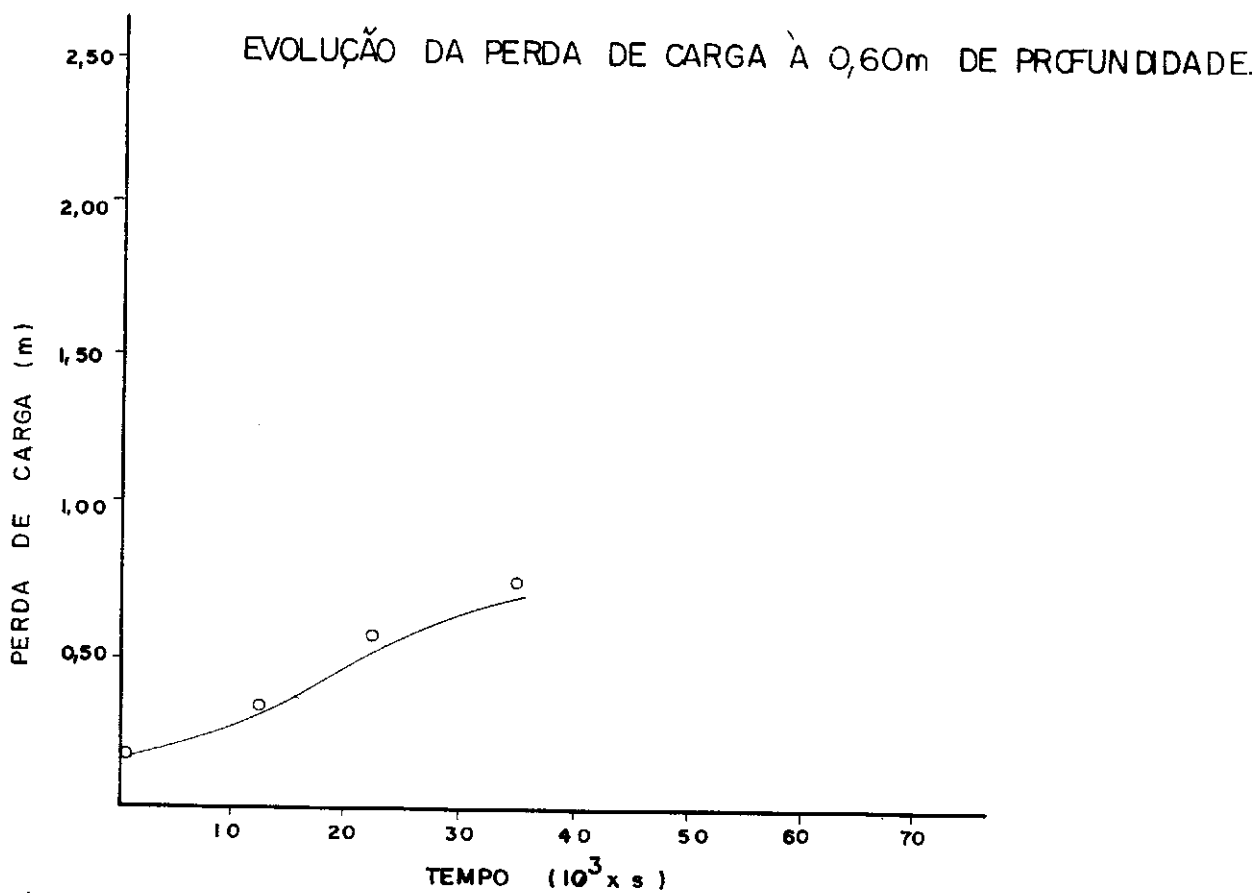
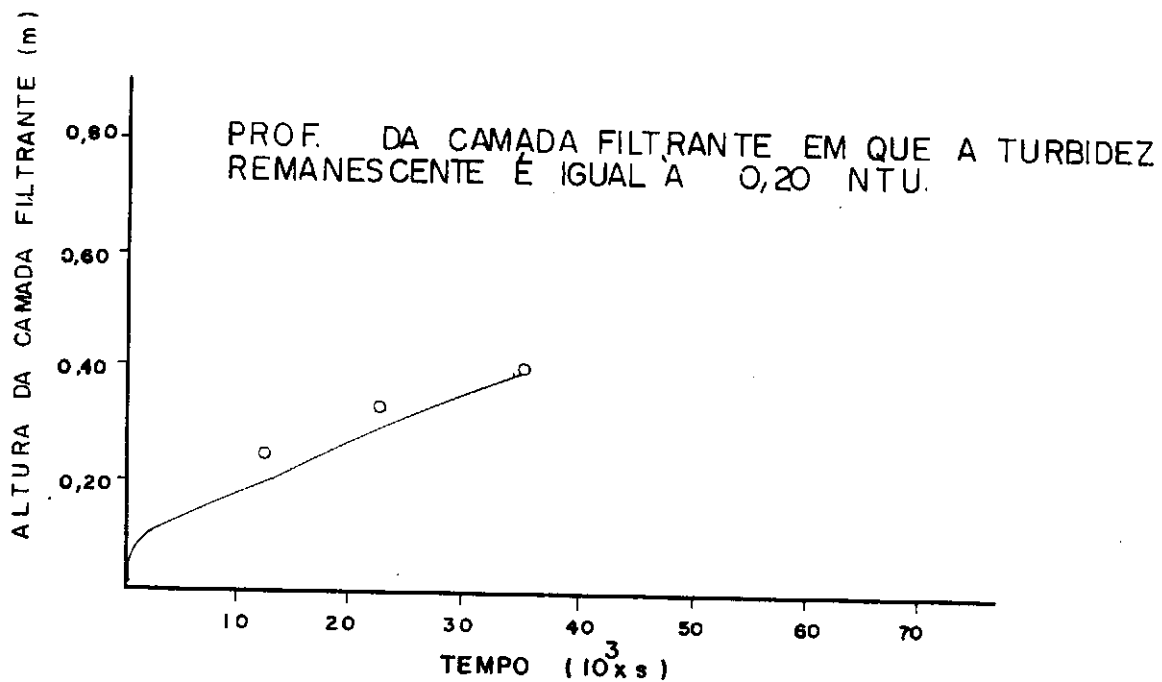
VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 2,83 mm/s



— CURVA TEÓRICA  
○ VALOR EXPERIMENTAL.

# TESTE Nº: 15

FILTRO Nº 03  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 2,99 mm/s. AREIA: 0,69 mm.



— CURVA TEÓRICA.  
 ○ VALOR EXPERIMENTAL.

### 4.3 Considerações sobre o modelo de Lerk

As equações-da teoria matemática, escritas de forma

$$\lambda = - \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial y}, \text{ e}$$

$\sigma v = - \frac{v}{pd} \int_0^t \frac{\partial c}{\partial y} dt$ , permitem a construção do gráfico mostrado na figura 4.1.

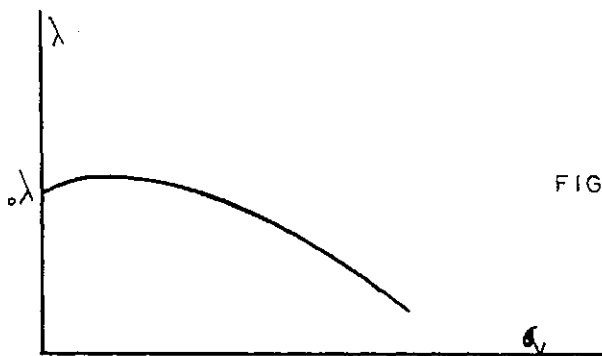


FIG. 4.1— VARIACÃO DO COEFICIENTE DO FILTRO  $\lambda$  DURANTE A FILTRAÇÃO.

O aumento inicial no valor de  $\lambda$  é devido à diminuição da porosidade, provocada pela matéria em suspensão que se deposita nos grãos, aumentando a eficiência da remoção. À medida que o processo de filtração prossegue, no entanto, a velocidade intersticial cresce rapidamente dificultando a deposição da matéria em suspensão e diminuindo a qualidade da água filtrada. O valor de  $\lambda$ , então, vai decrescendo continuamente até aproximar-se de zero.

Segundo a teoria de Lerk,

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma v}{np_0}\right) C, \text{ que é uma equação linear, pela qual } \lambda \text{ é}$$

sempre decrescente. Embora isso não seja estritamente verdadeiro, algumas considerações podem ser feitas, que justificam sua escolha como modelo estudado nessa pesquisa:

i. a simplicidade do modelo de Lerk possibilita sua aplicação com razoável facilidade;

ii. a qualidade do efluente de um filtro é prejudicada pela lavagem em contra-corrente, ocorrendo uma degradação inicial logo após o filtro recém-lavado ser posto em operação, conforme foi comprovado por Armitharajah e Wetstein (10), tornando irrelevante, na prática, o aumento inicial do valor de  $\lambda$  (a figura 4.2 mostra a variação da qualidade de água filtrada com o tempo);

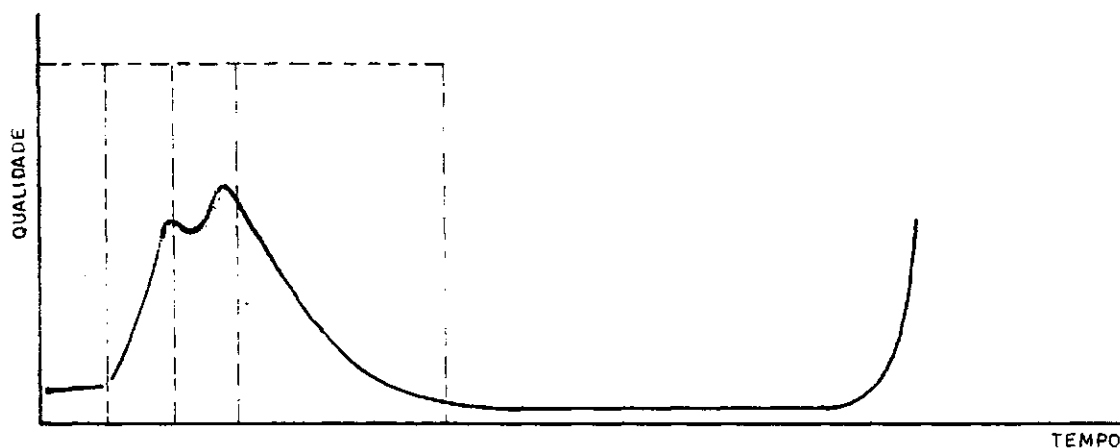


FIG. 4.2 - VARIAÇÃO DA QUALIDADE DO EFLUENTE DURANTE A CORRIDA DE FILTRAÇÃO.

iii. a diminuição do valor de  $\lambda$  é proporcional ao aumento dos depósitos de matéria em suspensão retida, até atingir um valor muito baixo, significando que praticamente não está mais ocorrendo remoção. Quando essa situação é atingida, ocorre o trespasse das impurezas para pontos mais profundos da camada filtrante ou mesmo para o efluente. O que se observa nos experimentos é que inicialmente quase toda a remoção ocorre na superfície do leito, até que a eficiência

cia de remoção nessa primeira capa passa a diminuir, transferindo para profundidades maiores o processo de purificação. A figura 4.3, aproveitada de estudos de Tso-Ti-Ling (11) mostra esse fenômeno.

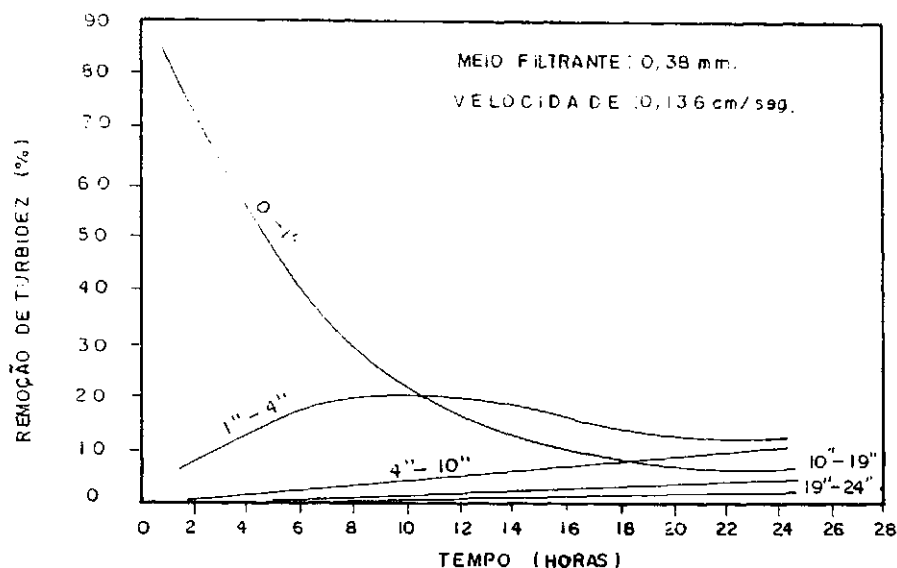


FIG. 4. 3— PORCENTAGEM DE REMOÇÃO DA TURBIDEZ EM DIFERENTES CAPAS DE UM LEITO FILTRANTE ATRAVÉS DO TEMPO.

No entanto, à medida que a remoção se dá em zonas mais profundas, ocorre obviamente o aumento da perda de carga no meio filtrante, como consequência da diminuição dos espaços vazios da parte superior da camada, havendo então a necessidade de a carga hidráulica sobre o leito ser suficiente para permitir o aproveitamento de toda a camada no processo de filtração. Essa carga hidráulica, na prática, é limitada pelos custos de construção, que são bastante elevados para filtros muito profundos. Por outro lado, observa-se que após ser atingido determinado grau de qualidade, a água quase que não sofre influência do processo. Então, um modelo matemático para a filtração deve, principalmente, poder prever a profundidade em que ocorre a remoção máxima, de forma a permitir tirar todo o proveito possível do leito filtrante, para determinados tempo de filtração e velocidade aplicada, e a perda de carga que o



leito apõe a passagem do fluxo, podendo ser considerado como de menor importância a descrição do que ocorre no interior do filtro, já que a aplicação desse modelo, para dimensionamento e escolha da camada filtrante adequada à água a ser tratada, pode prescindir desse aspecto. Considerou-se, assim, o modelo de Lerk como apropriado ao objetivo da pesquisa.

## CAPÍTULO V

### APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS

#### 5.1 Escolha de material filtrante para a estação de tratamento do Gavião.

A sistemática desenvolvida nessa pesquisa pode ser utilizada para otimização da escolha do material filtrante para qualquer tipo de água. No entanto, como a eficiência do processo de filtração depende das características físico-químicas e biológicas da água e do tratamento prévio a que a água é submetida antes da filtração, as equações estabelecidas nesse trabalho, inevitavelmente, tem uso restrito à água produzida pelos processos de floculação e decantação na Estação de Tratamento do Gavião.

Essa planta de tratamento foi projetada para uma vazão de  $3\text{m}^3/\text{s}$ , e é constituída basicamente por câmaras de mistura rápida mecanizadas, floculadores com agitadores mecânicos, decantadores de fluxo horizontal e filtros rápidos de gravidade. Os filtros são em números de 8 com área filtrante total de  $1.120\text{m}^2$ . A taxa de filtração média aplicada aos filtros, portanto, é de  $231/\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ , equivalente à velocidade de  $2,68\text{ mm/s}$ .

Originariamente os filtros foram construídos com material filtrante em camadas duplas de antracito e areia. Problemas construtivos da estação de tratamento fizeram com que, posteriormente, se passasse a utilizar apenas areia como material filtrante. Durante o período em que se realizaram os testes de filtração, os filtros não possuíam uniformidade quanto à granulometria da areia ou à altura das camadas. Além disso, a vazão de tratamento era bastante superior à vazão nominal da ETA, acarretando como consequência inconstância na qualidade da água tratada, apesar de a água bruta não passar por alterações significativas, ao longo do ano, nas suas características físico-químicas. Como parâmetro de projeto para dimensionamento do material filtrante, contudo, pode-se

considerar 1,50 NTU como o valor da turbidez afluyente aos filtros, ou seja o valor da turbidez da água decantada. Esse valor é um pouco superior à média dos valores observados.

A escolha do material filtrante para a estação de tratamento do Gavião, com aproveitamento das instalações existentes, sofre duas importantes limitações: (1) o nível máximo da água nos filtros que definirá a perda de carga máxima no leito filtrante, e (2) a altura das calhas de coleta de água de lavagem que limitará a altura do leito filtrante.

Considerando-se que não serão feitas alterações no sistema de drenagem dos filtros, que a altura da camada suporte será de 40cm e que a lavagem dos filtros produzirá uma expansão na camada filtrante de 25%, sem risco de perda de areia, tem-se as seguintes limitações:

- altura máxima da camada filtrante: 1,00m;
- altura máxima disponível (altura da camada somada à perda de carga máxima): 3,00m.

A equação de remoção de turbidez

$$T = T_0 \frac{e^{-\alpha_1 t}}{e^{-\alpha_1 t} + e^{\lambda_0 y} - 1},$$

escrita de forma

$$y = \frac{\ln \left( (T_0/T - 1) \cdot e^{\alpha_1 t} + 1 \right)}{\lambda_0},$$

juntamente com a equação de perda de carga foram utilizadas para construção do quadro 5.1, estabelecendo-se as seguintes condições:

Turbidez inicial: 1,5 NTU

Turbidez efluente: 0,2 NTU

Corrida de filtração: 24 horas

Velocidade: 2,68mm/s

Diâmetro (mm)	Prof. da camada (m)	Perda de carga (m)	Alt. total (m)
0,5	0,75	3,28	4,03
0,6	0,78	2,14	2,92
0,7	0,82	1,48	2,30
0,8	0,86	1,06	1,92
0,9	0,91	0,79	1,70
1,0	0,97	0,60	1,57

Quadro 5.1 - comparação entre camadas de diversos diâmetros, à velocidade de filtração de 2,68 mm/s.

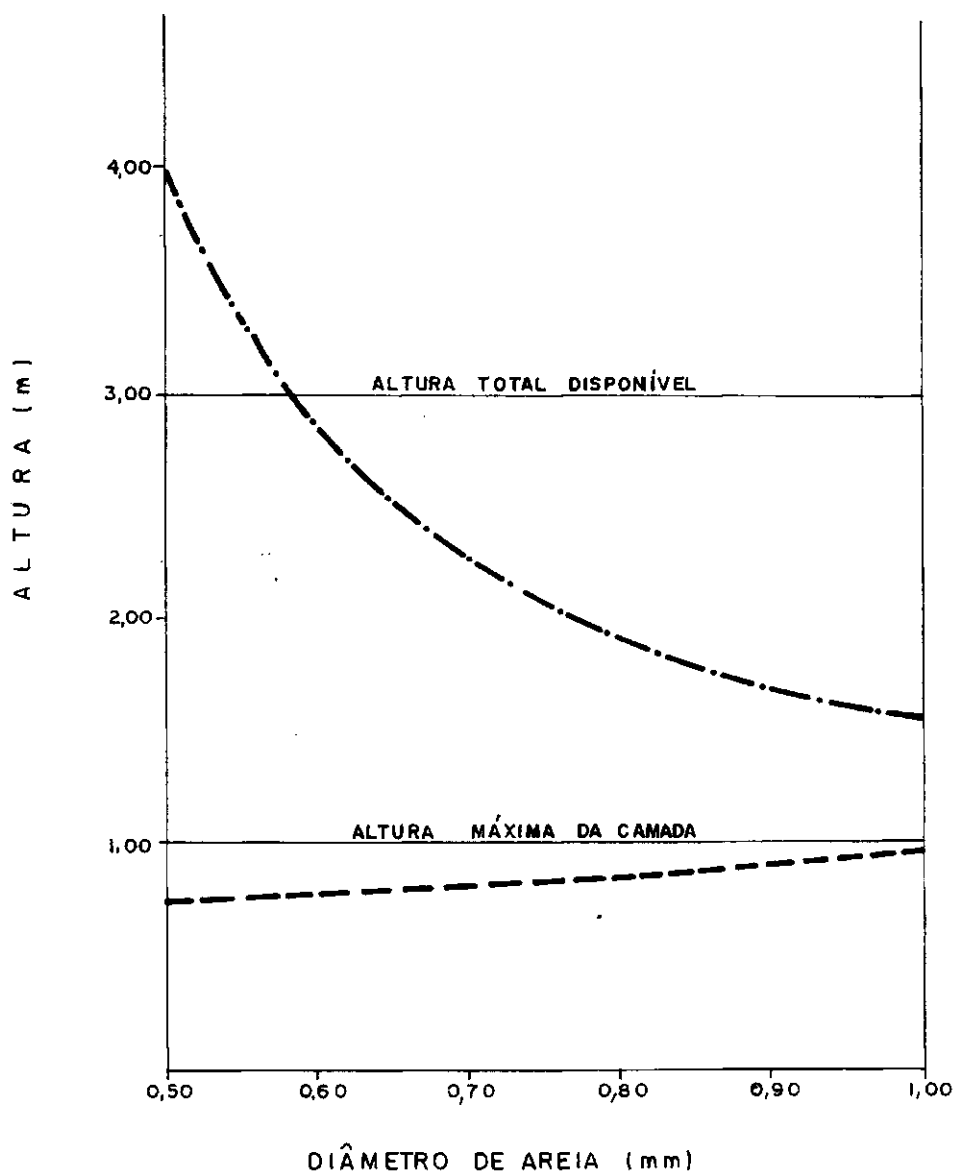
Esse quadro permite a comparação entre a altura mínima do leito necessária para obter-se a remoção desejada e a perda de carga para diversos diâmetros de areia, ao fim da corrida de filtração. A coluna com a altura total refere-se à soma da perda de carga na camada com a altura mínima necessária.

A figura 5.1 foi construída com base nos dados do quadro 5.1. Através de observação dessa figura, verifica-se que areia com diâmetro igual ou superior a 0,60mm e inferior a 1,00mm atende às condições exigidas, quanto à altura da camada e à altura total disponível. A areia com diâmetro de 0,60mm representa o menor custo dentre as camadas possíveis de serem utilizadas, seja pela menor quantidade de material filtrante ou pelo menor consumo de água de lavagem, já que a areia de diâmetro inferior é lavável mais facilmente, porque apresenta uma maior expansão para a mesma velocidade ascensional de água de lavagem.

## 5.2 Otimização dos filtros

A estação de tratamento do Gavião normalmente era operada com vazão superior à sua vazão de tratamento no-

TURBIDEZ INICIAL: 1,50 NTU  
 TURBIDEZ EFLUENTE: 0,20 NTU.  
 CORRIDA DE FILTRAÇÃO: 24 horas.  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 2,68 mm/s.



----- - ALTURA DA CAMADA FILTRANTE.

- . - . - . - ALTURA TOTAL NECESSÁRIA.

FIG. 5.1 - CURVAS DA ALTURA MÍNIMA DAS CAMADAS E DA ALTURA TOTAL NECESSÁRIA PARA A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO DE 2,68 mm/s.

minal. Apesar de ter sido projetada para  $3,0\text{m}^3/\text{s}$ , o seu dimensionamento hidráulico já previa a sua utilização para até  $4,5\text{m}^3/\text{s}$ . Para que isso fosse possível, porém, haveria a necessidade de que os processos de tratamento fossem aprimorados, de modo a que a qualidade da água tratada se mantivesse dentro dos limites estabelecidos pelos padrões de potabilidade.

A água bruta, proveniente de açudes interligados entre si através de túnel e canais e situados numa bacia hidrográfica relativamente plana, por meio de autodepuração melhorou significativamente de qualidade desde a construção da estação. Isso pode ser explicado pela localização dos açudes em região afastada de fontes poluidoras e que são abastecidos por rios que lançam suas águas em locais distantes do canal de captação da estação de tratamento, favorecendo a deposição natural de grande parte da matéria em suspensão. Por tudo isso, a qualidade da água decantada não sofre diminuição com o aumento da vazão, salvo em casos eventuais como lavagem de decantadores ou durante a realização de serviços de manutenção.

Quanto aos filtros, projetados em camadas duplas de antracito e areia, seriam operados, quando da máxima produção, à uma taxa de  $350\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ .

Cabe, portanto, uma averiguação sobre a velocidade de filtração máxima em filtros com camadas simples de areia, dentro das limitações existentes na estação e capazes de produzir uma água filtrada com a qualidade estabelecida nesse trabalho.

O quadro 5.2 foi construído da mesma maneira descrita anteriormente, para as velocidades de filtração mostradas no quadro, com as seguintes condições:

Turbidez inicial: 1,50 NTU

Turbidez efluente: 0,20 NTU

Corrida de filtração: 24 horas

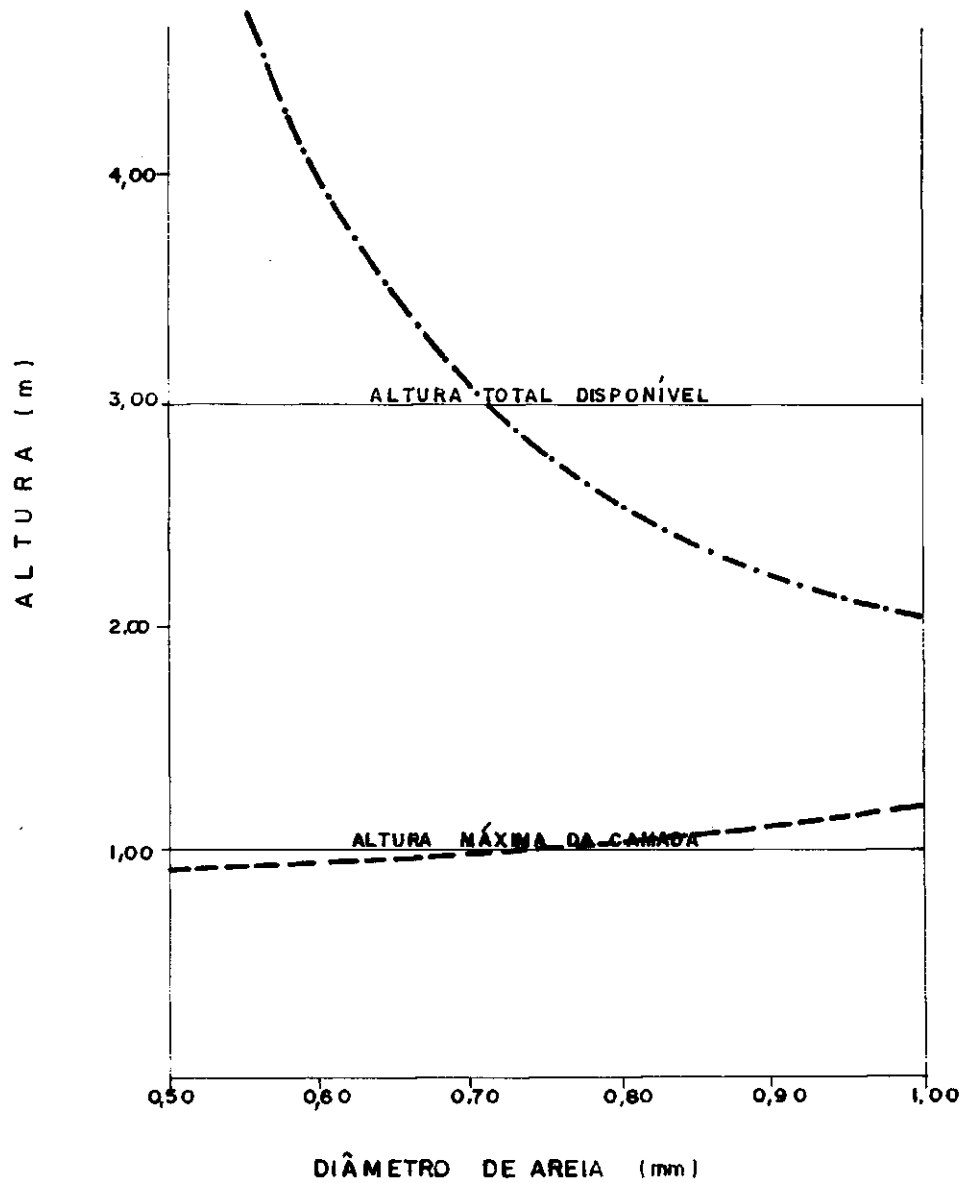
O quadro 5.2 juntamente com a figura 5.2, cons-

truída com os dados extraídos desse quadro para a velocidade de 3,2mm/s, mostram que a areia com diâmetro de 0,75mm possibilita a máxima velocidade de filtração para uma corrida de 24 horas. Essa velocidade propicia um aumento na vazão da água tratada de cerca de 20%, passando a ser de 3,6m<sup>3</sup>/s.

Turbidez inicial: 1,50 NTU Turbidez efluente: 0,20 NTU Corrida de filtração: 24 horas				
Diâmetro (mm)	Velocidade (mm/s)	Profund. da camada (m)	Perda de carga (m)	Altura total (m)
0,50	3,00	0,85	4,10	4,95
0,60		0,88	2,67	3,55
0,70		0,92	1,85	2,77
0,80		0,96	1,33	2,29
0,90		1,02	0,99	2,01
1,00		1,09	0,75	1,84
0,50	3,10	0,87	4,38	5,25
0,60		0,91	2,86	3,77
0,70		0,95	1,98	2,93
0,80		1,00	1,42	2,42
0,90		1,06	1,05	2,11
1,00		1,13	0,80	1,93
0,50	3,20	0,90	4,67	5,57
0,60		0,93	3,04	3,97
0,70		0,98	2,10	3,08
0,80		1,03	1,51	2,54
0,90		1,09	1,12	2,21
1,00		1,17	0,85	2,02
0,50	3,30	0,93	4,96	5,89
0,60		0,96	3,24	4,20
0,70		1,01	2,24	3,25
0,80		1,06	1,61	2,67
0,90		1,13	1,19	2,32
1,00		1,20	0,90	2,10
0,50	3,40	0,96	5,27	6,23
0,60		0,99	3,43	4,42
0,70		1,04	2,38	3,42
0,80		1,09	1,71	2,80
0,90		1,16	1,27	2,42
1,00		1,24	0,96	2,20
0,50	3,50	0,99	5,58	6,57
0,60		1,02	3,64	4,66
0,70		1,07	2,52	3,59
0,80		1,13	1,81	2,94
0,90		1,20	1,34	2,54
1,00		1,28	1,01	2,29

Quadro 5.2 - comparação entre camadas de areia, submetidas a velocidade de filtração de 3,0 mm/s a 3,5 mm/s.

TURBIDEZ INICIAL: 1,50 NTU.  
 TURBIDEZ EFLUENTE: 0,20 NTU.  
 CORRIDA DE FILTRAÇÃO: 24 horas.  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 3,2 mm/s.



----- ALTURA DA CAMADA FILTRANTE.

-.-.-.-.- ALTURA TOTAL NECESSÁRIA.

FIG. 5,2 - CURVAS DA ALTURA MÍNIMA DAS CAMADAS E DA ALTURA TOTAL NECESSÁRIA PARA A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO DE 3,2 mm/s.



A corrida de filtração utilizada para dimensionamento da camada filtrante, obviamente, pode ser alterada, apesar de que intervalos entre as lavagens inferiores a 24 horas sacrificam bastante a apuração e ocasionam maior custo para produção da água tratada, seja pelo maior consumo de água de lavagem ou pela menor vida útil dos materiais, equipamentos e peças envolvidas com a operação de lavagem.

No entanto, deve ser considerado que a vazão de produção é ajustada de acordo com as flutuações de consumo, fazendo com que a vazão máxima não seja invariavelmente utilizada. Por outro lado, para o uso de filtros com camadas duplas, que podem ser operadas com velocidades de filtração superiores à taxa de  $350\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ , não há garantia de que a qualidade final seja equivalente à estabelecida nessa pesquisa, além de que o custo de aquisição do antracito é muito elevado.

Assim, o quadro 5.3 foi feito para permitir uma avaliação da camada de areia com diâmetro de 0,75mm, quando submetida à velocidade de filtração de 4,0mm/s, necessária para que a estação atinja sua produção máxima.

Turbidez inicial: 1,50 NTU Turbidez efluente: 0,20 NTU Diâmetro de areia: 0,75mm			
Tempo (s)	Profund. (m)	Perda de carga (m)	Altura total (m)
25920	0,46	0,71	1,17
34560	0,57	1,00	1,57
43200	0,69	1,30	1,99
51840	0,80	1,59	2,39
60480	0,91	1,89	2,80
69120	1,03	2,18	3,21
77760	1,14	2,48	3,62
86400	1,25	2,77	4,02

Quadro 5.3 - Avaliação da altura mínima da camada e da perda de carga, para o diâmetro de 0,75mm, em função do tempo, à velocidade de filtração de 4,0 mm/s.

A figura 5.3, construída a partir dos dados do

quadro 5.3, mostra que é possível a utilização de camada de areia com diâmetro de 0,75mm, para a velocidade de filtração de 4,0mm/s, dentro das limitações da estação de tratamento do Gavião e com a produção de água com a qualidade exigida. Nessa situação, a corrida de filtração máxima será de 64800s, ou 18 horas.

Pode-se, portanto, considerar como uma solução aceitável e de custo reduzido a utilização de camadas de areia nos filtros da estação de tratamento do Gavião.

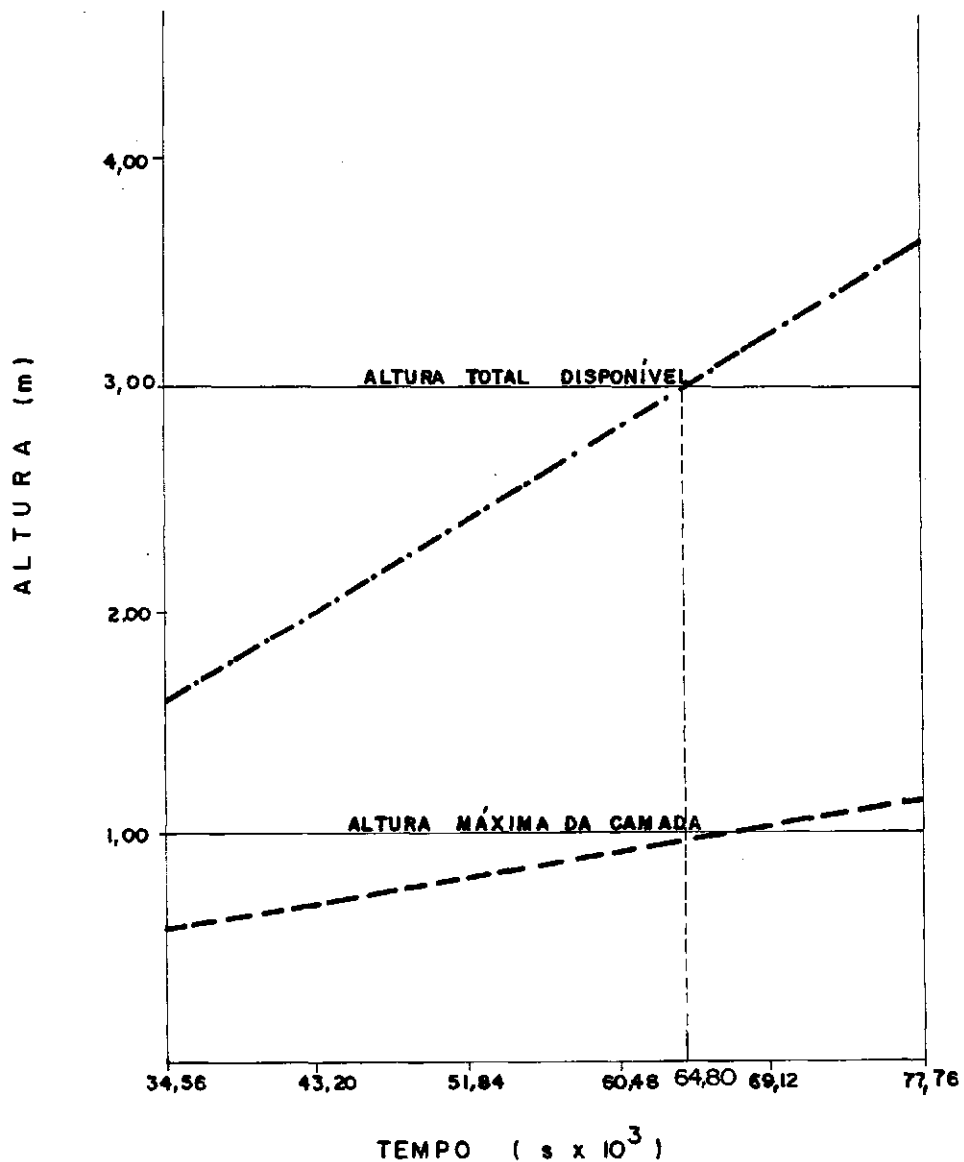
O leito otimizado a ser usado na estação do Gavião depende da vazão necessária. Para manter a taxa estabelecida no projeto original, de  $23\text{lm}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ , e uma corrida de 24 horas, o leito ótimo terá uma altura de 0,78m e diâmetro de 0,60mm, conforme a tabela 5.1. A tabela 5.2 mostra que a produção máxima para corridas de 24 horas é obtida com camadas de areia de 1,00m de altura e diâmetro de 0,75mm. Este leito filtrante poderá ser utilizado para a máxima vazão possível da estação de tratamento, desde que se reduza a corrida de filtração. O quadro 5.4 mostra o desempenho dos filtros com este leito.

A escolha final do leito filtrante, contudo, somente poderá ser feito após a definição da vazão necessária.

Turbidez inicial: 1,50 NTU Turbidez efluente: 0,20 NTU			
Vel. de filtração (mm/s)	Vazão de tratamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Corrida de filtração (horas)	Perda de carga máxima (m)
3,20	3,60	24	1,81
4,00	4,50	18	2,00

Quadro 5.4 - Desempenho dos filtros com camada filtrante de 1,00m de altura e diâmetro de 0,75mm.

TURBIDEZ INICIAL: 1,50 NTU.  
 TURBIDEZ EFLUENTE: 0,20 NTU.  
 DIÂMETRO DA AREIA: 0,75 mm  
 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO: 4,0 mm / s.



----- ALTURA DA CAMADA FILTRANTE.

-.-.-.-.- ALTURA TOTAL NECESSÁRIA.

FIG. 5.3 - EVOLUÇÃO DAS ALTURAS DA CAMADA FILTRANTE E DA ALTURA TOTAL NECESSÁRIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE FILTRAÇÃO, A VELOCIDADE DE 4,0 mm/s

A otimização da estação do Gavião discutida acima se simplifica porque a estação já está em operação e duas variáveis do processo de filtração já estão fixas: a camada máxima do leito de areia e a perda de carga máxima. Para a otimização de um novo sistema de tratamento não haveria estas limitações: em princípio poder-se-ia escolher qualquer valores destas variáveis. Desse modo, para a otimização do novo sistema analisá-se-ia para uma determinada produção necessária quais seriam os valores das variáveis principais: perda de carga, altura do leito e taxa de filtração (que determinaria a área do filtro), de tal modo que manter-se-ia uma qualidade mínima desejada para custos mínimos. É óbvio que tal análise é muito mais complexa porque tem que se dar peso econômico a (1) custo do leito em função da altura, do diâmetro e da área; (2) custo da perda de carga; e (3) custo de um eventual desvio da corrida de filtração de 24h. Entretanto, tendo se meios para avaliar estes custos, então o modelo acima explicitado para o Gavião pode ser utilizado para a otimização de qualquer unidade de filtração em ETAS.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

A metodologia aplicada nesse trabalho mostrou-se adequada para dar cumprimento ao objetivo da pesquisa. Os resultados obtidos permitem inferir as seguintes conclusões:

1. A equação de remoção de turbidez demonstrou precisão para determinar a profundidade em que a turbidez remanescente atingia o valor estabelecido como limite. Nesse trabalho, e para o caso da água estudada, a remoção máxima ocorria quando a turbidez atingia o valor de 0,20 NTU.
2. Para águas de baixa turbidez a remoção máxima ocorre com pequena altura do leito filtrante, fazendo com que a variação na altura da camada filtrante necessária para obter-se a remoção máxima, em função de modificações na granulometria da areia, não seja muito grande. Nesses casos, o fator preponderante na especificação de um leito filtrante é a evolução da perda de carga, em função do tempo e da taxa de filtração usada, que incidirá enormemente sobre os custos de construção dos filtros, já que a perda de carga atingida ao fim da corrida de filtração determinará a altura da coluna de água sobre a superfície da camada filtrante.
3. A equação da perda de carga mostrou-se de grande precisão, quando comparados os seus resultados com os valores experimentais. Em pequenas profundidades ocorre uma pequena discordância entre os valores teóricos e experimentais, devido à natureza do processo de filtração observado, que se dava muito superficialmente. As imprecisões verificadas podem ser atribuídas à inconstância da turbidez da água

afluente e às variações de temperatura, já que pequenas variações nesses dados, ocasionam modificações significativas nos resultados calculados pela equação.

4. As equações determinadas pela pesquisa são facilmente aplicáveis. Mesmo a equação da perda de carga, em pouco complicada, tem sua utilização simplificada pelo uso de calculadoras programáveis, facilitando o seu uso em muitas situações que se apresentam na prática.

5. A metodologia criada para possibilitar uma análise matemática da filtração pode ser utilizada no projeto e construção de uma estação de tratamento de água, para permitir a otimização da escolha do material filtrante. O tempo necessário para conclusão de um estudo semelhante é inferior ao tempo consumido com o projeto e a construção da planta de tratamento.

A conclusão final deste trabalho é que a análise matemática de dados experimentais da filtração rápida de água para abastecimento se constitui numa ferramenta valiosa para a escolha racional do material filtrante e das condições operacionais da filtração, visando a minimização de custos de produção para uma determinada qualidade de água desejada.

## CAPÍTULO VII

### SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se a seguir alguns pontos para pesquisas que possam ampliar a aplicabilidade prática do trabalho:

1. Verificação da influência da estratificação de leitos filtrantes não uniformes sobre o diâmetro uniforme considerado na teoria matemática da filtração;
2. Desenvolvimento de uma análise matemática aplicável em camadas filtrantes múltiplas, utilizando os mesmos parâmetros dessa pesquisa;
3. Estudo econômico comparativo entre diversas camadas filtrantes, que tenham sido especificadas através de análise matemática semelhante a desse trabalho, levando-se em consideração também os custos necessários para construção dos filtros, inclusive com o sistema de lavagem.
4. Estabelecimento de correlações entre as constantes experimentais do modelo e as características da água bruta.

## ANEXO I

Apresentação de Quadros e Gráficos Comparativos entre Dados Experimentais e Valores Teóricos.



## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA-CE

FILTRO Nº 01 AREIA: 0,50mm TESTE Nº 6 TAXA DE FILTRAÇÃO: 5,30 mm/s. DATA: 26 / 07 / 88 VOLUME FILTRADO: 1438,5 Litros  
 DURAÇÃO: 294 min.  $I_0 = 0,96$

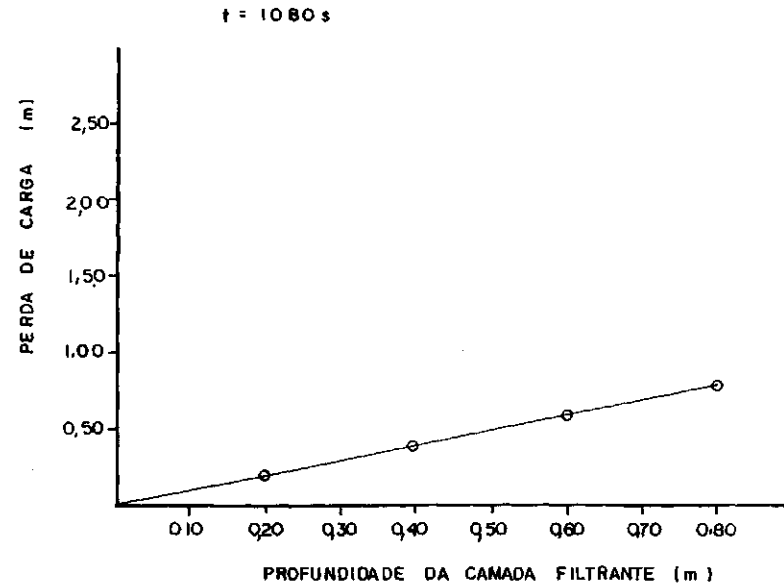
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										(E) 20 (T)		(E) 40 (T)		(E) 60 (T)		(E) 80 (T)	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
8:12	6080	29	1,40	0,54	-	0,41	-	0,30	-	0,31	-	0,30	-	0,20	0,22	0,40	0,41	0,60	0,60	0,80	0,80
10:00	7560	29	1,40	0,46	0,95	0,20	-	0,20	-	0,21	-	0,20	-	0,54	0,91	0,77	1,00	0,98	1,19	1,18	1,38
11:54	14400	30	1,40	0,79	1,39	0,61	1,04	0,20	-	0,20	-	0,20	-	1,15	1,57	1,59	1,84	1,88	2,04	2,17	2,23

OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

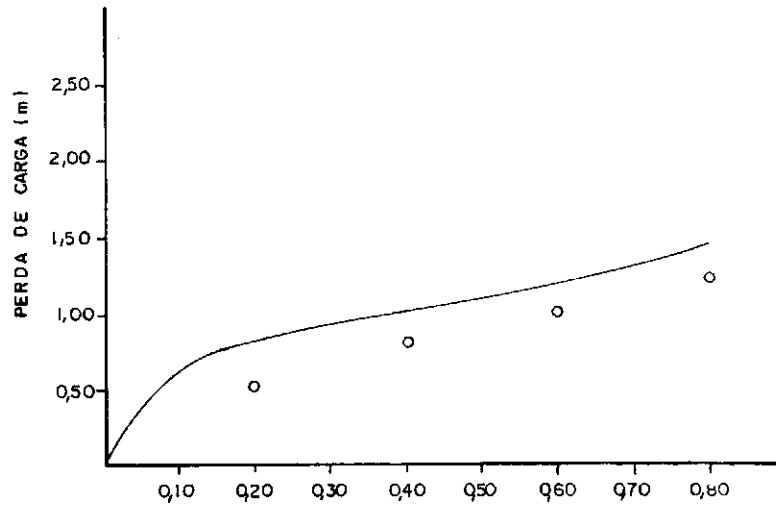
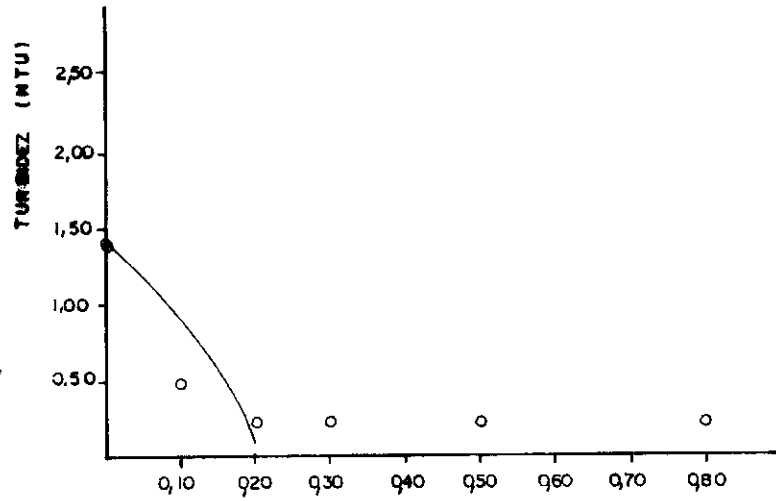
### LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

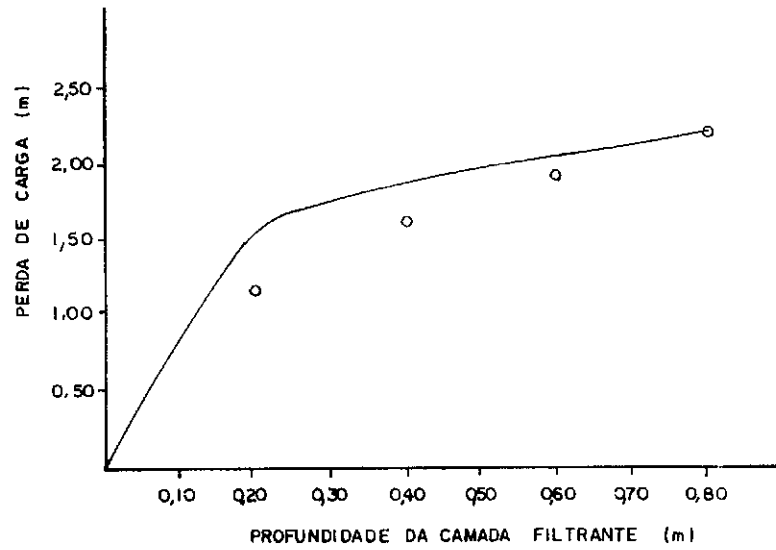
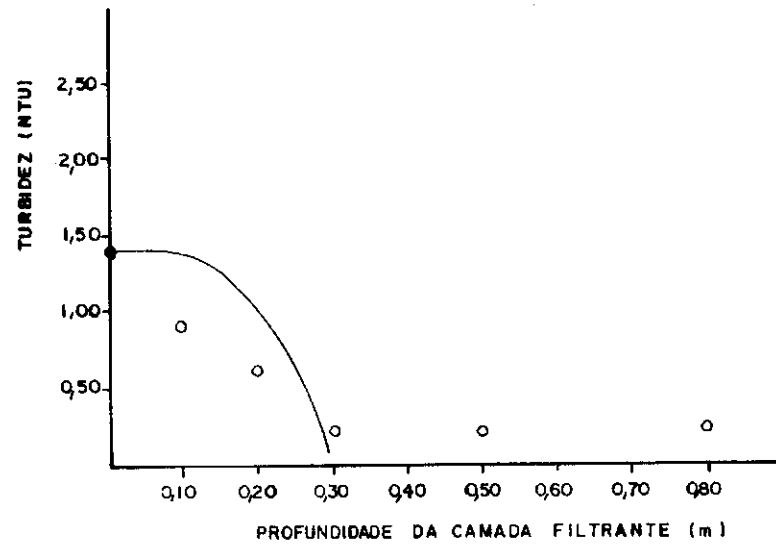
— - CURVA TEÓRICA



t = 7560 s



t = 1440 s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO BARRIO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 02 AREIA: 0,59 TESTENº: 6 TAXA DE FILTRAÇÃO: 3,45 mm/s. DATA 26 / 07 / 88 VOLUME FILTRADO: 1313,5 litros.  
 DURAÇÃO: 412 min.  $I_0 = 0,45$

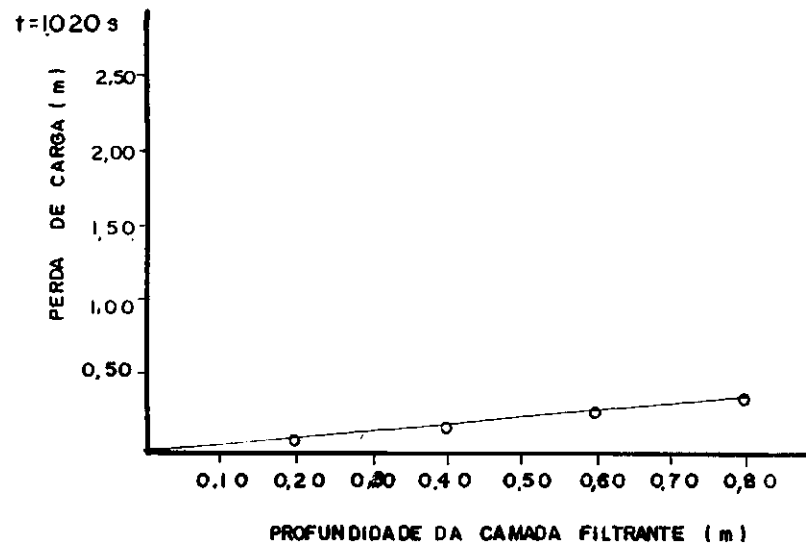
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO	TEMPERATURA DA ÁGUA	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)												
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										(E) 20 (T)				(E) 40 (T)				(E) 60 (T)			
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 40 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 70 (T)	(E) 80 (T)	(E) 90 (T)	(E) 100 (T)	(E) 110 (T)	(E) 120 (T)	(E) 130 (T)	(E) 140 (T)	(E) 150 (T)	(E) 160 (T)	(E) 170 (T)	(E) 180 (T)				
8:13	1020	29	1,40	0,84	—	0,38	—	0,35	—	0,25	—	0,22	—	0,08	0,10	0,17	0,19	0,25	0,28	0,35	0,37				
10:01	7500	29	1,40	0,62	0,41	0,22	—	0,22	—	0,21	—	0,22	—	0,18	0,23	0,25	0,32	0,32	0,41	0,48	0,50				
11:55	14340	30	1,40	1,10	1,23	0,25	—	0,23	—	0,22	—	0,21	—	0,45	0,46	0,55	0,56	0,66	0,14	0,75	0,79				
13:50	21240	30	1,30	1,10	1,28	0,45	0,70	0,20	—	0,21	—	0,19	—	0,70	0,64	0,83	0,75	0,93	0,84	1,02	0,93				

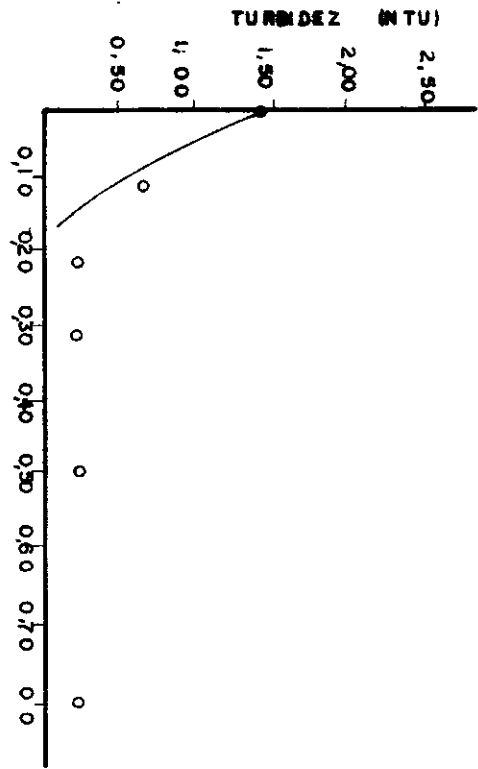
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

#### LEGENDA

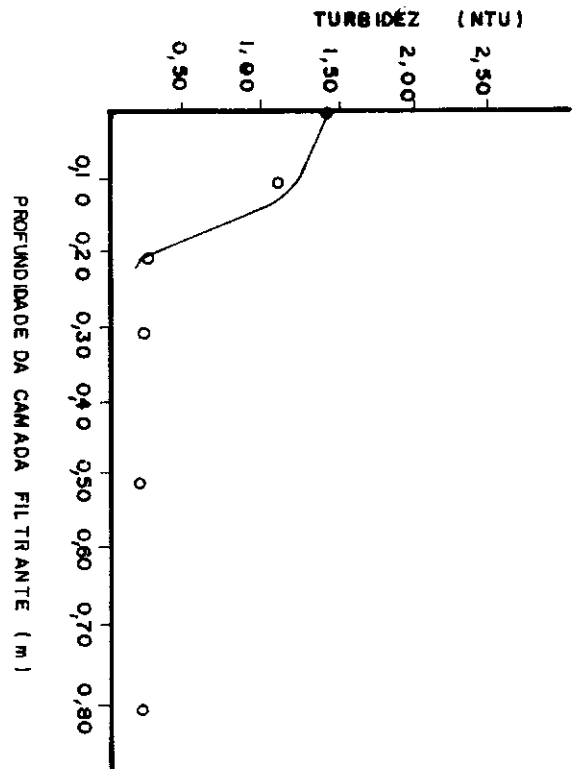
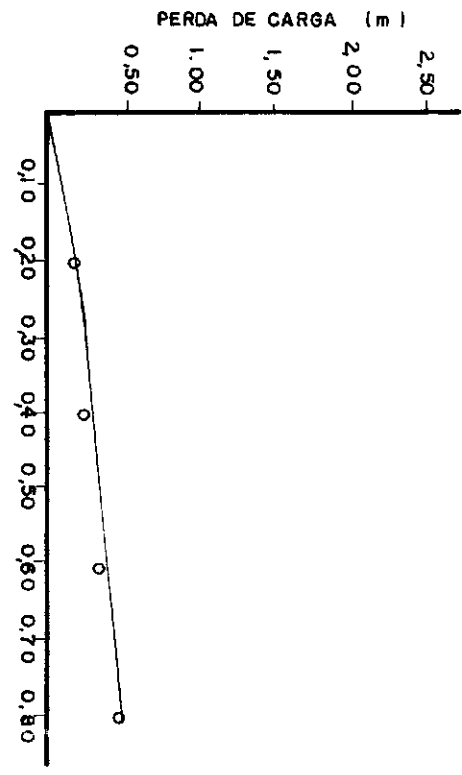
○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

— CURVA TEÓRICA

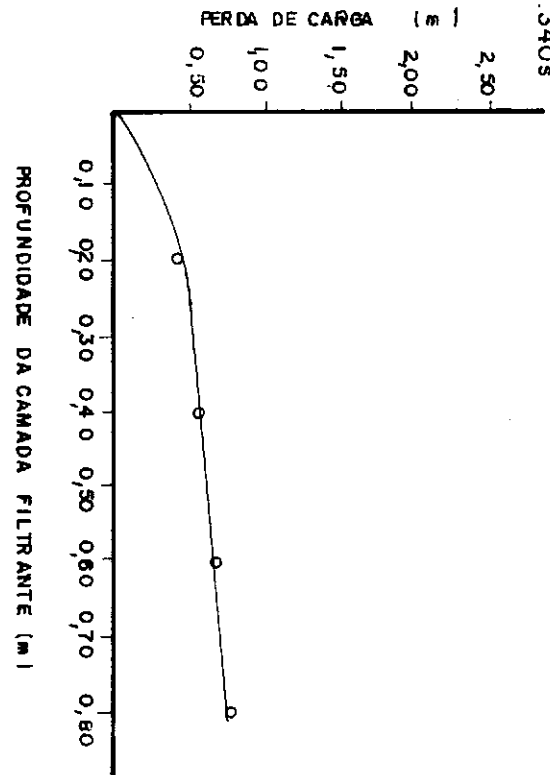




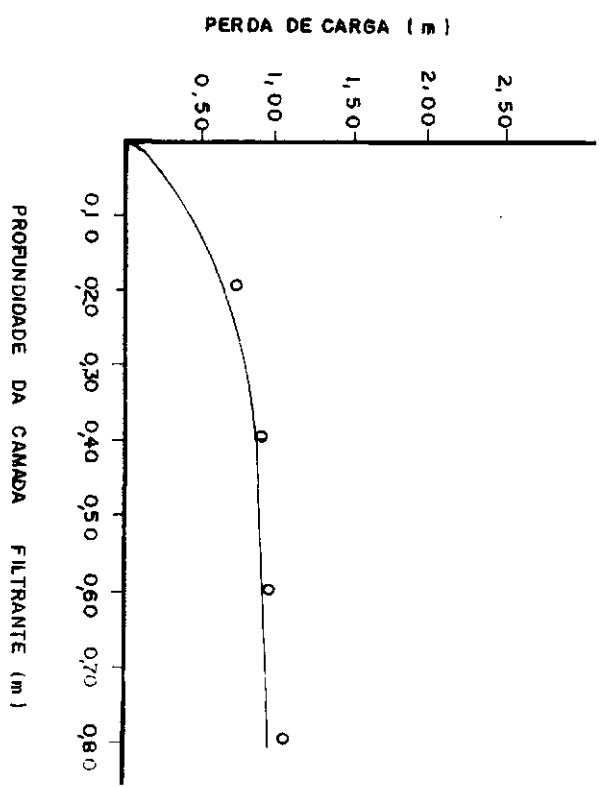
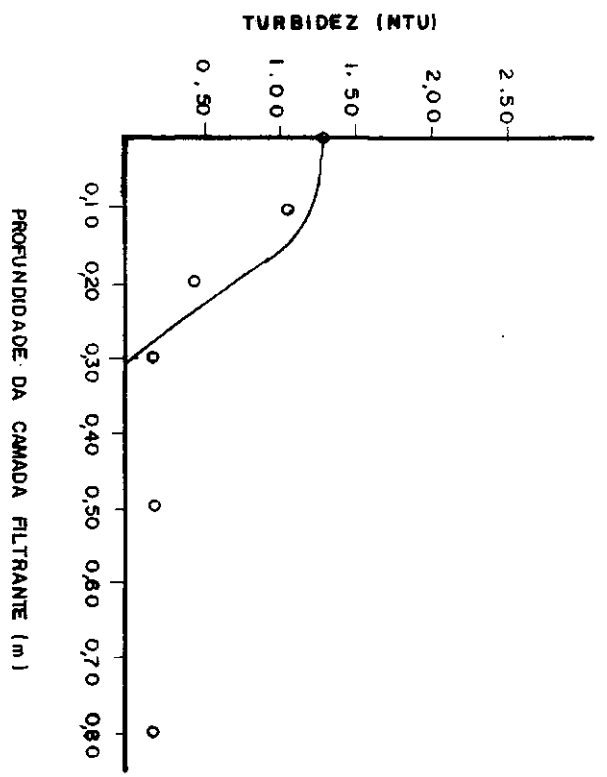
t = 7500 s



t = 14.340 s



t = 21.240 s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 03 AREIA: 0,69 TESTE Nº: 6 TAXA DE FILTRAÇÃO: 4,93 mm/s DATA 26 /03 /88 VOLUME FILTRADO: 1650 Litros  
 DURAÇÃO 362 min.  $I_0 = 0,48$

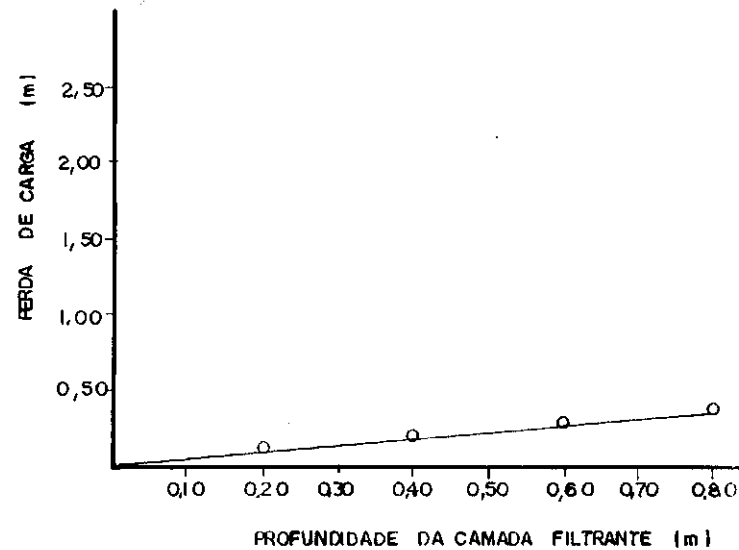
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										PROFUNDIDADE EM cm)							
				(E)10 (T)	(E)20 (T)	(E)30 (T)	(E)50 (T)	(E)80 (T)	(E)120 (T)	(E)140 (T)	(E)160 (T)	(E)180 (T)	(E)20 (T)	(E)40 (T)	(E)60 (T)	(E)80 (T)					
8:14	960	29,0	1,40	0,56	0,32	0,48	-	0,42	-	0,34	-	0,32	-	0,12	0,10	0,22	0,20	0,31	0,29	0,40	0,38
10:03	7500	29	1,40	1,10	0,84	0,45	0,27	0,21	-	0,22	-	0,21	-	0,24	0,24	0,30	0,34	0,40	0,43	0,50	0,53
11:56	14.280	30	1,40	0,98	1,25	0,54	0,79	0,40	0,27	0,20	-	0,20	-	0,47	0,48	0,61	0,62	0,69	0,71	0,79	0,81
13:51	21.180	30	1,40	1,10	1,37	0,74	1,24	0,59	0,80	0,20	-	0,17	-	0,77	0,68	0,92	0,94	1,12	1,05	1,22	1,14

OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA E MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS

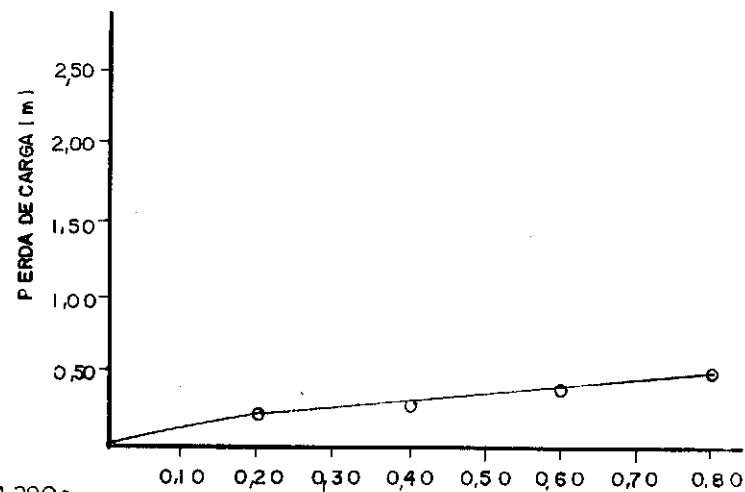
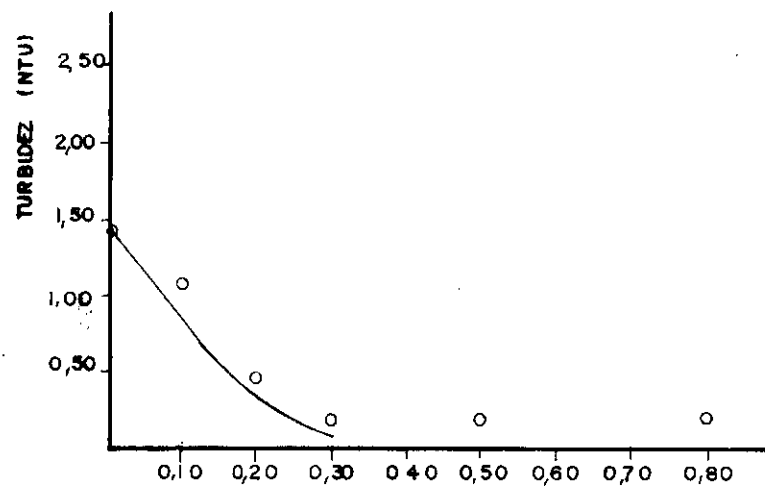
#### LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

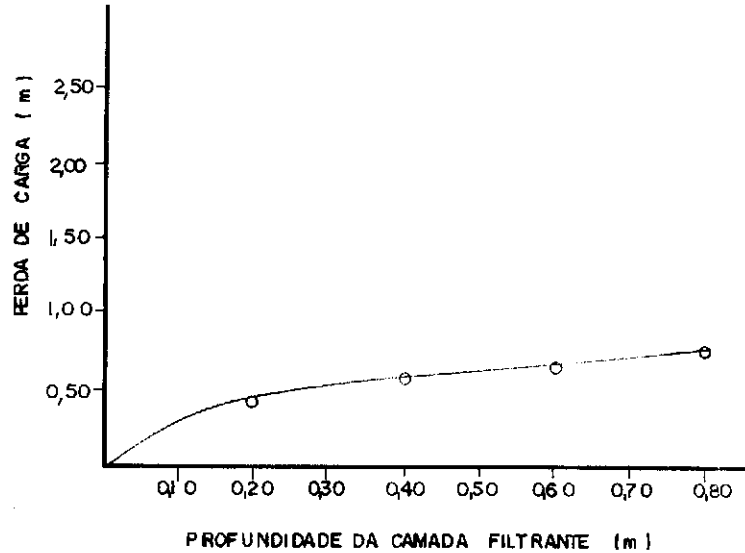
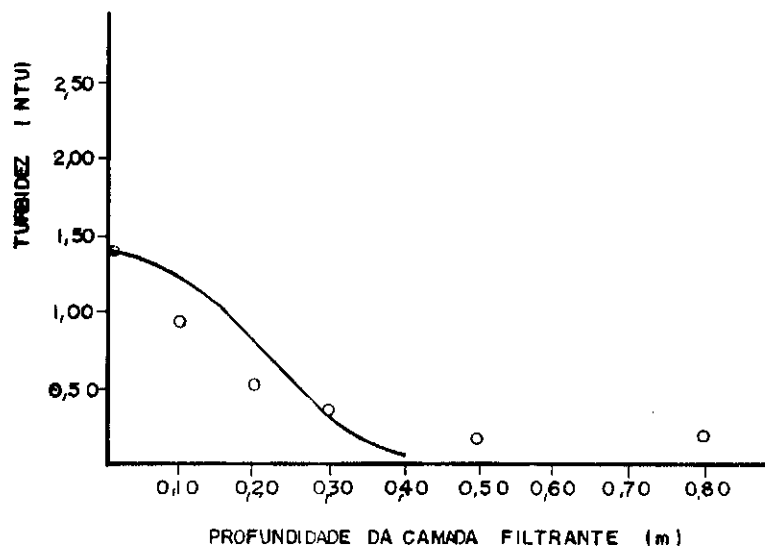
— - CURVA TEÓRICA



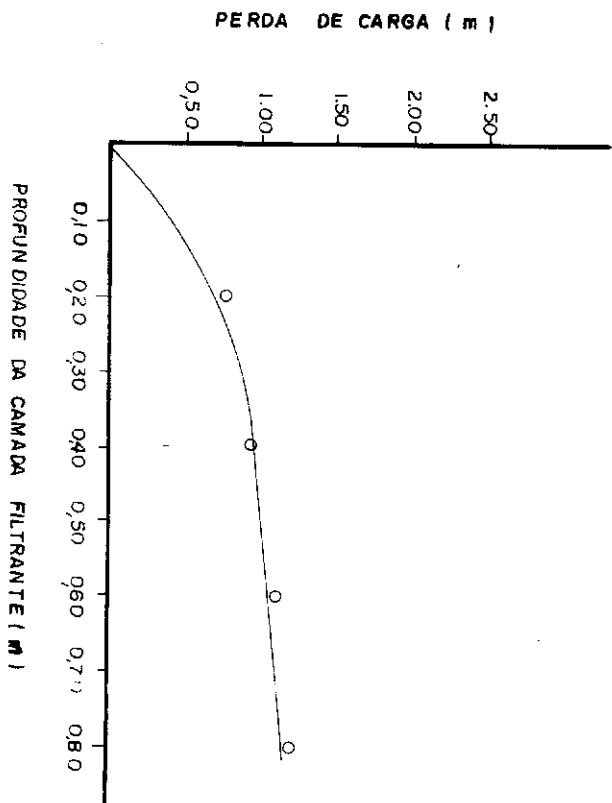
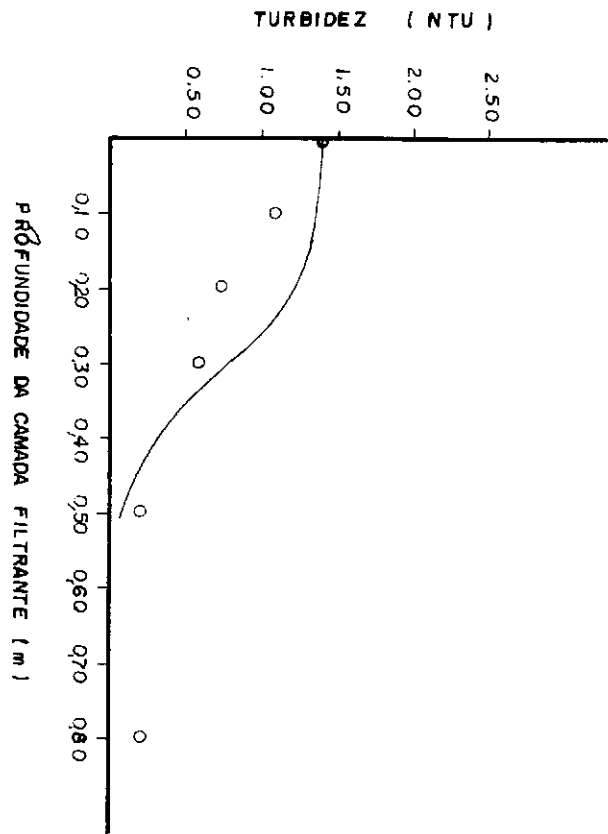
t = 7.500s



t = 14.280s



t = 21.180s





## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

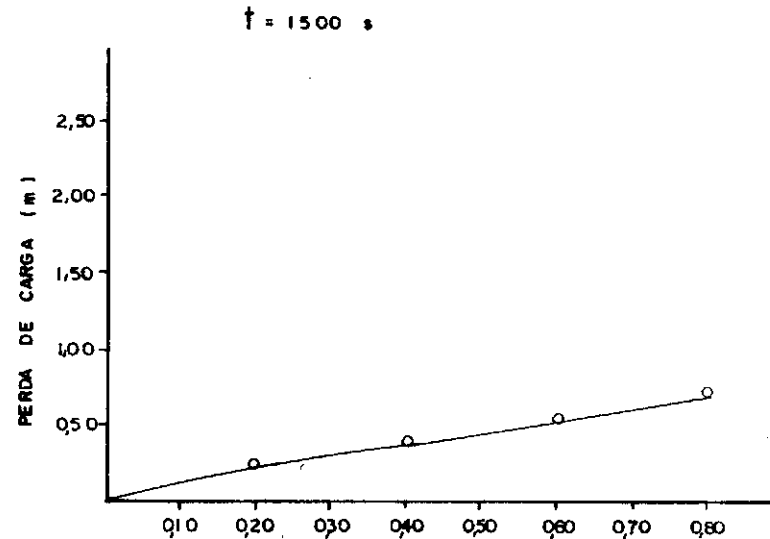
FILTRO Nº 01. ARBA: 0,50 mm. TESTE Nº 7. TAXA DE FILTRAÇÃO: 420 mm/s. DATA: 29 / 07 / 88. VOLUME FILTRADO: 979,5 Litros  
 DURAÇÃO: 252 min.  $I_0 = 0,76$

HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			APLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm.)																	
				(E) 00 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 40 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 70 (T)	(E) 80 (T)	(E) 90 (T)	(E) 100 (T)	(E) 00 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)	(E) 100 (T)		
8:28	1500	29	2,50	1,00	-	0,69	-	0,49	-	0,46	-	0,43	-	0,25	0,23	0,42	0,38	0,57	0,53	0,72	0,68
10:17	8100	29	2,50	1,70	2,46	0,79	0,63	0,22	-	0,20	-	0,21	-	0,68	1,07	1,05	1,23	1,37	1,38	1,66	1,53
12:06	14580	30	2,30	1,60	2,30	1,30	2,29	0,78	1,06	0,20	-	0,20	-	1,34	1,39	1,77	1,96	2,08	2,11	2,35	2,26

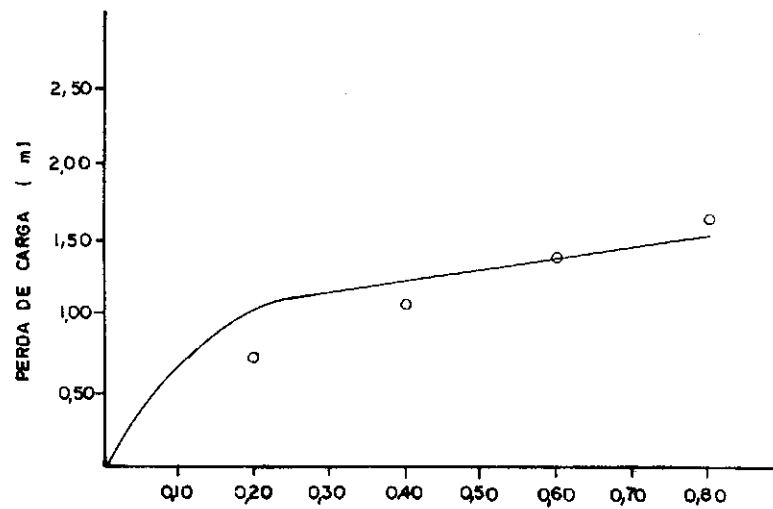
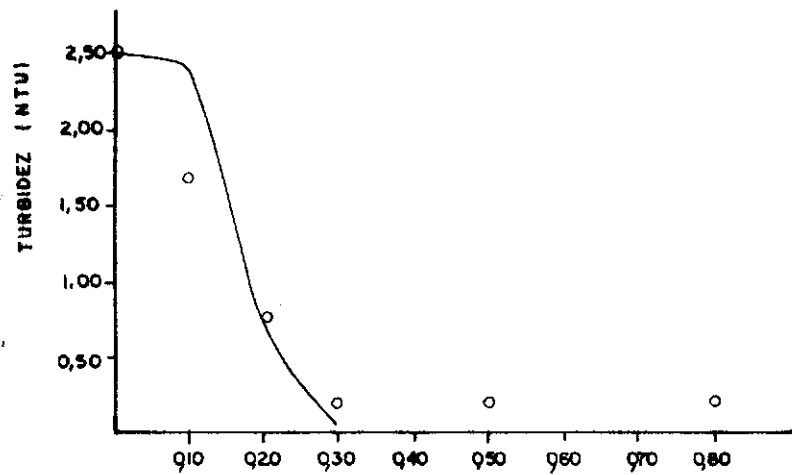
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS

### LEGENDA

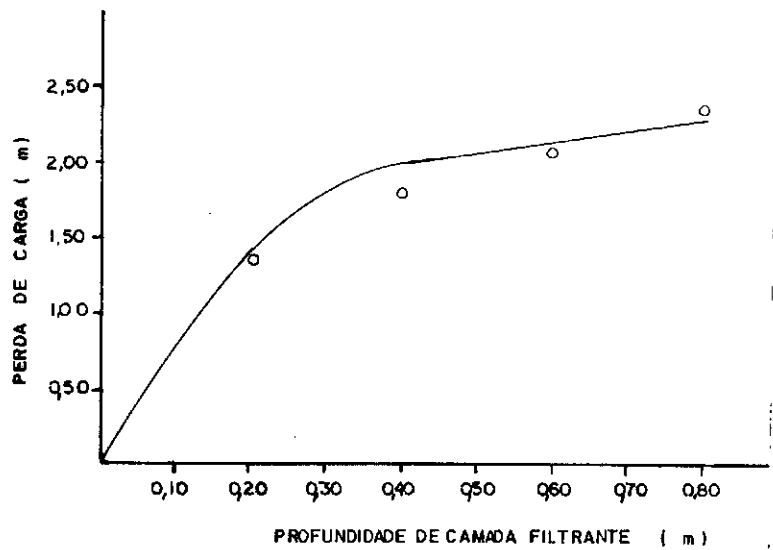
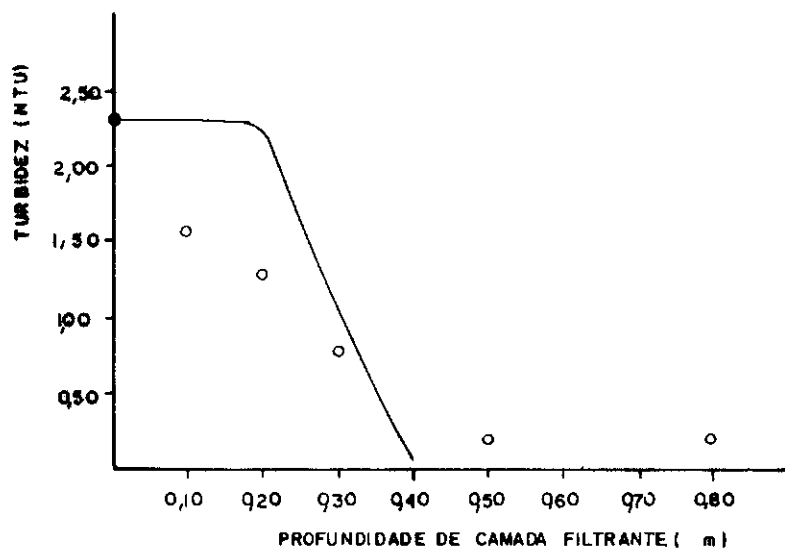
- - DADOS EXPERIMENTAIS
- - CURVA TEÓRICA



t = 8100s



t = 14580 s



## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

FILTRO Nº 01. AREIA: 0,50 mm. TESTE Nº 8. TAXA DE FILTRAÇÃO: 5,15 mm/s. DATA: 03/08/89. VOLUME FILTRADO: 1595,0 Litros.  
 DURAÇÃO: 335 min.  $I_0 = 0,95$ .

HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)																	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 80 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
7:42	360	28	1,50	0,58	-	0,36	-	0,30	-	0,30	-	0,25	-	0,21	0,20	0,38	0,39	0,55	0,58	0,73	0,77
9:26	660	29	1,50	0,80	0,87	0,20	-	0,20	-	0,22	-	0,21	-	0,73	0,74	0,93	0,93	1,11	1,12	1,28	1,31
11:27	1380	30	1,50	1,20	1,49	1,00	1,13	0,20	-	0,22	-	0,20	-	1,40	1,57	1,73	1,84	1,89	2,03	2,14	2,22
12:57	1920	30	1,40	1,20	1,40	0,90	1,37	0,45	0,59	0,20	-	0,21	-	1,60	1,73	1,98	2,37	2,22	2,55	2,50	2,75

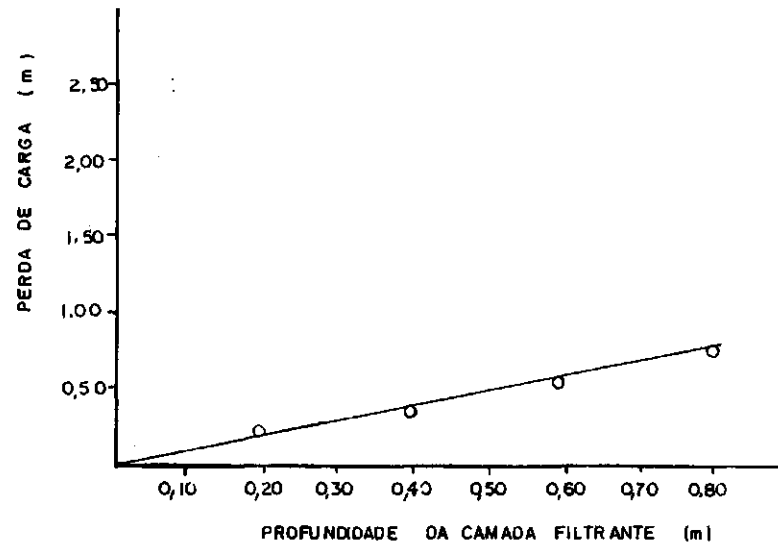
$t = 360 \text{ s}$

OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

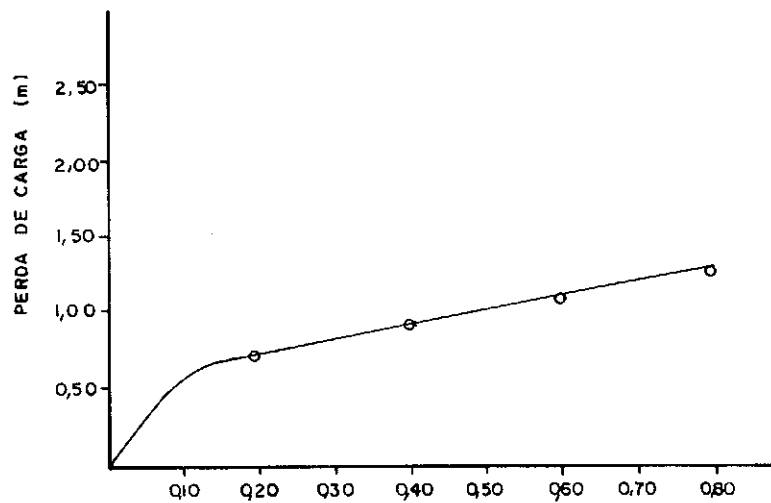
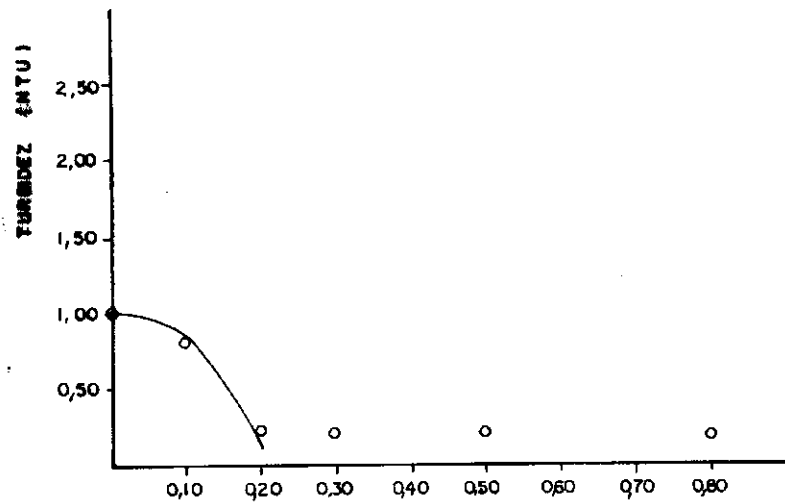
### LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

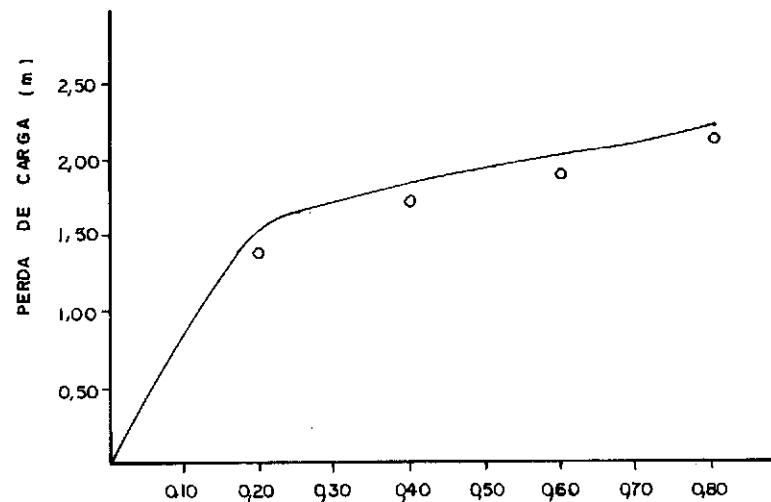
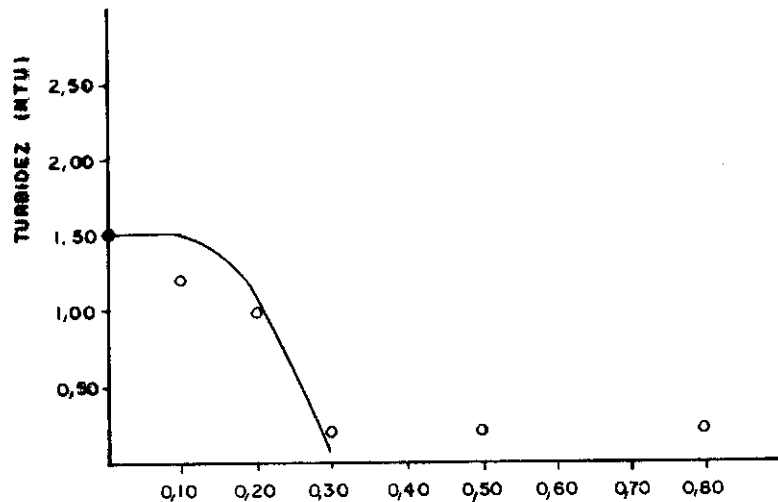
— - CURVA TEÓRICA



t = 6600 s



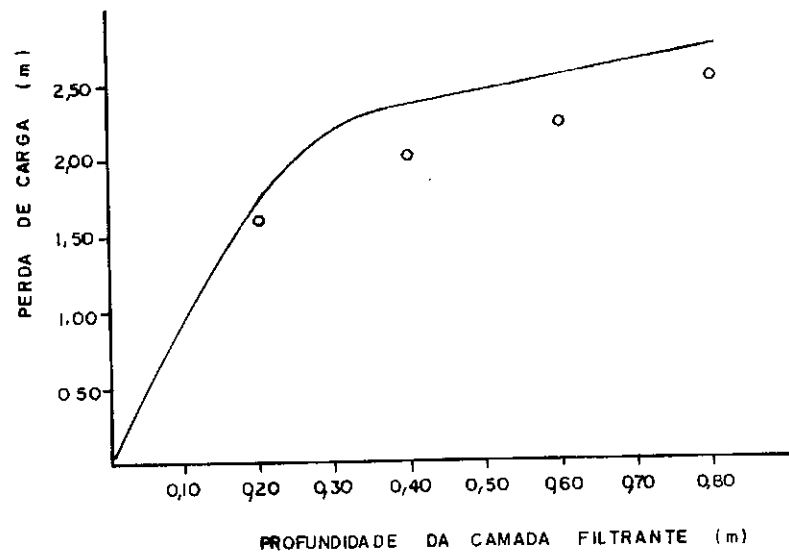
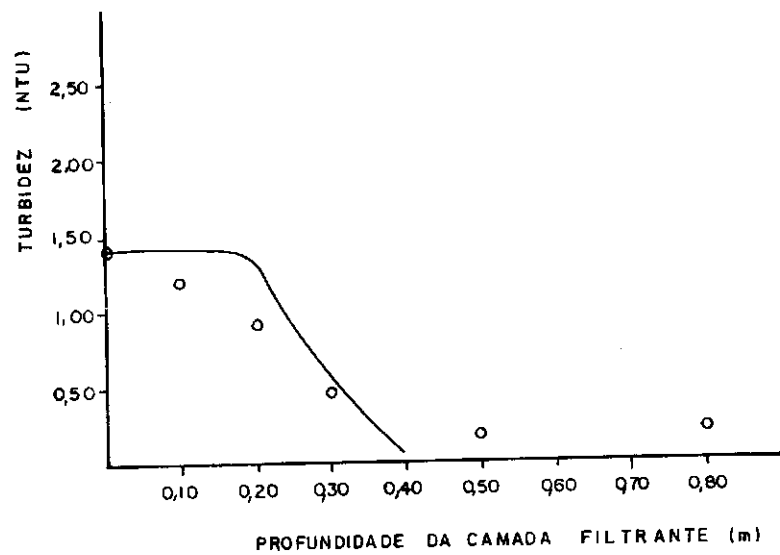
t = 13860 s



PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)

PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)

t = 19260



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 02 AREIA: 0,59 TESTE Nº: 8 TAXA DE FILTRAÇÃO: 4,06 mm/s. DATA 03 / 08 / 88 VOLUME FILTRADO: 12570 litros.  
 DURAÇÃO: 335 min.  $I_0 =$  0,52

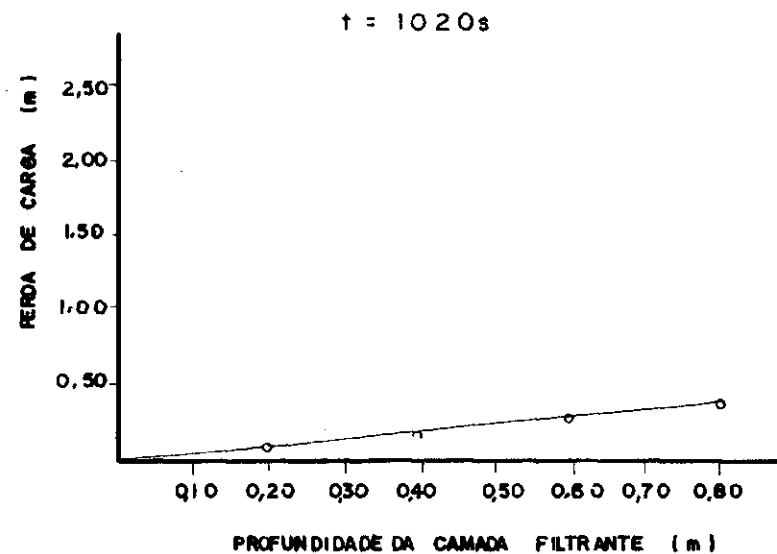
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM Cm)																	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
8:13	1020	28	1,50	0,52	-	0,41	-	0,36	-	0,33	-	0,29	-	0,10	0,11	0,20	0,22	0,30	0,32	0,40	0,42
10:01	7500	29	1,50	0,47	0,73	0,22	-	0,21	-	0,20	-	0,21	-	0,28	0,32	0,38	0,42	0,48	0,52	0,58	0,62
11:55	14.340	30	1,50	0,52	1,43	0,34	0,58	0,20	-	0,21	-	0,20	-	0,61	0,65	0,72	0,76	0,85	0,87	0,95	0,97
13:50	21.240	30	1,40	1,10	1,39	0,65	1,23	0,29	0,27	0,21	-	0,20	-	0,61	0,64	0,92	1,05	1,02	1,15	1,12	1,25

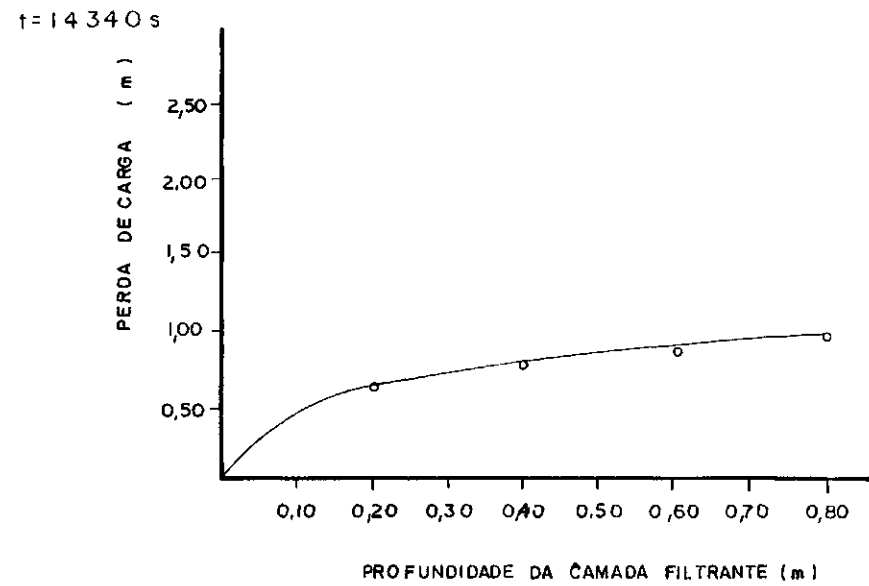
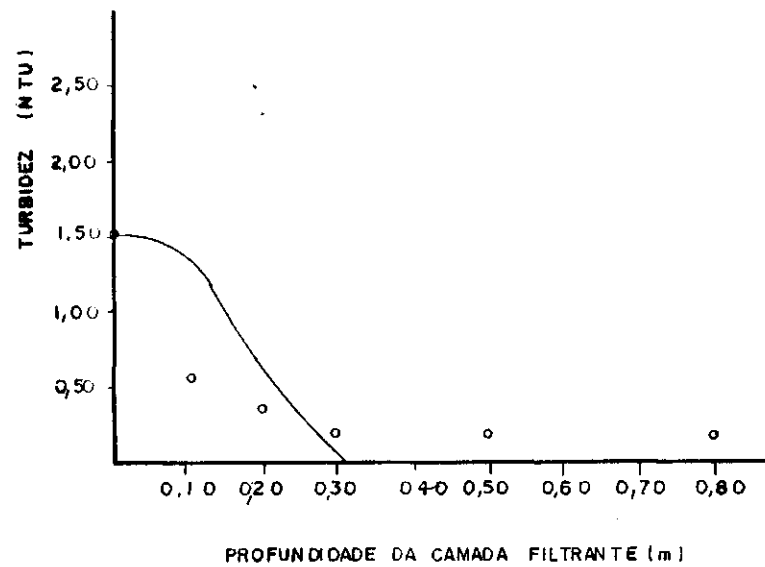
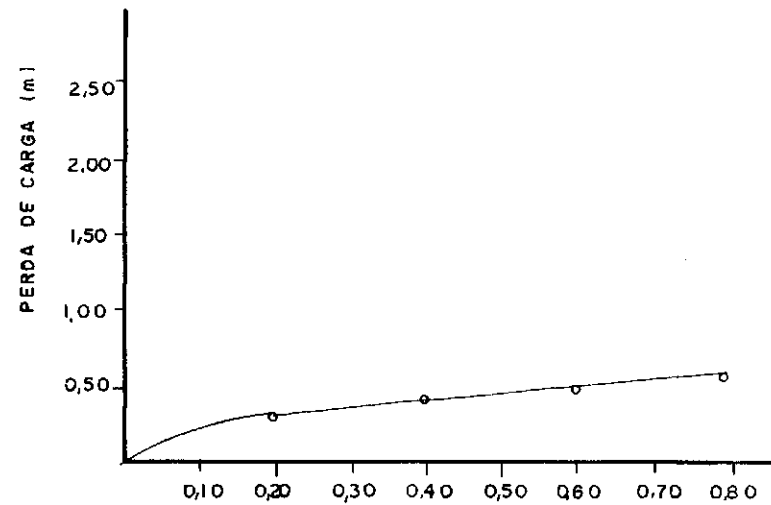
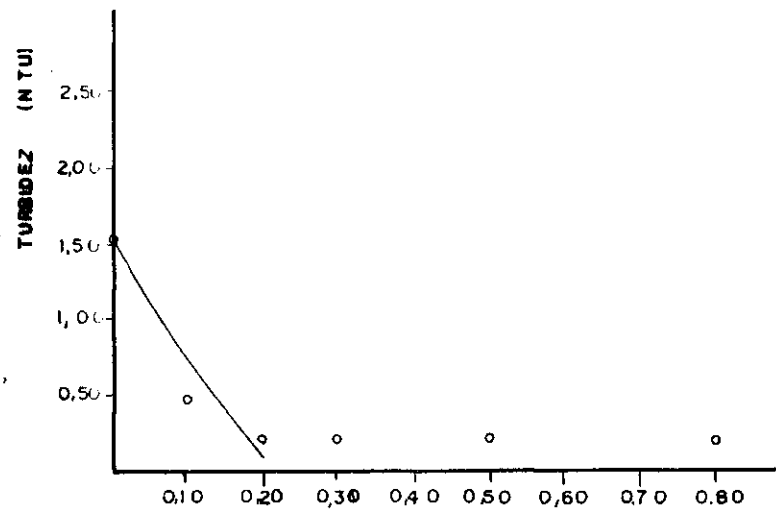
OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

#### LEGENDA

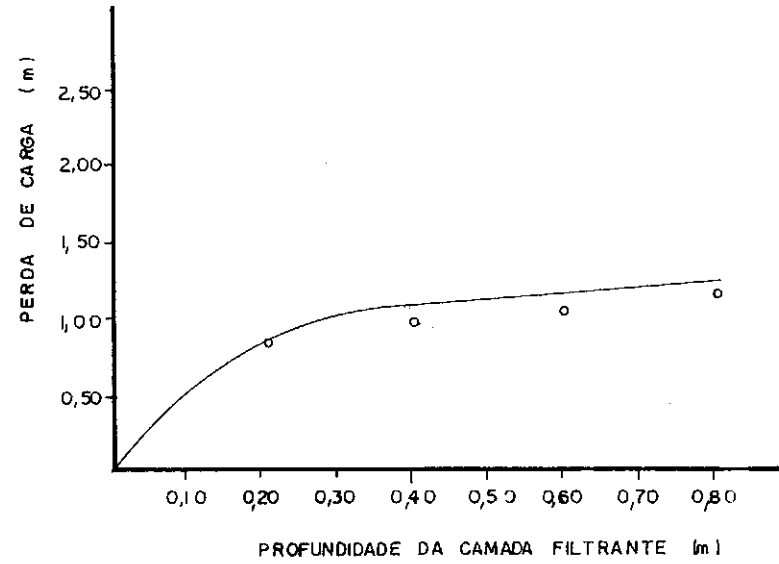
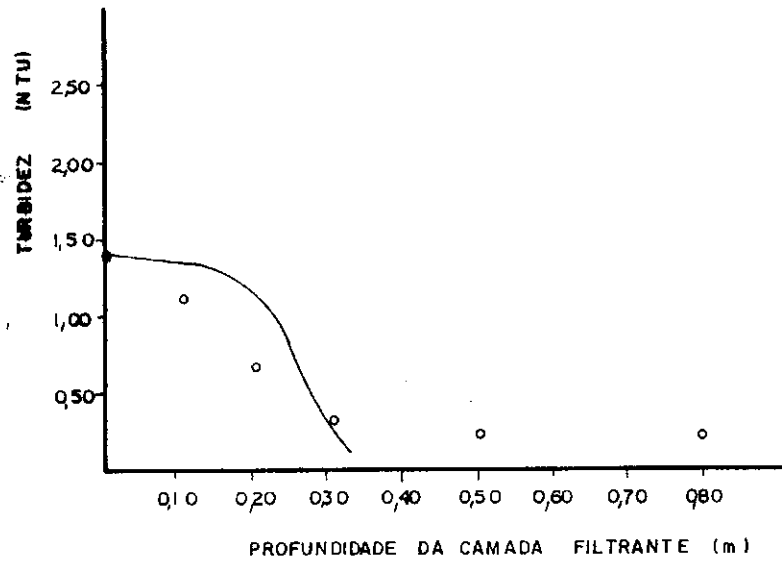
○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

— CURVA TEÓRICA.





t = 21.240 s





## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

FILTRO Nº: 03

AREIA: 0,69

TESTE Nº: 8

TAXA DE FILTRAÇÃO: 6,53 mm/s

DATA 03/02/88

VOLUME FILTRADO: 1659 litros

DURAÇÃO: 275 min.

$I_0 = 0,63$

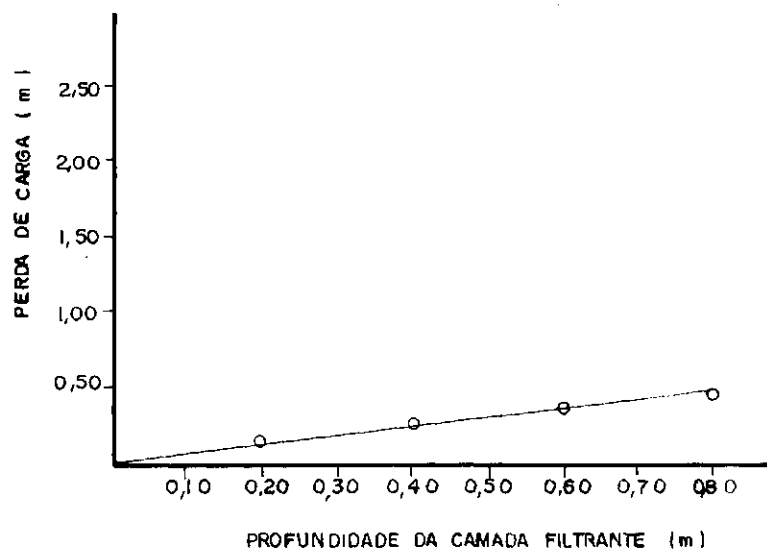
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										(E) 20 (T)		(E) 40 (T)		(E) 60 (T)		(E) 80 (T)	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 40 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 70 (T)	(E) 80 (T)	(E) 90 (T)	(E) 100 (T)	(E) 120 (T)	(E) 140 (T)	(E) 160 (T)	(E) 180 (T)	(E) 200 (T)			
7:44	360	28	1,50	0,58	0,49	0,44	-	0,44	-	0,34	-	0,30	-	0,16	0,13	0,24	0,20	0,38	0,39	0,49	0,51
9:29	6660	29	1,50	0,95	1,05	0,58	0,50	0,31	0,20	0,21	-	0,22	-	0,42	0,35	0,53	0,50	0,64	0,63	0,74	0,75
11:29	13.860	30	1,50	1,30	1,41	1,25	1,17	0,72	0,73	0,28	-	0,20	-	0,90	0,76	1,01	1,05	1,15	1,19	1,27	1,37
13:00	21.060	30	1,40	1,20	1,38	0,88	1,32	0,74	1,14	0,41	0,37	0,21	-	1,23	0,95	1,50	1,52	1,67	1,72	1,80	1,85

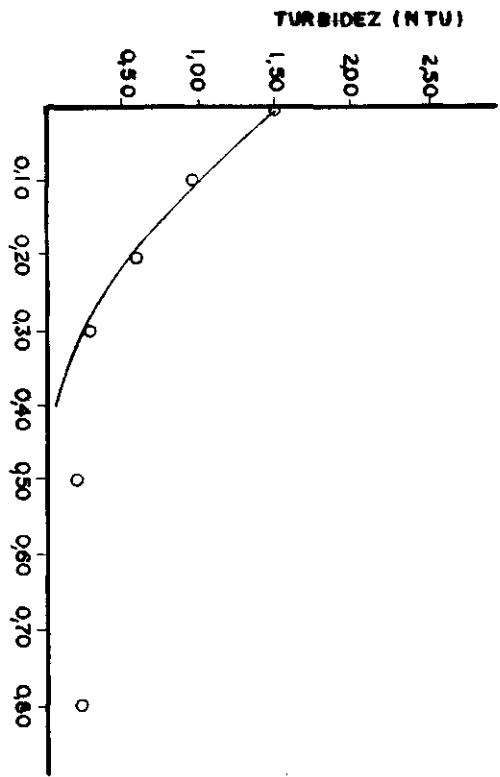
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

### LEGENDA

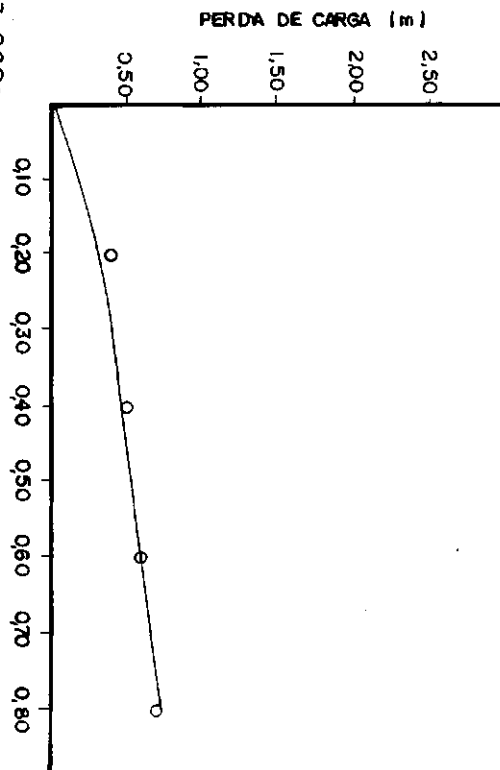
○ - DADOS EXPERIMENTAIS

— - CURVA TEÓRICA

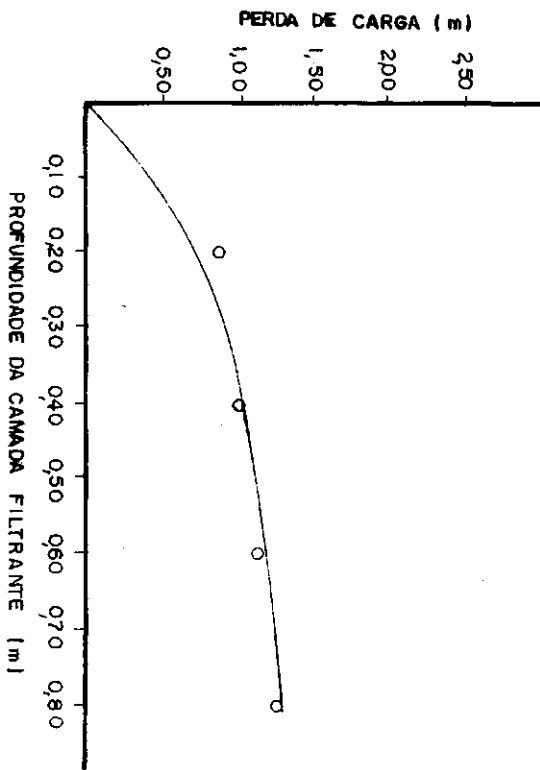
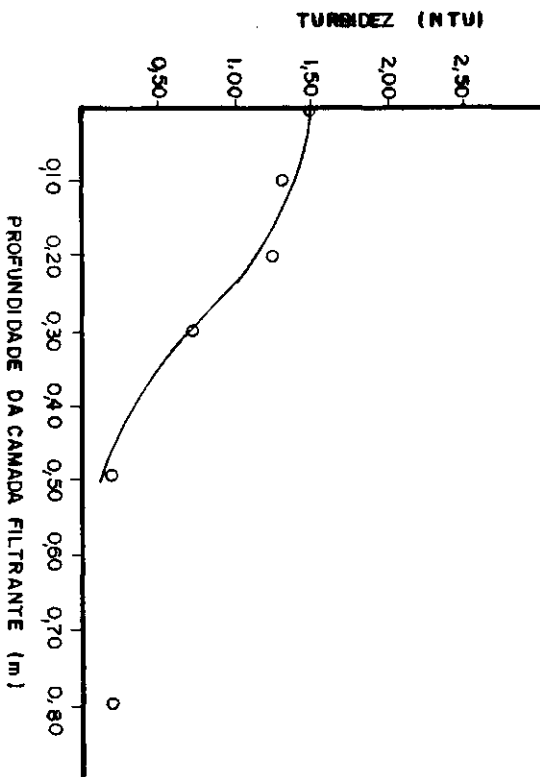


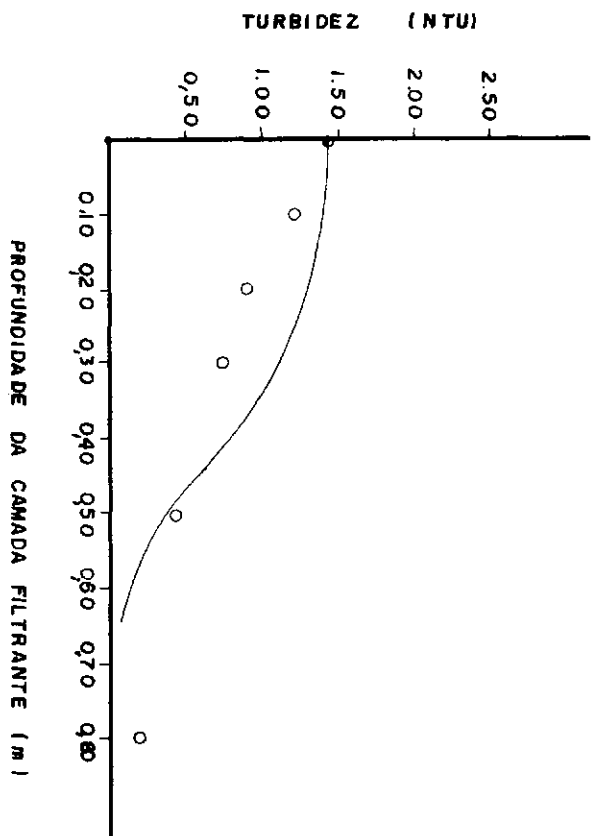


t = 6660 s

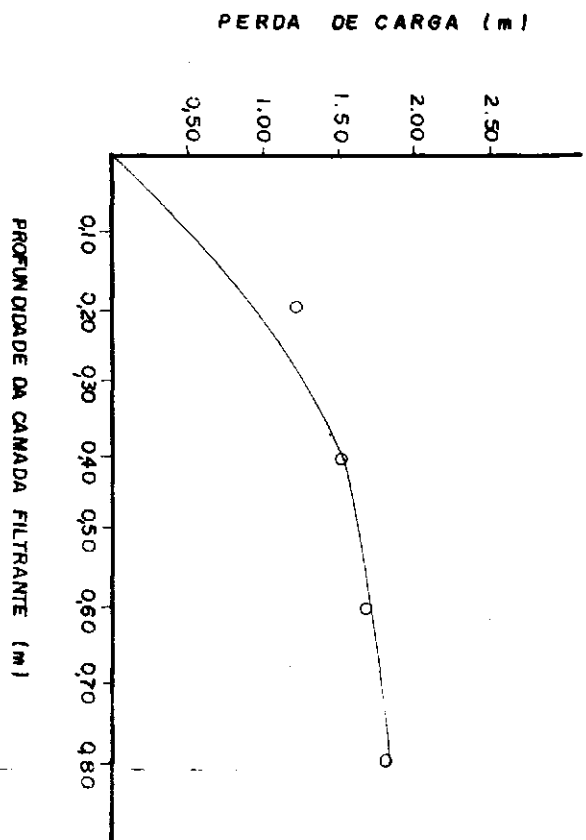


t = 13.860 s





t = 21.060 s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA, CE  
 FILTRO Nº: 02 AREIA: 0,59 (mm) TESTE Nº: 9 TAXA DE FILTRAÇÃO: 4,35 m m/s DATA 15 / 08 / 89 VOLUME FILTRADO: 1952,0 litros  
 DURAÇÃO: 486 min.  $L_0 = 0,56$

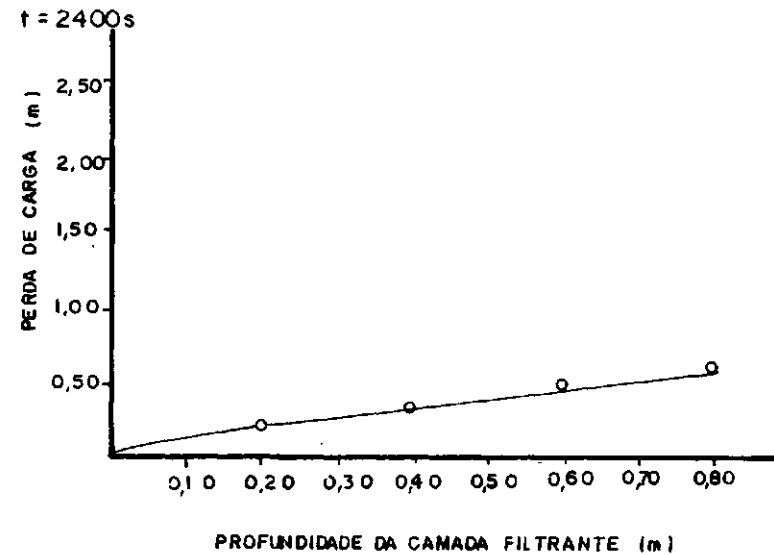
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)								PERDA DE CARGA (m)										
			AFLUENTE	EFLUENTE PROFUNDIDADE EM (cm)								(PROFUNDIDADE EM cm)									
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
8:40	2400	29	2,10	0,84	-	0,38	-	0,35	-	0,25	-	0,20	-	0,18	0,18	0,29	0,29	0,44	0,41	0,55	0,52
11:36	12960	30	1,90	1,50	1,87	0,59	1,35	0,22	0,20	0,20	-	0,21	-	0,90	0,84	1,06	1,00	1,18	1,11	1,30	1,23
14:28	23280	30	1,90	1,60	1,90	0,76	1,90	0,54	1,84	0,21	-	0,17	-	1,41	0,98	1,78	1,76	1,93	1,91	2,08	2,02
15:54	28440	30	1,60	1,40	1,60	0,83	1,60	0,57	1,57	0,19	-	0,20	-	1,52	0,98	1,84	1,80	2,00	1,96	2,13	2,07

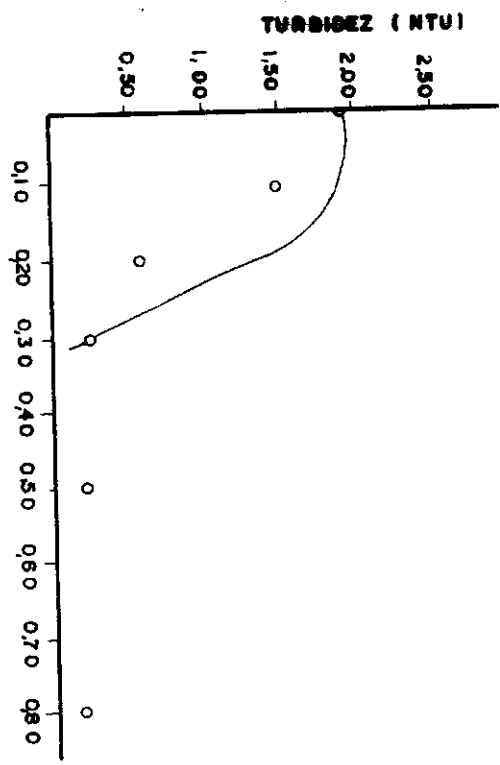
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

#### L E G E N D A

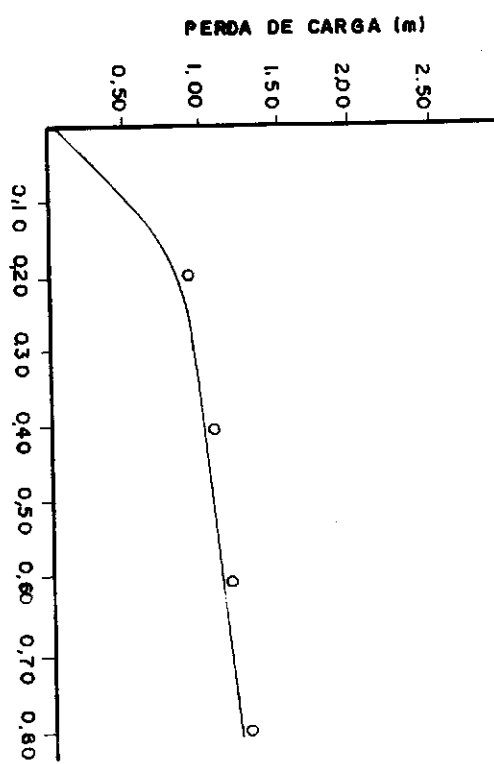
○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

— - CURVA TEÓRICA.

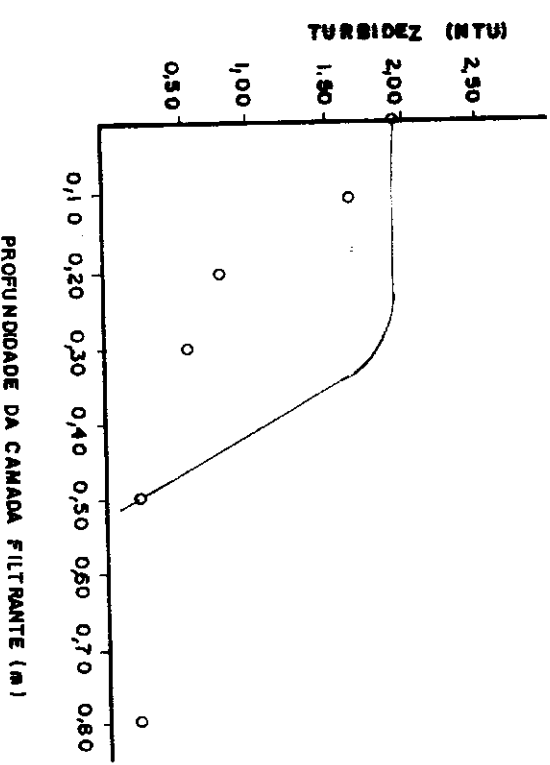




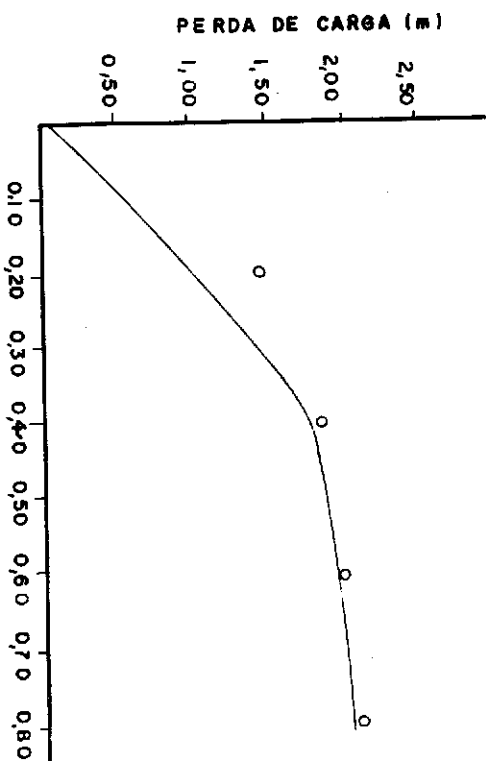
t = 12.960s



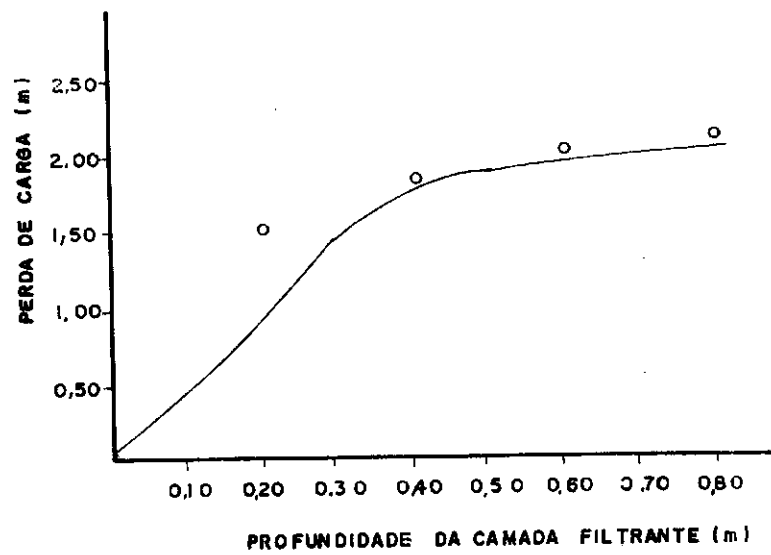
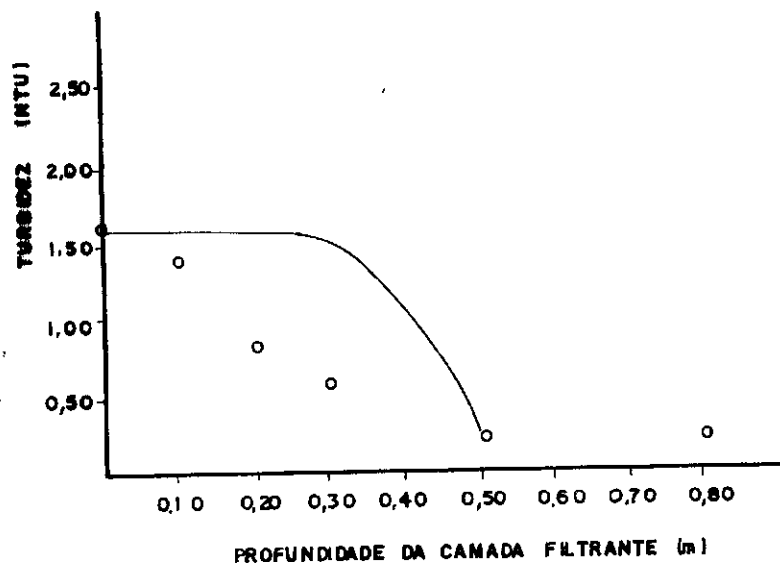
t = 23.280s



PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)



t = 28.440s



ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 03    ÁREA: 0,69    TESTE Nº: 9    TAXA DE FILTRAÇÃO: 5,70 mm/s    DATA 15 / 8 / 88    VOLUME FILTRADO: 2495 litros.  
 DURAÇÃO: 474 min.     $I_0 =$  0,54

HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)											PERDA DE CARGA (m)							
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										[PROFUNDIDADE EM cm]							
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 80 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
8:42	1740	29	2,10	0,92	0,80	0,52	0,22	0,41	-	0,28	-	0,25	-	0,18	0,15	0,29	0,26	0,40	0,37	0,50	0,48
19:37	15840	30	1,90	1,60	1,87	0,87	1,76	0,83	1,41	0,30	0,26	0,21	-	1,03	0,81	1,19	1,22	1,31	1,36	1,42	1,47
14:29	26.160	30	1,90	1,80	1,90	1,20	1,90	1,10	1,88	0,50	1,60	0,21	-	1,30	0,88	1,67	1,73	2,09	2,25	2,30	2,41
15:55	31.320	30	1,60	1,40	1,60	1,68	1,60	0,61	1,58	0,53	1,36	0,22	-	1,55	0,80	1,95	1,73	2,35	2,26	2,45	2,43

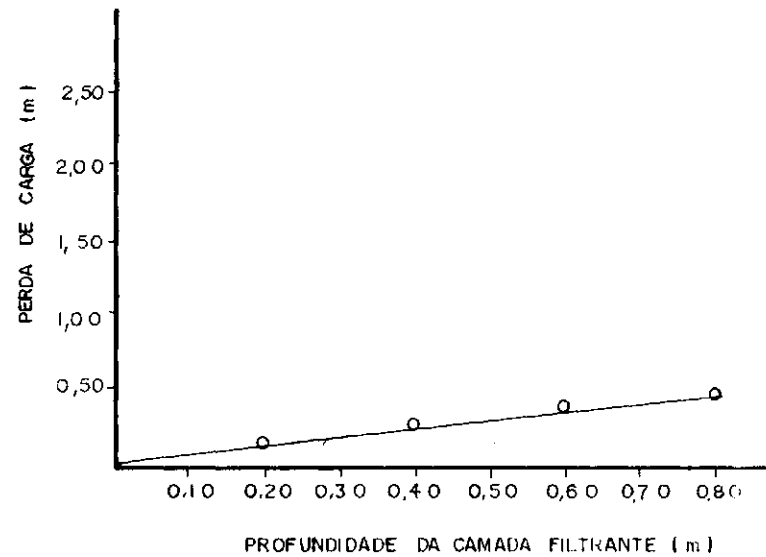
$t = 1740$  s

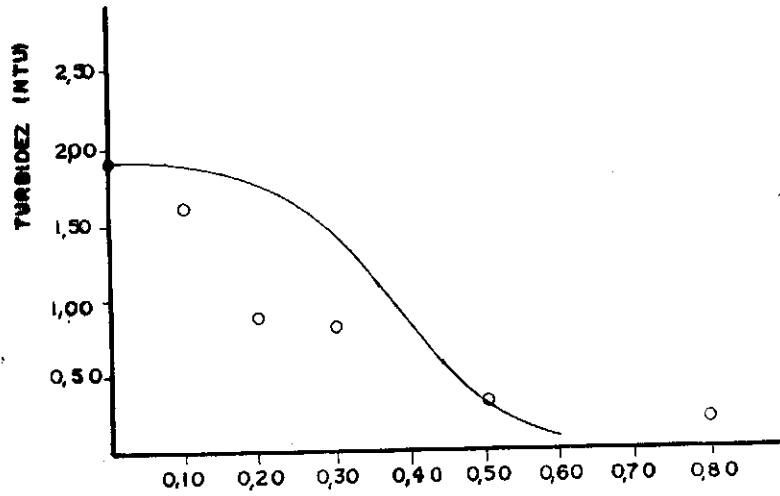
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

L E G E N D A

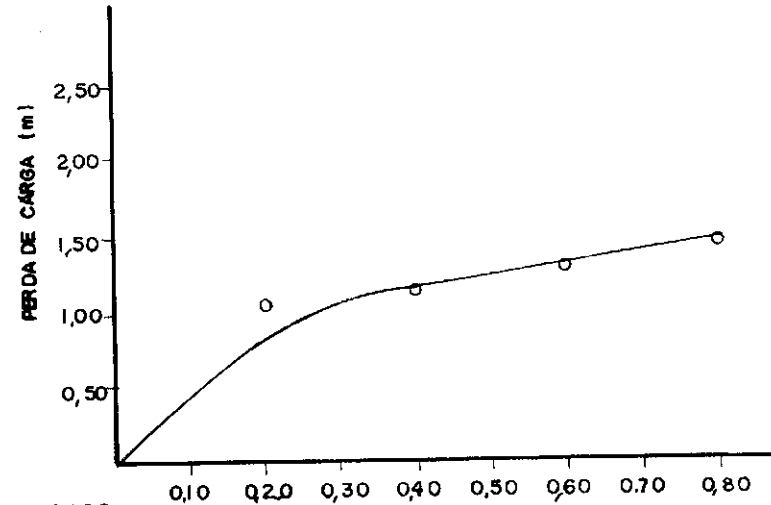
○ - DADOS EXPERIMENTAIS

— — — CURVA TEÓRICA

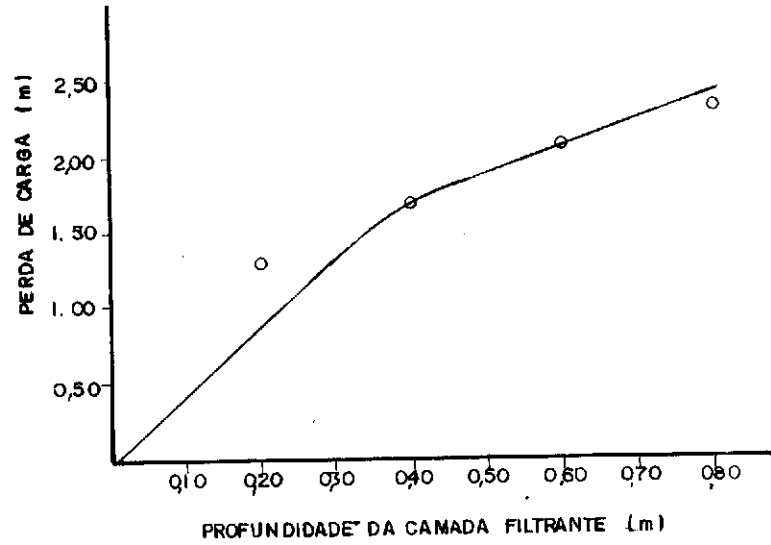
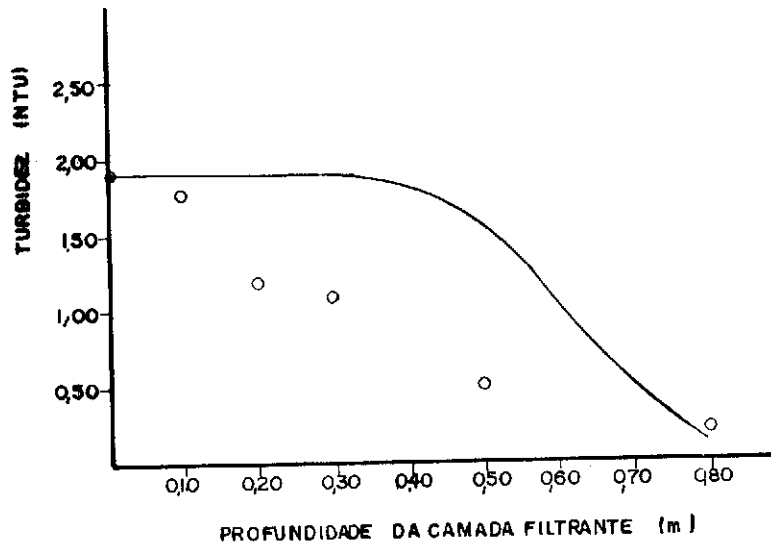




t = 15 840 s

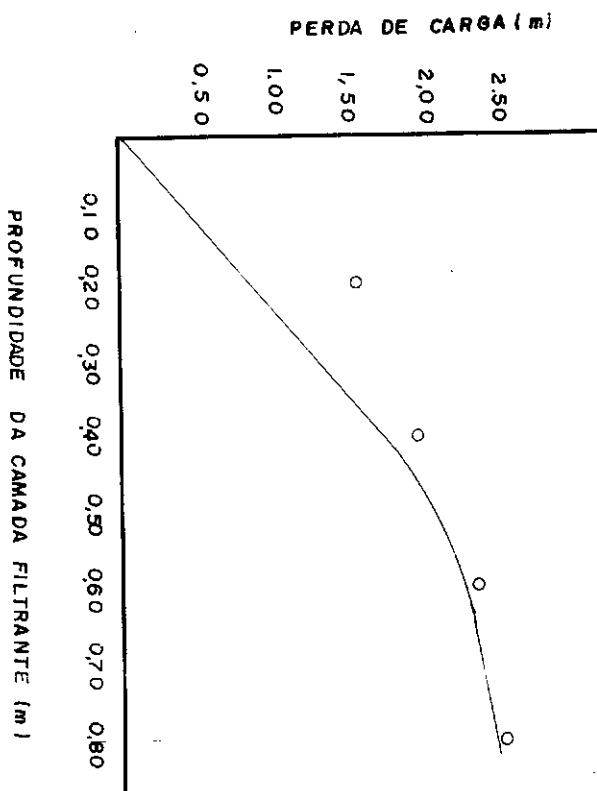
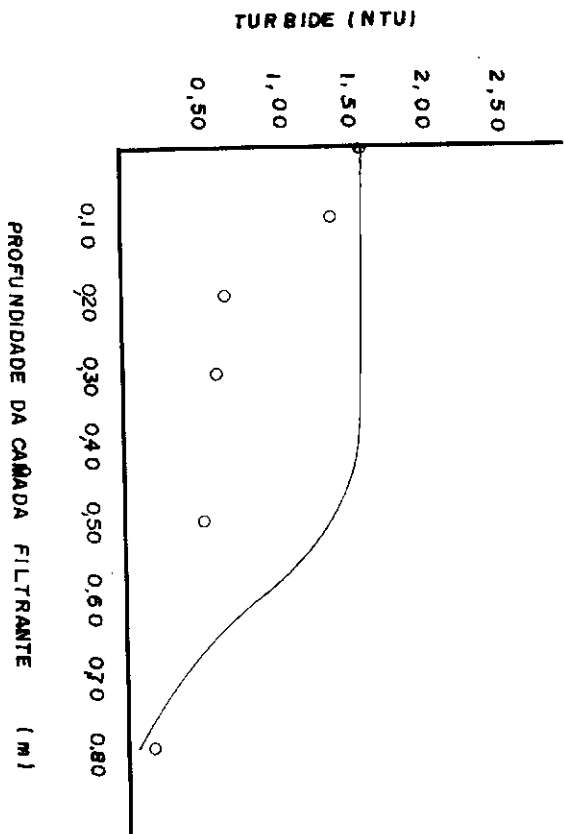


t = 26.160 s





t = 31.320 s



ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO N°: 07 AREIA: 0,50 TESTE N°: 10 TAXA DE FILTRAÇÃO: 1,90 mm/s DATA: 22 / 08 / 88 VOLUME FILTRADO: 1765,0 litros  
 DURAÇÃO: 10,04 min.  $I_0 =$  0,34

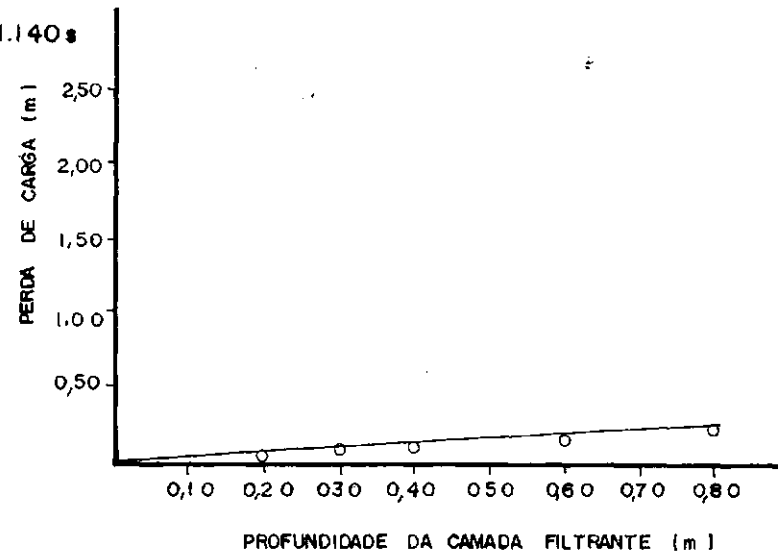
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)																	
				(E)10 (T)	(E)20 (T)	(E)30 (T)	(E)50 (T)	(E)80 (T)	(E)120 (T)	(E)140 (T)	(E)160 (T)	(E)180 (T)	(E)20 (T)	(E)40 (T)	(E)60 (T)	(E)80 (T)					
8:38	1140	29	1,60	0,65	-	0,58	-	0,49	-	0,39	-	0,35	-	0,07	0,07	0,12	0,14	0,19	0,21	0,25	0,28
12:16	14220	29	1,50	0,37	0,21	0,22	-	0,21	-	0,20	-	0,22	-	0,21	0,27	0,30	0,34	0,38	0,41	0,45	0,48
16:23	29.040	29	1,40	0,39	1,40	0,22	-	0,20	-	0,20	-	0,21	-	0,50	0,49	0,61	0,56	0,71	0,64	0,78	0,72
20:18	43.140	29	1,50	0,89	1,50	0,35	1,50	0,23	-	0,21	-	0,20	-	0,72	0,63	0,86	0,83	0,98	0,91	1,06	0,99
00:40	58.860	28	1,50	0,92	1,50	0,35	1,50	0,30	1,38	0,23	-	0,19	-	0,91	0,63	1,15	1,10	1,25	1,17	1,32	1,24

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS  $t = 1,140$  s

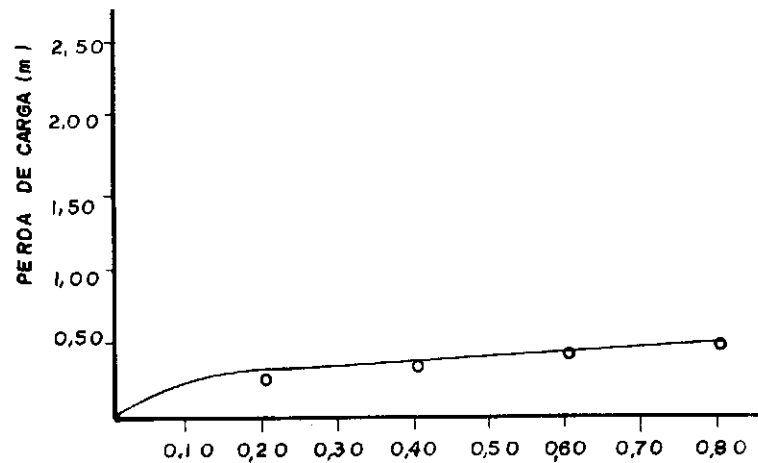
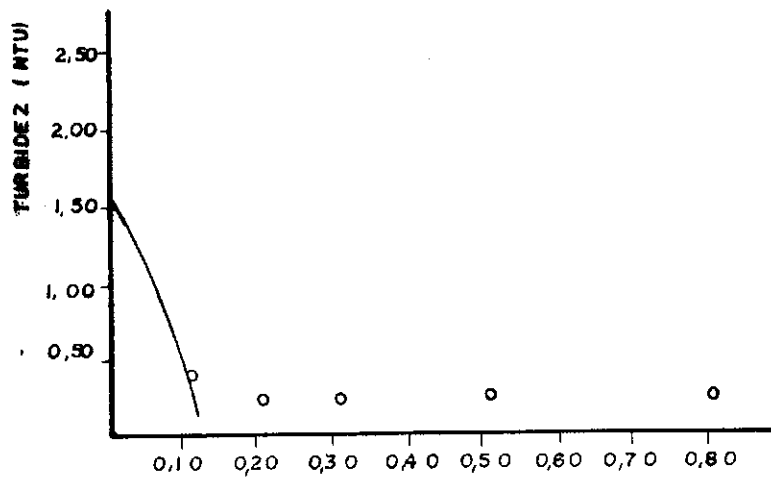
LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

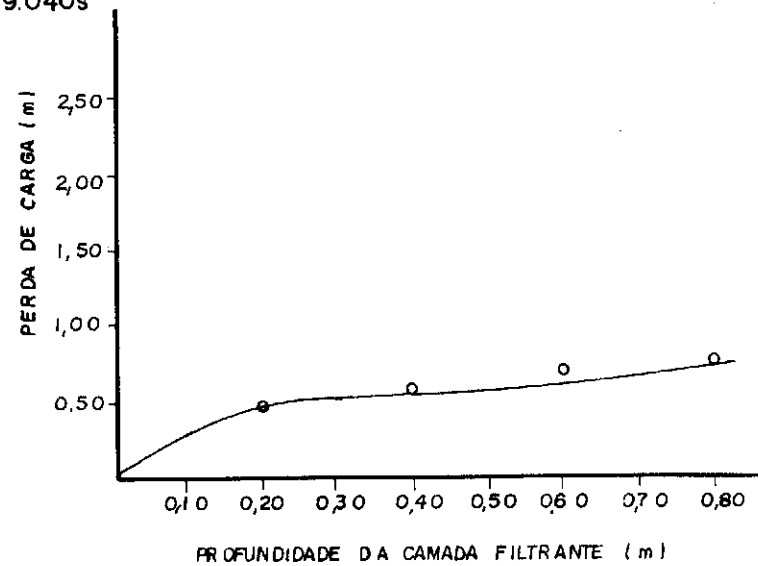
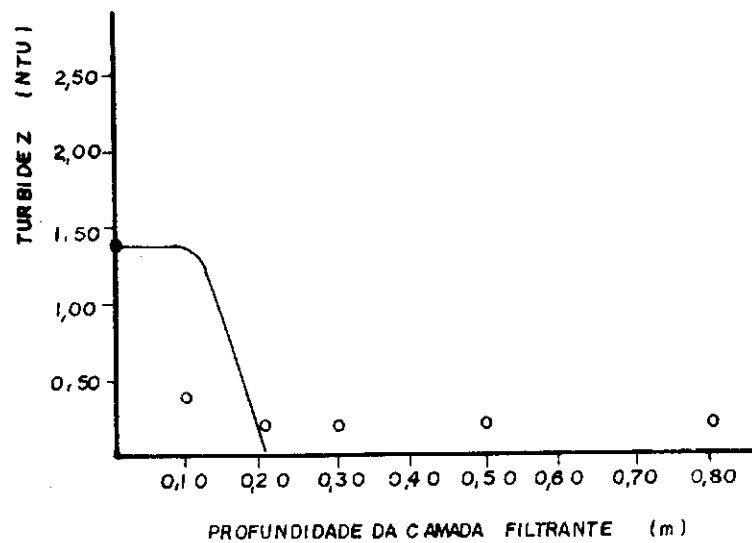
— CURVA TEÓRICA



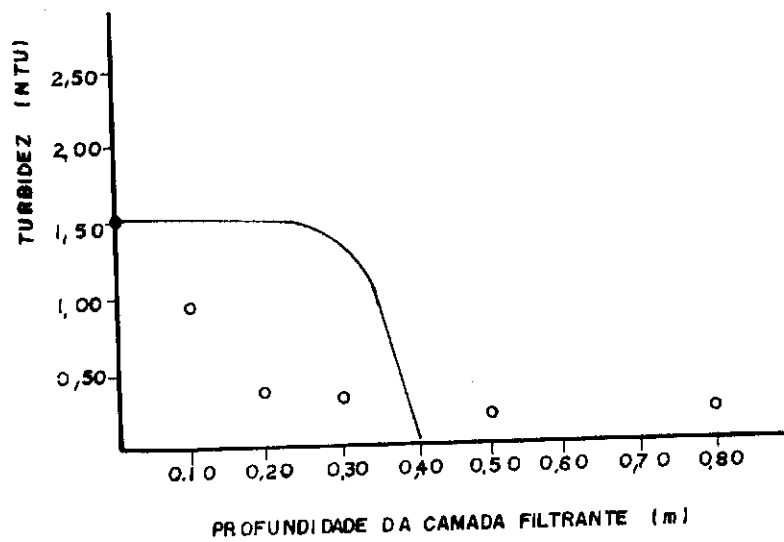
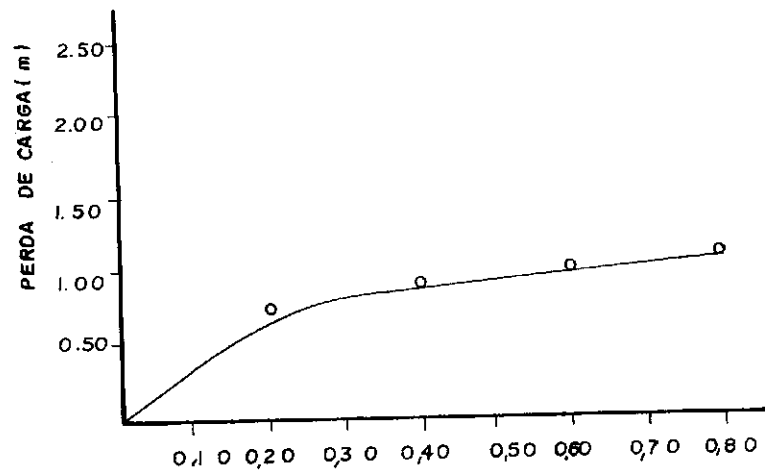
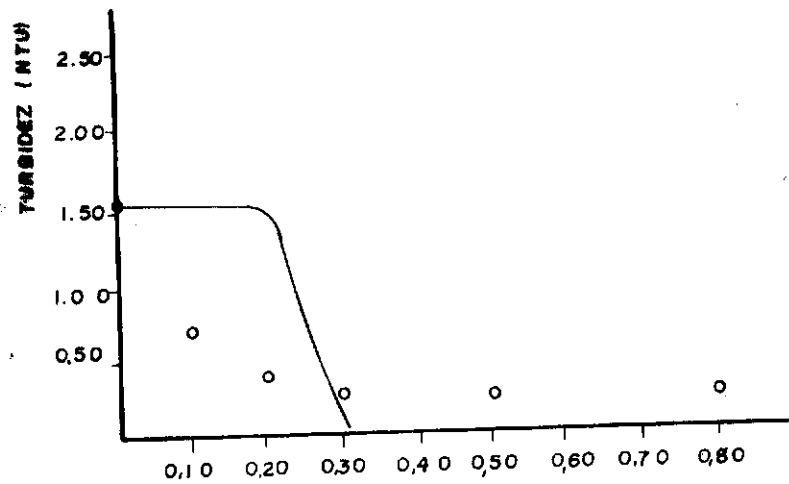
t = 14.220 s



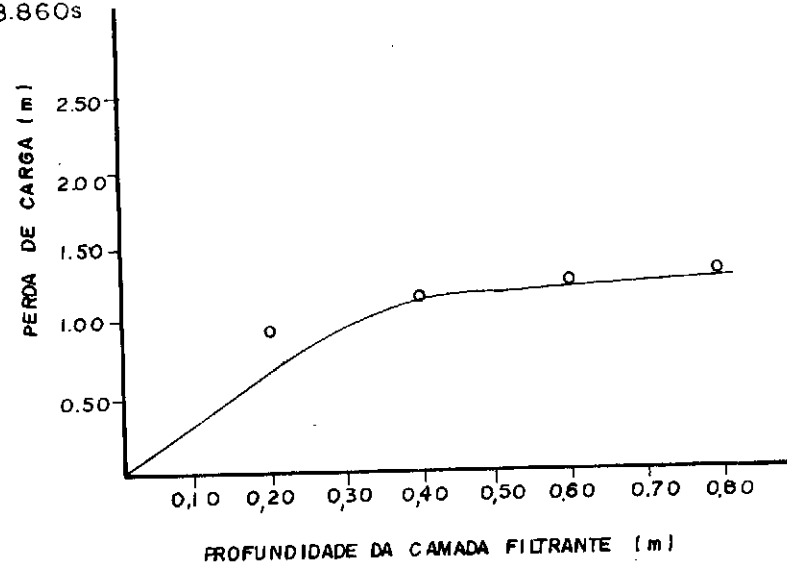
t = 29.040 s



t = 43.140 s



t = 58.860 s



ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 02 ARBA: 0,59 TESTE Nº: 10 TAXA DE FILTRAÇÃO: 1,70 mm/s DATA 22 / 08 / 88 VOLUME FILTRADO: 1572 litros  
 DURAÇÃO: 1001 min.  $t_e =$  0,22

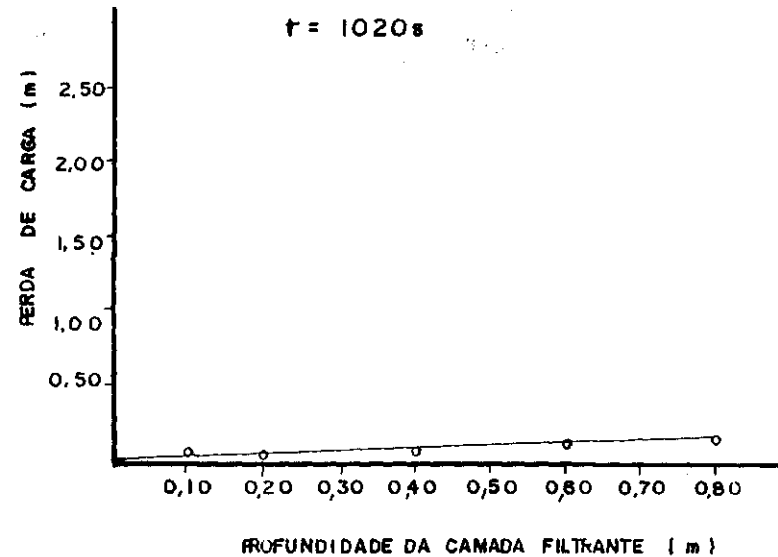
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM Cm)										PROFUNDIDADE EM Cm							
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)	(E) 120 (T)	(E) 140 (T)	(E) 160 (T)	(E) 180 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)					
8:39	1020	29	1,60	0,77	-	0,67	-	0,59	-	0,51	-	0,41	-	0,04	0,05	0,08	0,09	0,12	0,13	0,16	0,18
12:17	14.100	29	1,50	0,22	-	0,20	-	0,21	-	0,19	-	0,20	-	0,14	0,14	0,18	0,19	0,22	0,23	0,26	0,28
16:25	28:000	29	1,40	0,71	1,38	0,25	-	0,20	-	0,21	-	0,20	-	0,29	0,26	0,34	0,31	0,38	0,35	0,42	0,40
20:20	43.080	29	1,50	0,82	1,50	0,56	1,43	0,22	-	0,21	-	0,21	-	0,35	0,38	0,49	0,48	0,54	0,50	0,58	0,55
00:43	58:860	28	1,50	0,92	1,50	0,60	1,50	0,45	1,29	0,21	-	0,20	-	0,56	0,38	0,65	0,60	0,71	0,65	0,75	0,70

OBS: AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

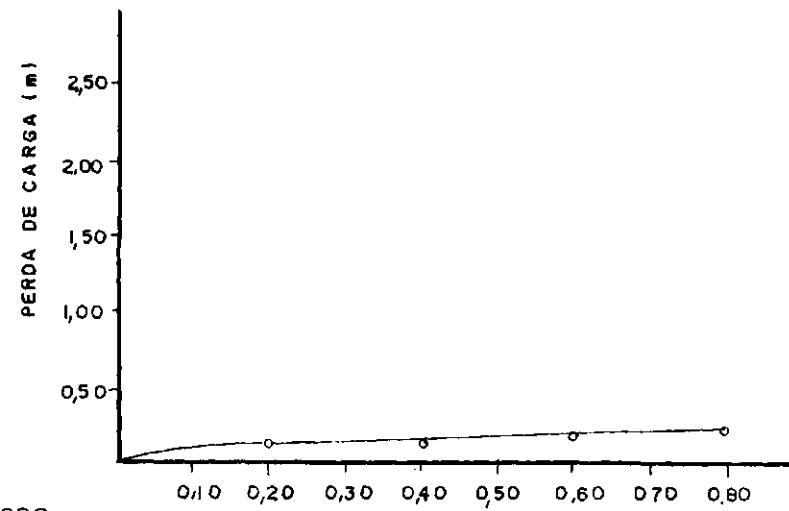
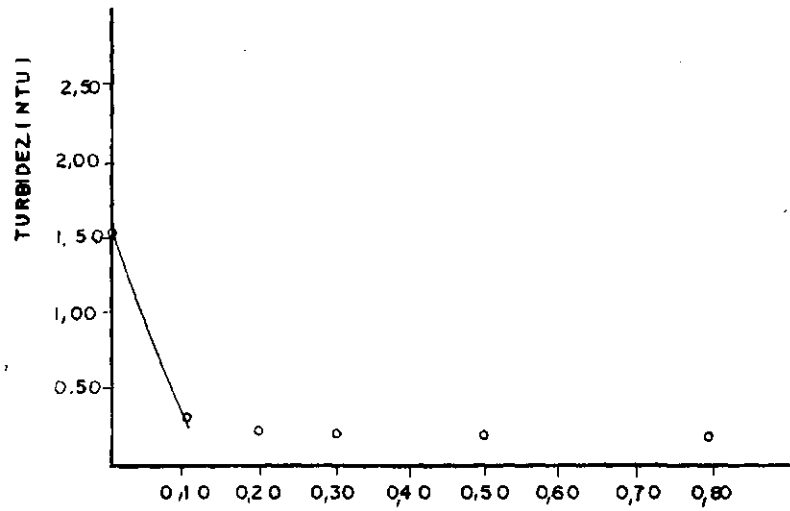
LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

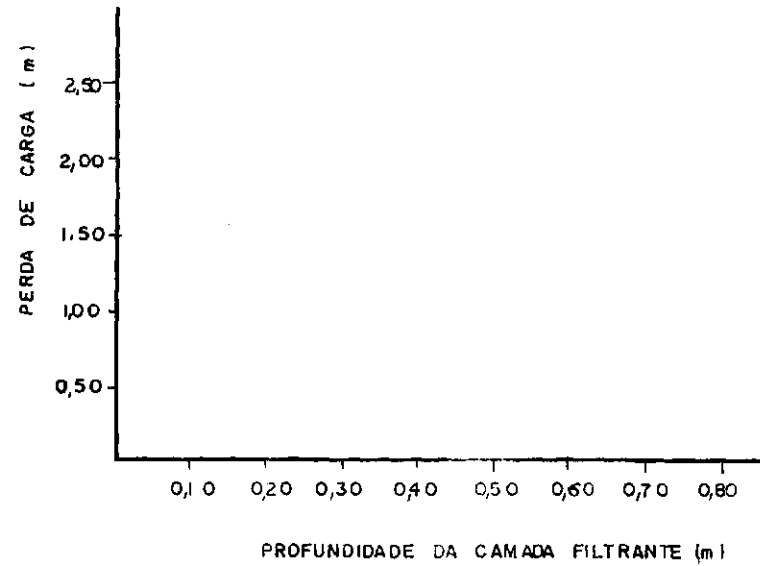
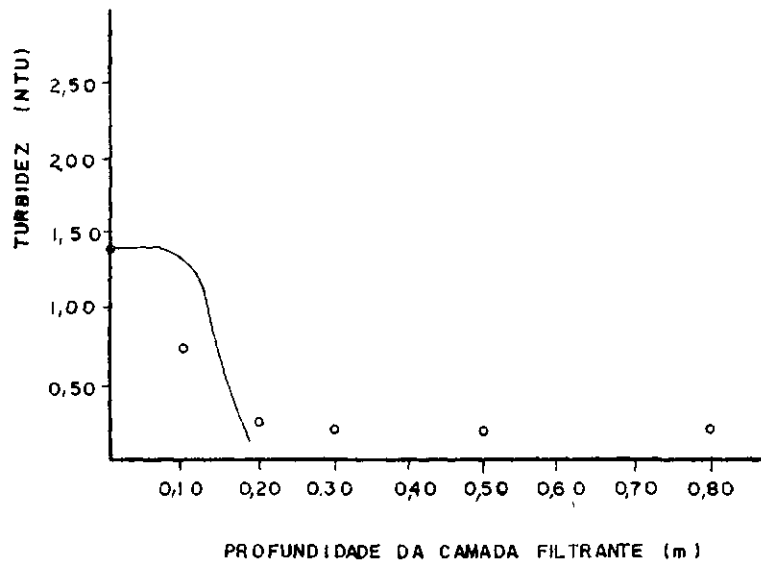
— CURVA TEÓRICA



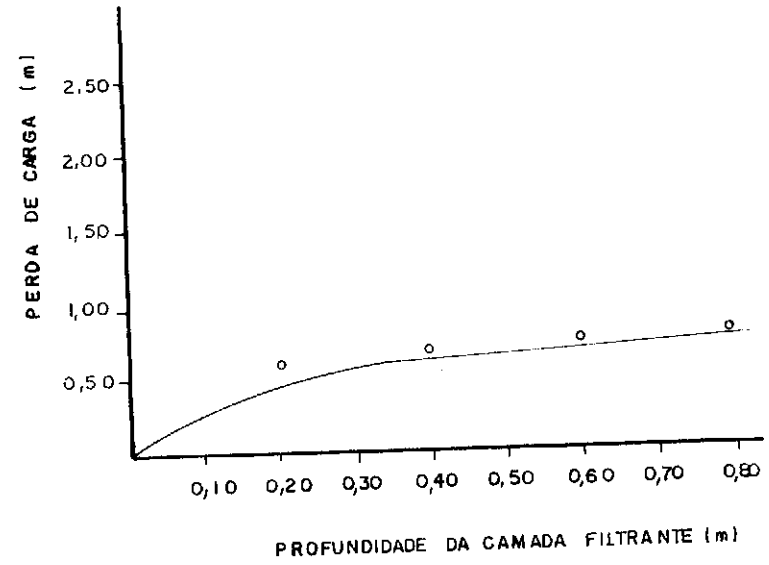
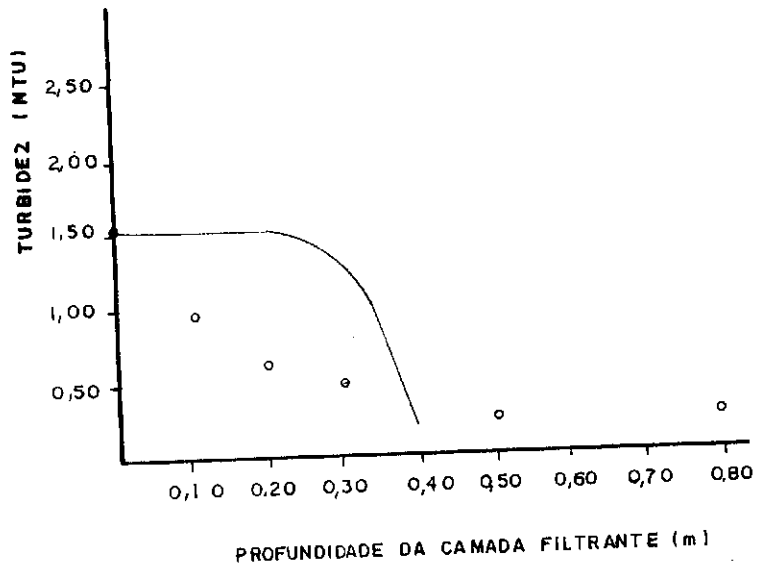
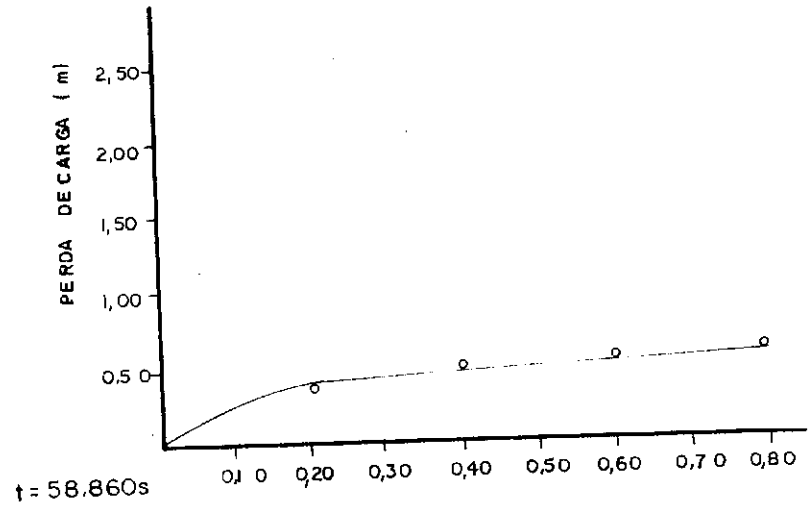
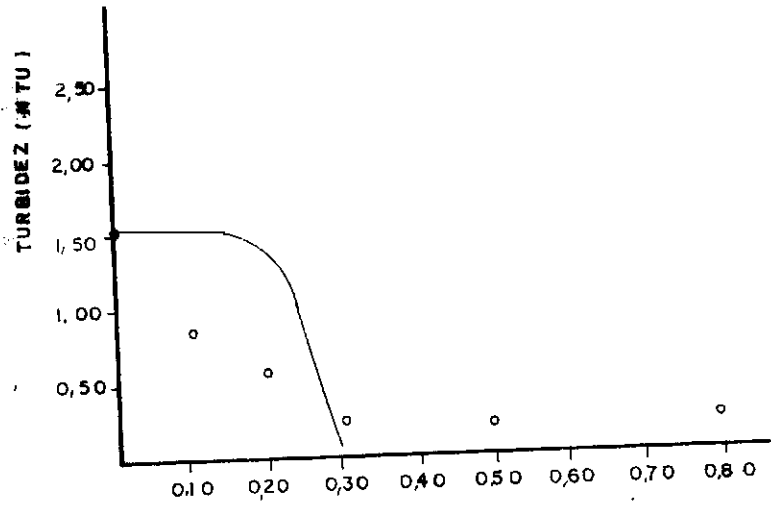
t = 14.100s



t = 28.980s



t = 43 080s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 3      AREIA: 0,69      TESTE Nº: 10      TAXA DE FILTRAÇÃO: 1,39 mm/s      DATA 22 / 8 / 88      VOLUME FILTRADO: 1282 litros  
 DURAÇÃO: 1000 min.       $I_0 =$  0,13

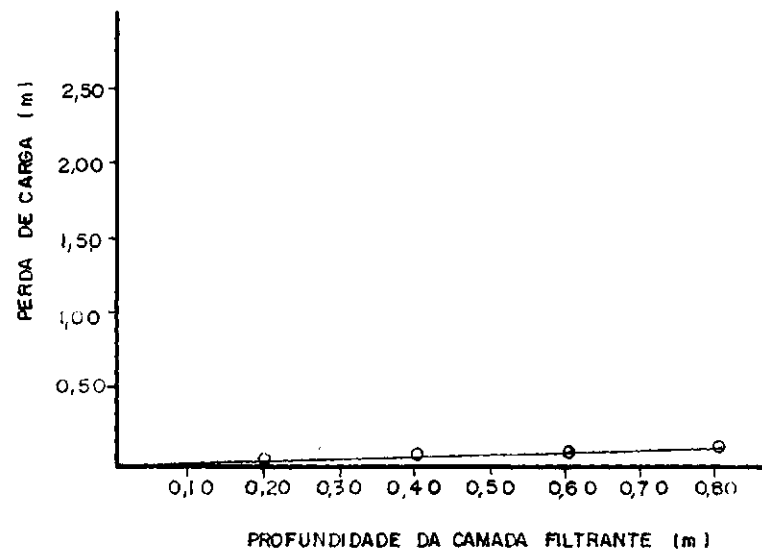
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										PROFUNDIDADE EM cm							
				(E)10 (T)	(E)20 (T)	(E)30 (T)	(E)50 (T)	(E)80 (T)	(E)20 (T)	(E)40 (T)	(E)60 (T)	(E)80 (T)									
8:48	1440	29	1,60	0,88	-	0,67	-	0,64	-	0,52	-	0,50	-	0,03	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,10	0,11
12:18	14040	29	1,50	0,35	-	0,20	-	0,21	-	0,21	-	0,20	-	0,08	0,07	0,11	0,09	0,14	0,12	0,16	0,14
16:26	36.120	29	1,40	0,48	1,36	0,22	-	0,21	-	0,20	-	0,21	-	0,17	0,15	0,20	0,18	0,23	0,20	0,26	0,23
20:22	43.060	29	1,50	0,64	1,50	0,30	0,63	0,22	-	0,21	-	0,21	-	0,21	0,19	0,25	0,22	0,28	0,24	0,31	0,27
00:44	58.800	28	1,50	0,82	1,50	1,63	1,48	0,23	-	0,21	-	0,20	-	0,25	0,22	0,30	0,28	0,34	0,31	0,37	0,34

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

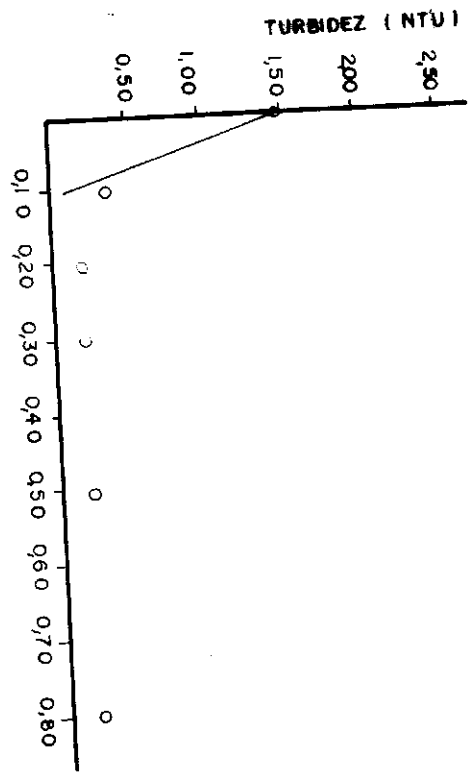
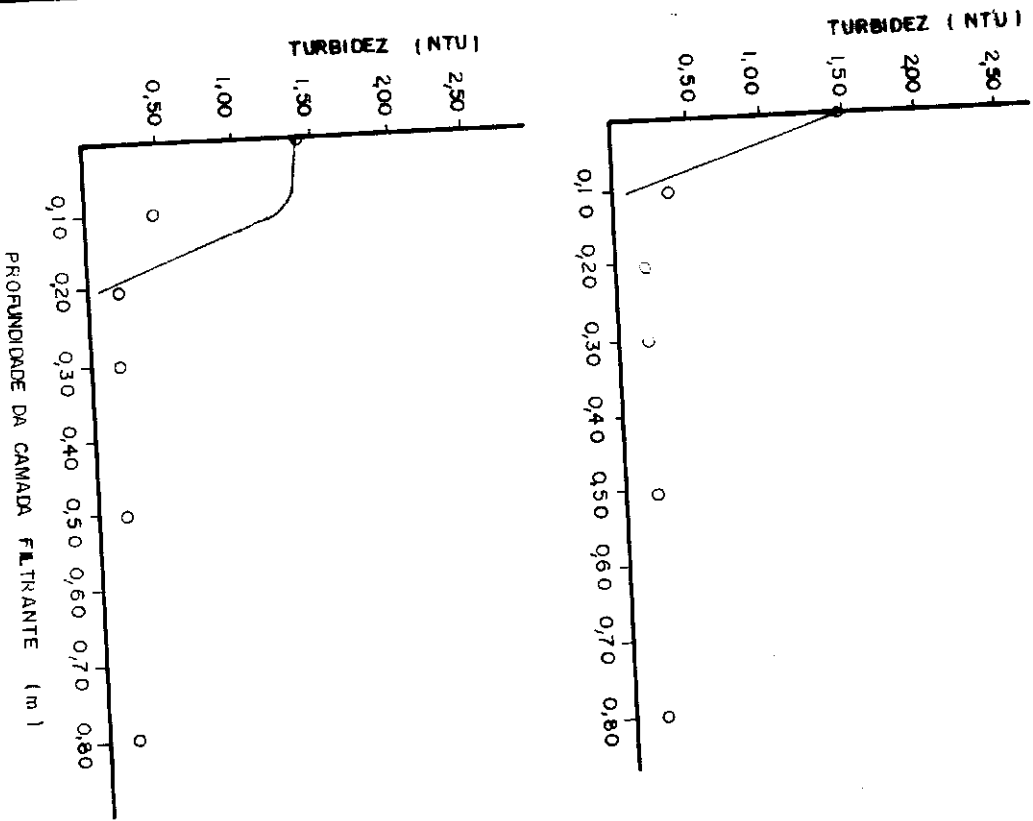
#### L E G E N D A

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

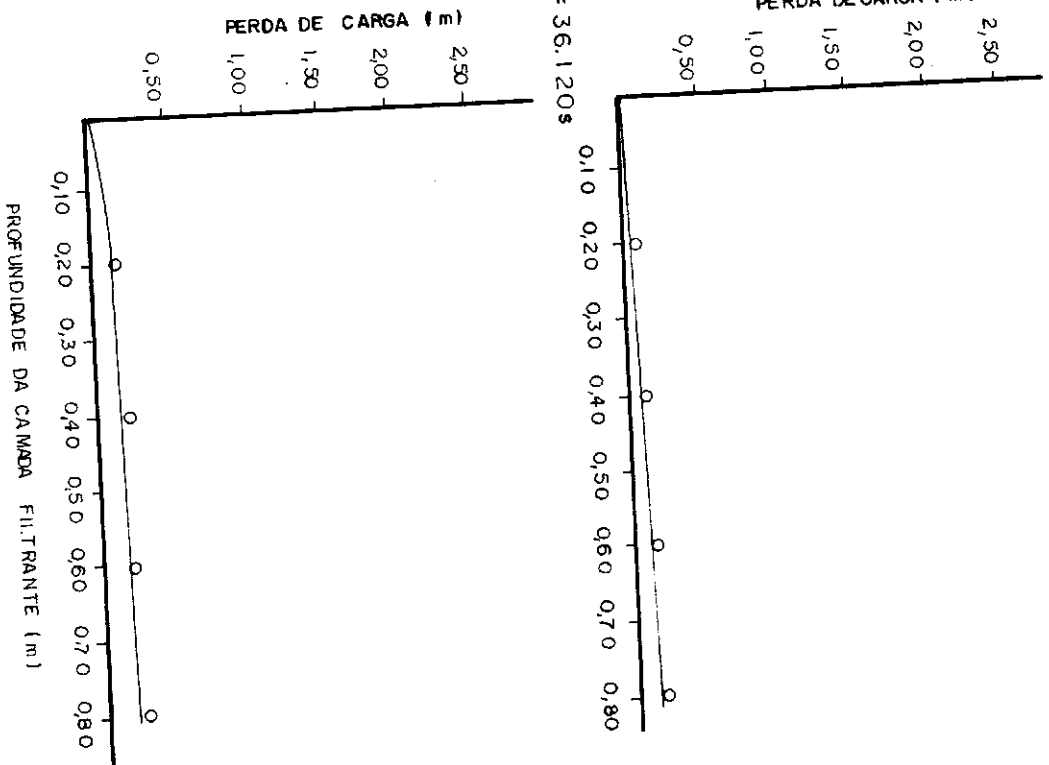
— CURVA TEÓRICA



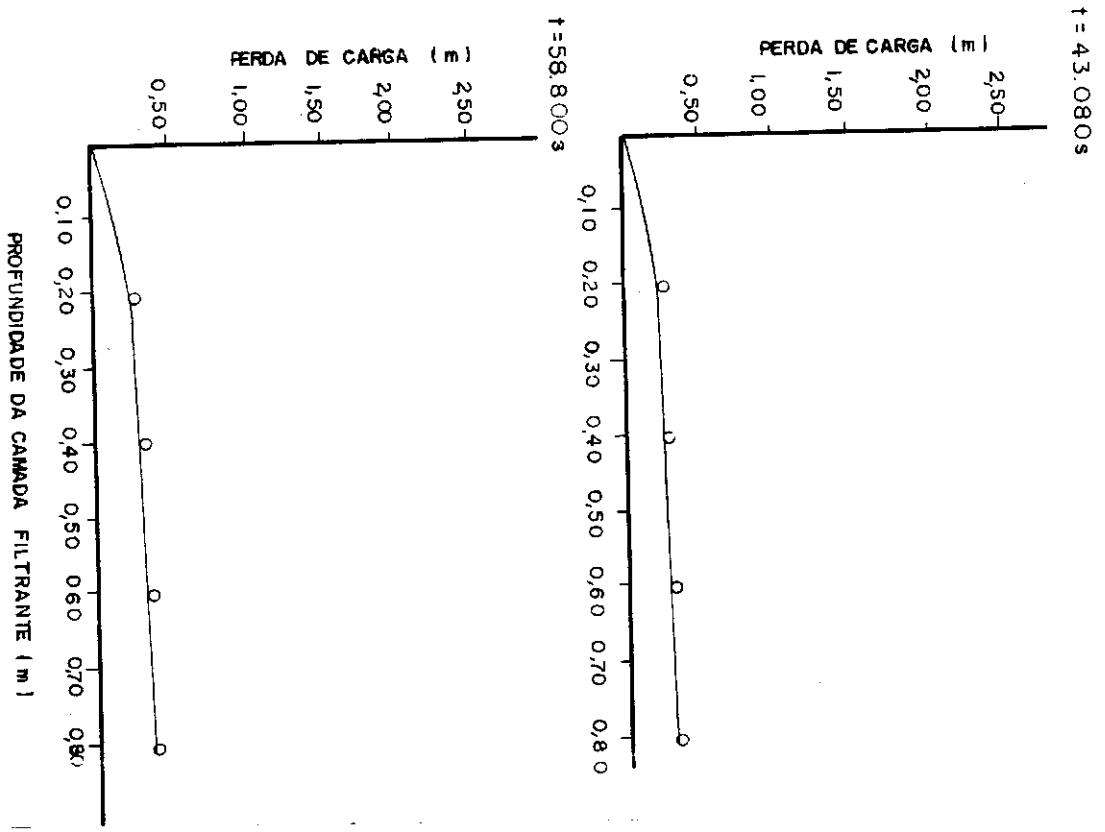
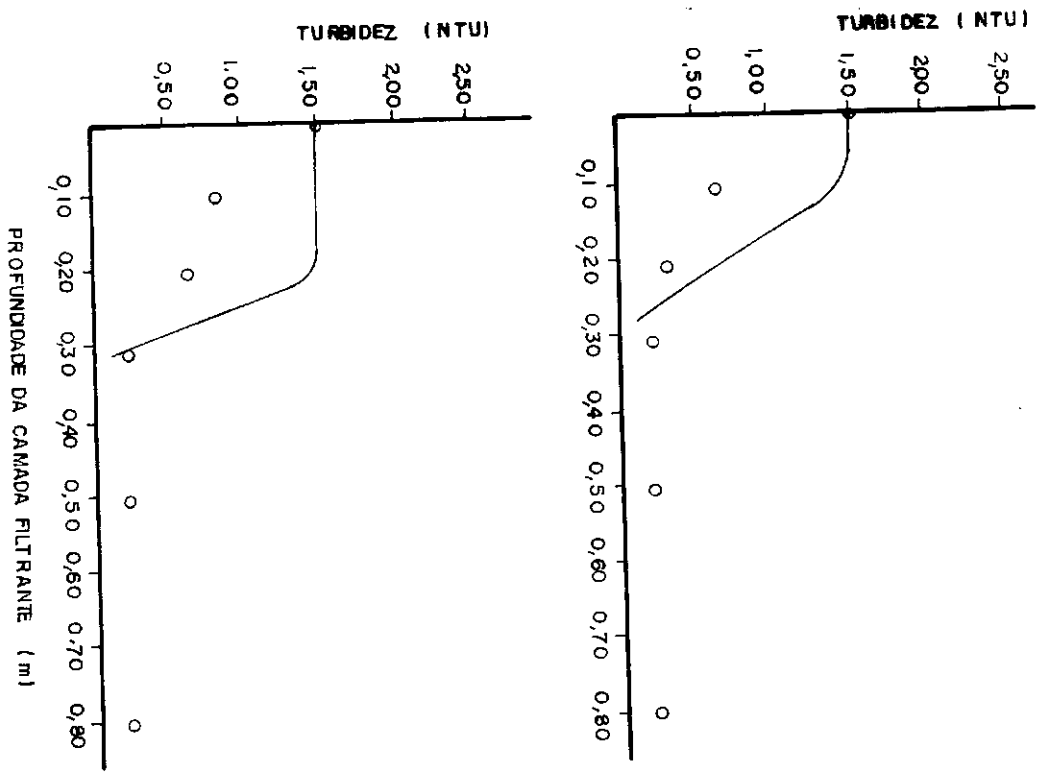




t = 14.040 s



t = 36.120 s



## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

FILTRO Nº: 01.

AREIA: 0,50mm.

TESTE Nº: 12.

TAXA DE FILTRAÇÃO: 3,99 mm/s.

DATA: 29 / 11 / 88.

VOLUME FILTRADO: 1377,0 Litros.

DURAÇÃO: 335 min.

$I_0 = 0,95$

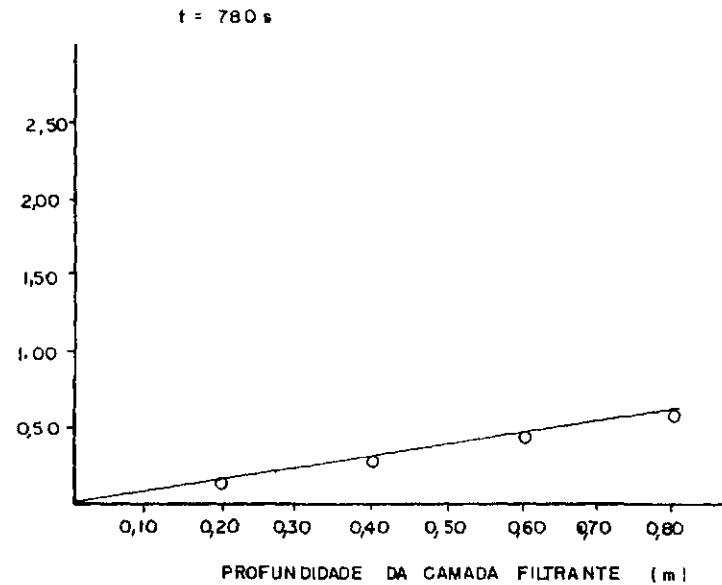
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										(E) 20 (T)		(E) 40 (T)		(E) 60 (T)		(E) 80 (T)	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 40 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 70 (T)	(E) 80 (T)	(E) 90 (T)	(E) 100 (T)	(E) 110 (T)	(E) 120 (T)	(E) 130 (T)	(E) 140 (T)	(E) 150 (T)	(E) 160 (T)	(E) 170 (T)	(E) 180 (T)
8:15	780	26	1,70	0,69	-	0,61	-	0,52	-	0,54	-	0,37	-	0,14	0,17	0,29	0,32	0,45	0,48	0,60	0,63
11:15	11580	29	1,80	0,95	1,77	0,48	0,36	0,30	-	0,22	-	0,25	-	0,90	1,07	1,19	1,23	1,34	1,38	1,49	1,54
14:05	27180	29	1,40	0,85	1,40	0,40	1,40	0,32	1,05	0,20	-	0,18	-	1,80	1,41	2,08	2,14	2,25	2,30	2,40	2,45

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

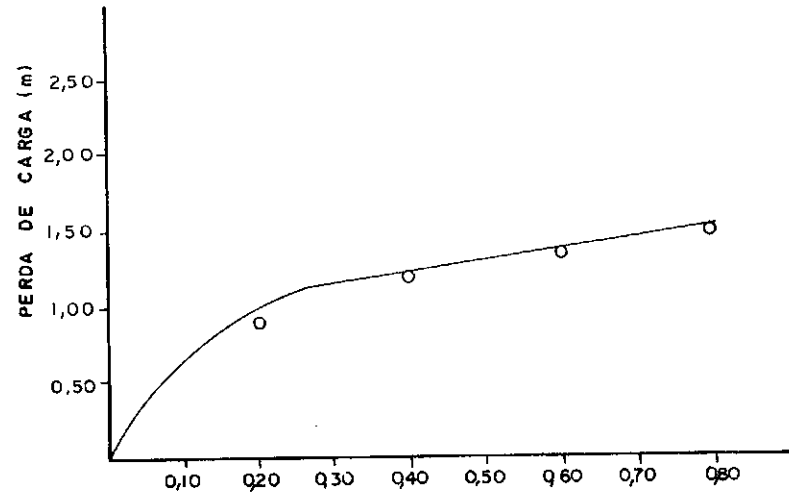
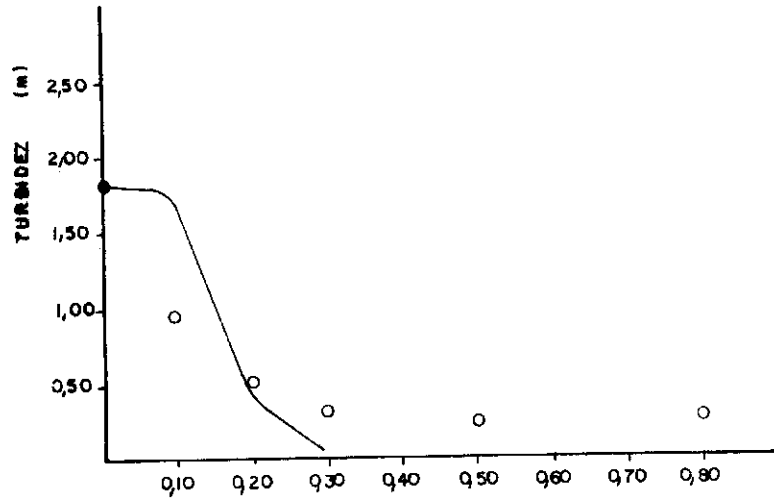
### LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

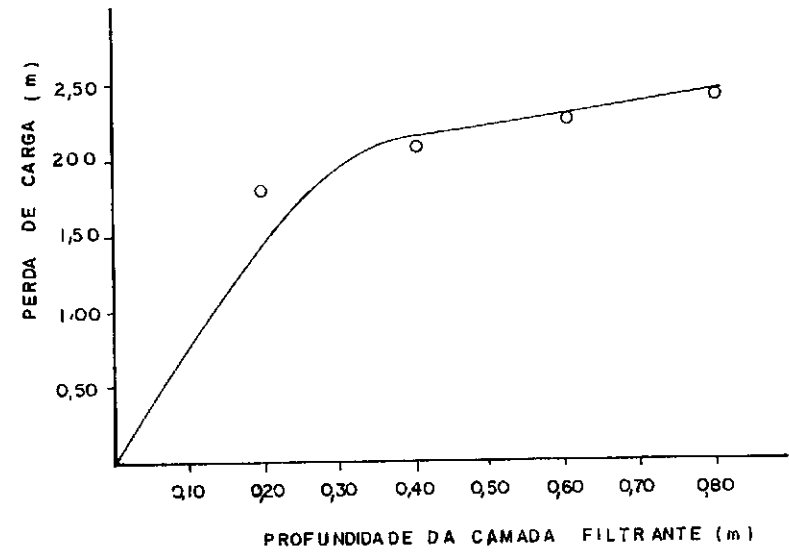
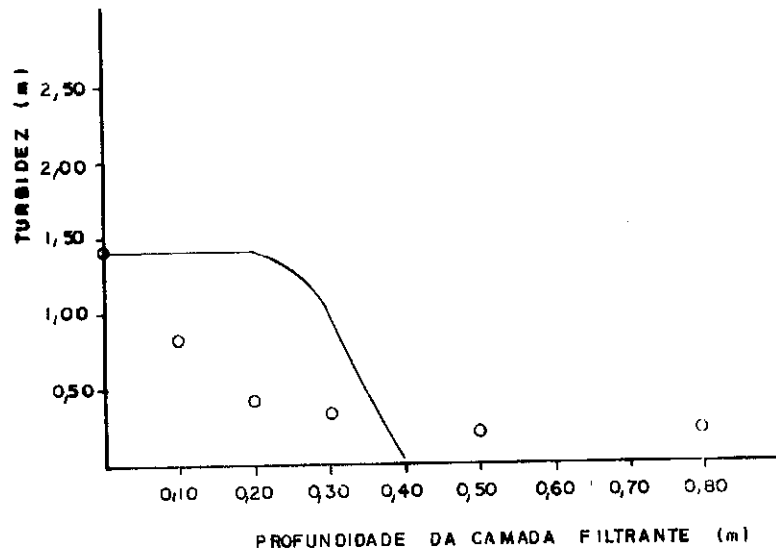
— — CURVA TEÓRICA.



t = 11580 s



t = 27180 s



## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTACÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 03 AREIA: 0,69 (mm) TESTE Nº: 12 TAXA DE FILTRAÇÃO: 3,67 mm/s. DATA 29 / 11 / 88 VOLUME FILTRADO: 1688,0 litros.  
 DURAÇÃO: 498 min.  $I_0 = 0,37$

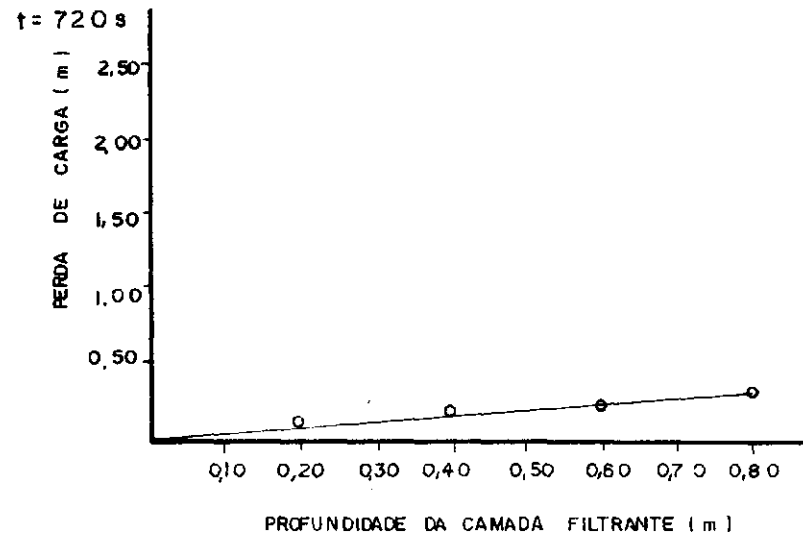
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM Cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM Cm)										(E) 20 (T)		(E) 40 (T)		(E) 60 (T)		(E) 80 (T)	
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 40 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 70 (T)	(E) 80 (T)	(E) 90 (T)	(E) 100 (T)	(E) 120 (T)	(E) 140 (T)	(E) 160 (T)	(E) 180 (T)	(E) 200 (T)			
8:17	720	26	1,70	1,10	0,24	0,84	—	0,78	—	0,70	—	0,49	—	0,10	0,08	0,16	0,15	0,22	0,23	0,28	0,30
11:18	11.580	29	1,80	0,67	1,50	0,59	0,57	0,27	—	0,20	—	0,18	—	0,39	0,34	0,48	0,42	0,55	0,50	0,81	0,57
14:08	21.780	29	1,40	0,52	1,35	0,35	1,02	0,22	0,30	0,21	—	0,20	—	0,59	0,50	0,69	0,62	0,75	0,70	0,81	0,77
16:15	29.400	29	1,40	0,71	1,39	0,41	1,33	0,39	0,22	0,20	—	0,17	—	0,79	0,59	0,85	0,84	0,98	0,92	1,08	1,00

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

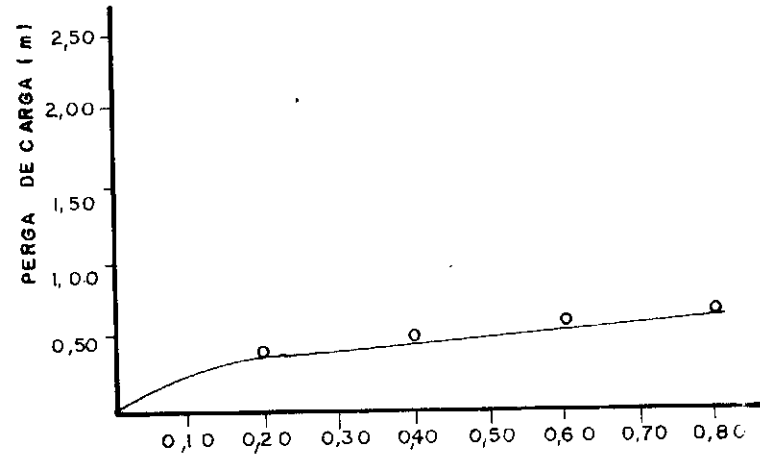
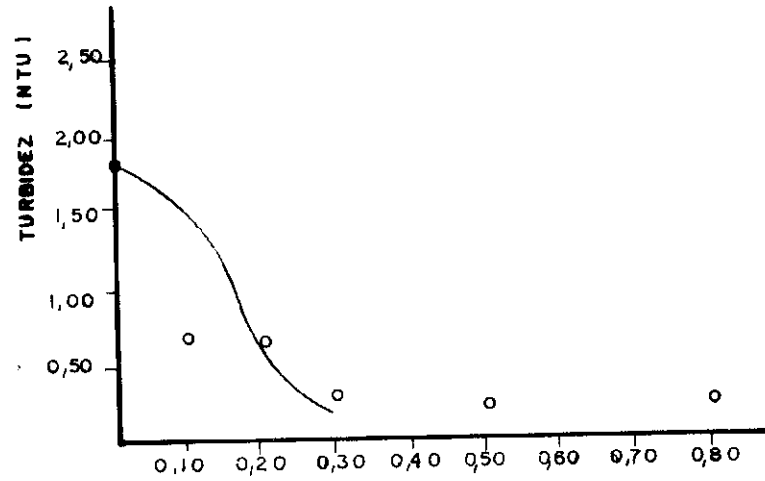
### L E G E N D A

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

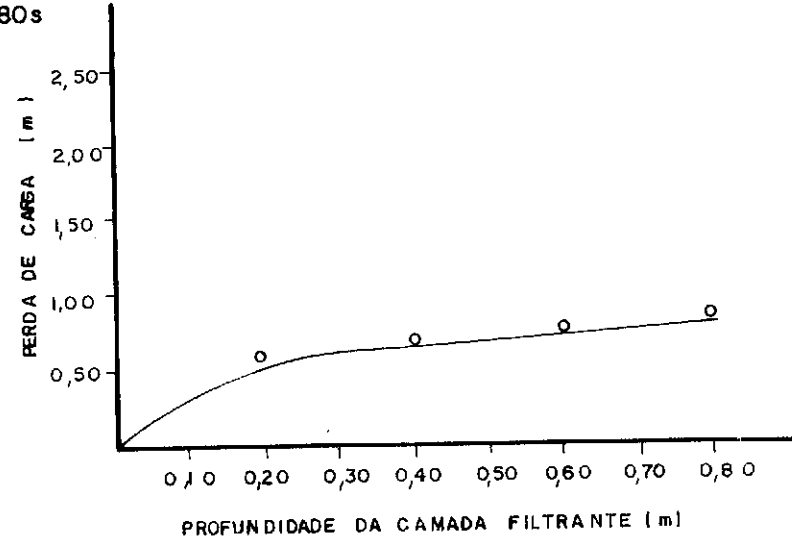
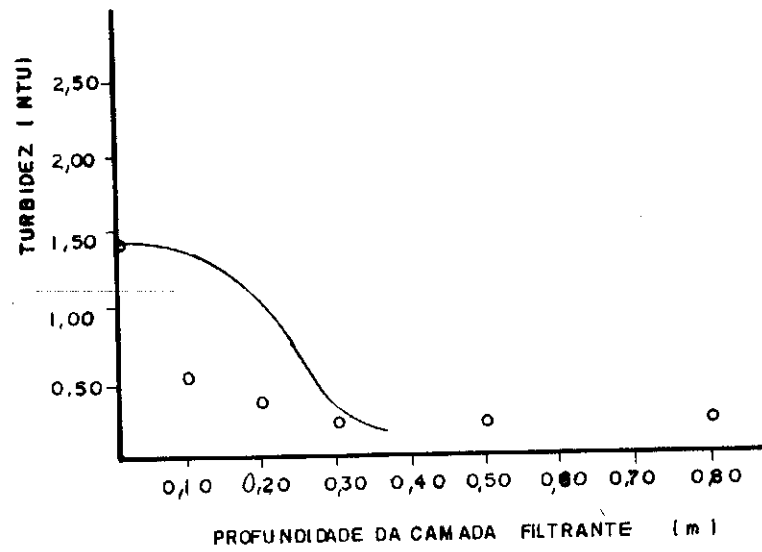
— CURVA TEÓRICA.



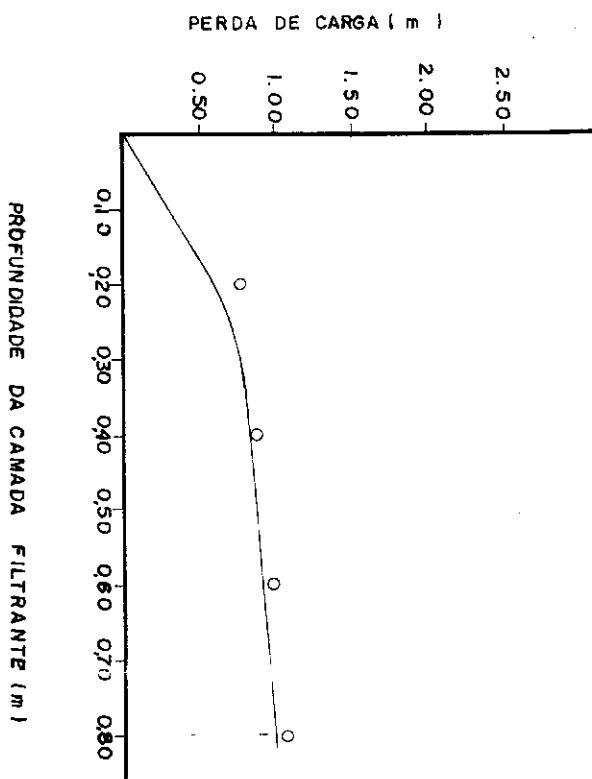
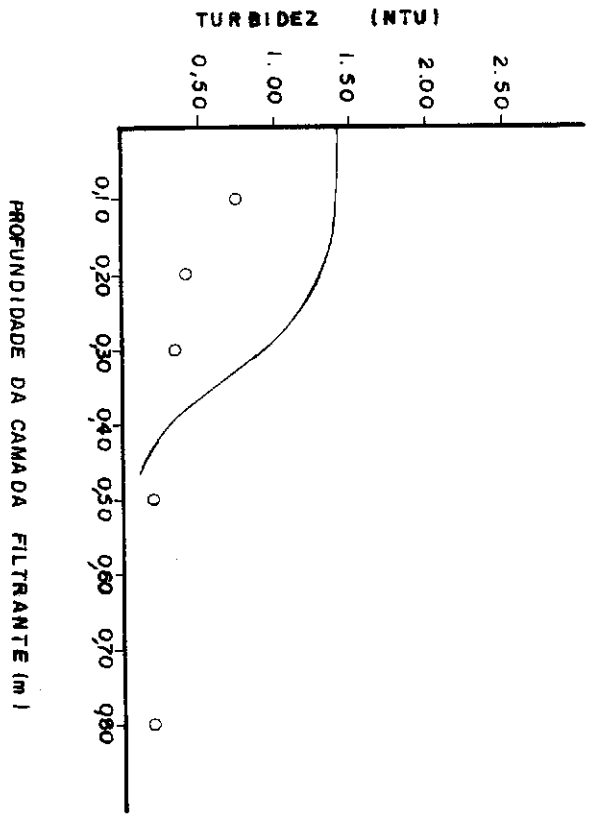
t = 11.580 s



t = 21.780 s



t = 29.400 s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA-CE.  
 FILTRO Nº: 02 AREIA: 0,59 TESTE Nº: 13 TAXA DE FILTRAÇÃO: 6,20 mm/s DATA 01 / 12 / 88 VOLUME FILTRADO: 1609,0 litros.  
 DURAÇÃO: 281 min.  $I_0 =$  0,84

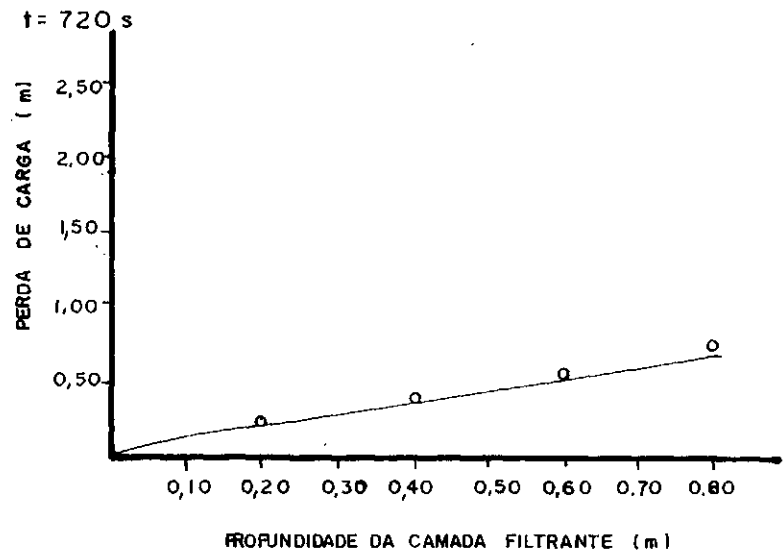
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE PROFUNDIDADE EM (cm)										(PROFUNDIDADE EM cm)							
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
9:02	720	27	1,50	0,59	-	0,50	-	0,42	-	0,40	-	0,29	-	0,20	0,19	0,37	0,35	0,54	0,52	0,72	0,69
10:57	7620	29	1,50	0,65	1,15	0,41	0,41	0,21	-	0,20	-	0,20	-	0,68	0,68	0,89	0,87	1,07	1,04	1,25	1,20
11:55	11100	30	1,50	0,84	1,40	0,50	0,92	0,29	0,24	0,19	-	0,20	-	1,21	1,05	1,42	1,29	1,58	1,46	1,75	1,63
13:16	15960	30	1,40	0,95	1,38	0,73	1,24	0,48	0,67	0,19	-	0,17	-	1,70	1,32	1,91	1,77	2,05	1,94	2,20	2,11

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

#### L E G E N D A

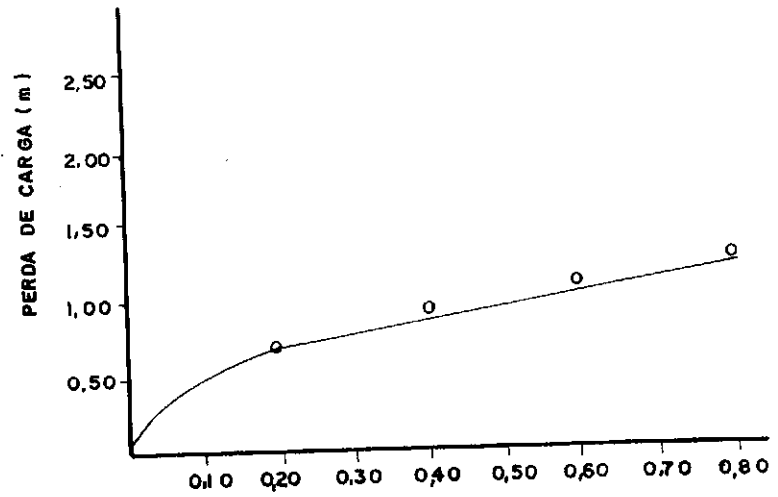
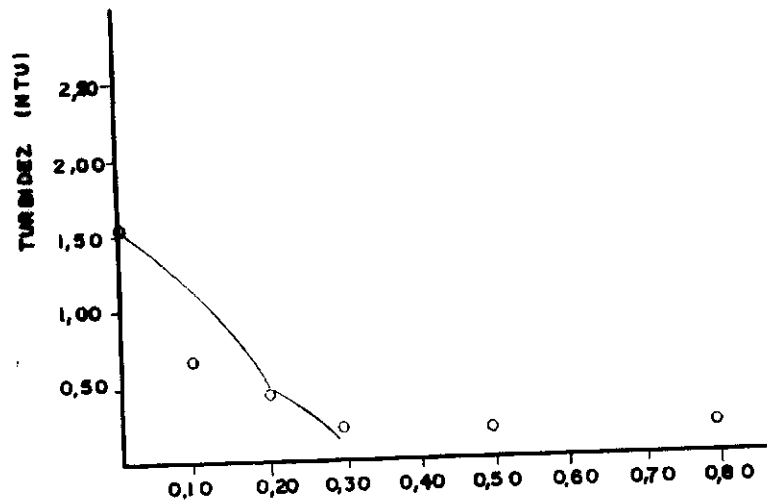
○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

— - CURVA TEÓRICA.

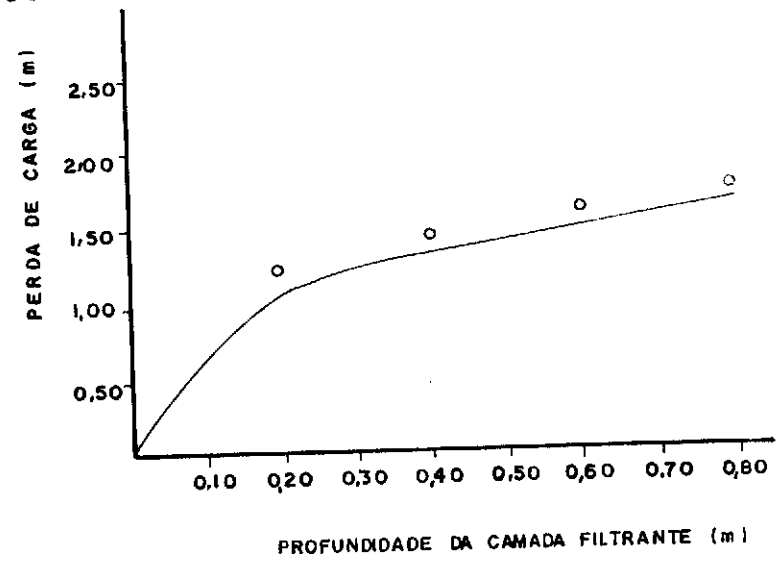
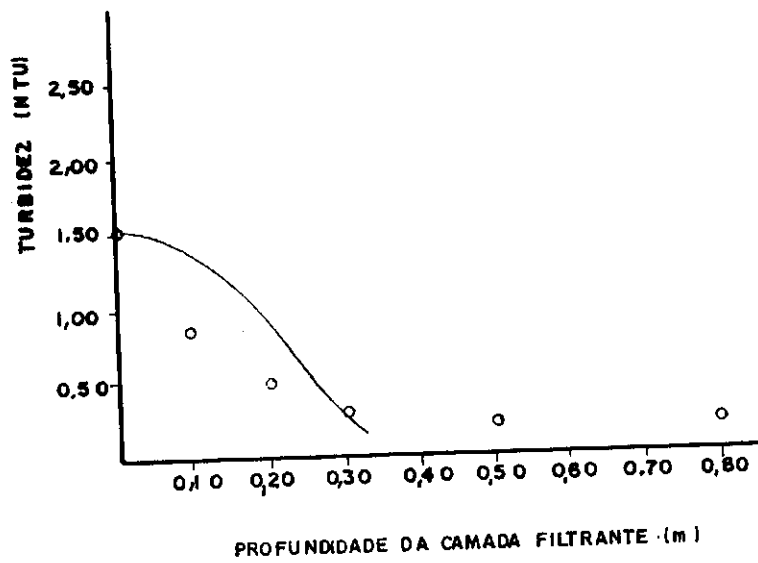




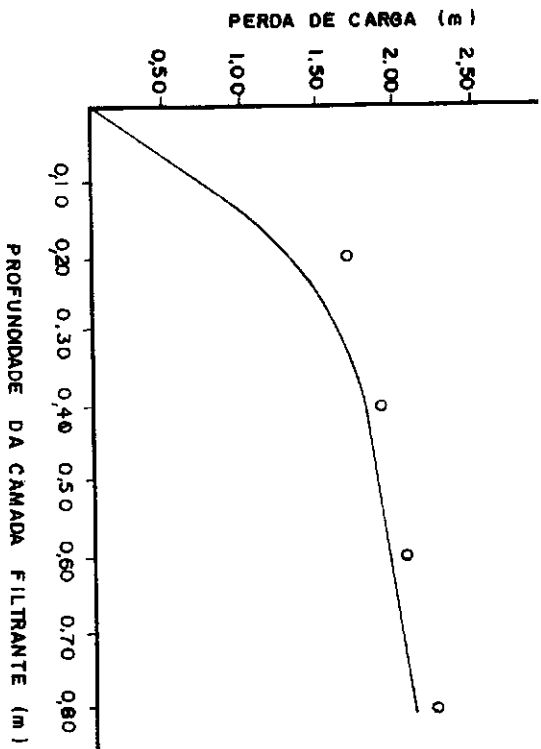
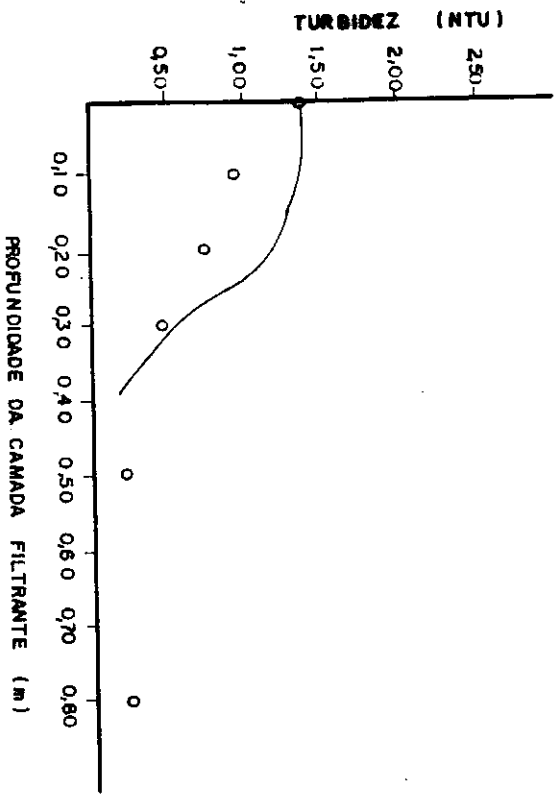
t = 7620s



t = 11.100s



t = 15.960 s



ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 01 AREIA: 0,50 TESTE Nº: 14 TAXA DE FILTRAÇÃO: 1,86 mm/s DATA: 27 / 12 / 88 VOLUME FILTRADO: 1704,0 litros  
 DURAÇÃO: 864 min.  $I_0 =$  0,35

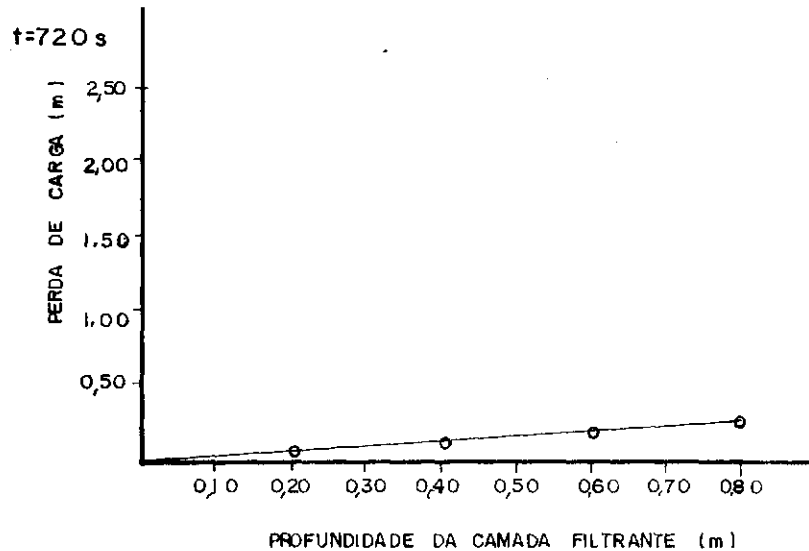
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM Cm)										PROFUNDIDADE EM Cm)							
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 80 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
8:20	720	27	1,40	0,53	-	0,46	-	0,39	-	0,37	-	0,37	-	0,06	0,07	0,13	0,14	0,20	0,21	0,27	0,28
12:11	14580	29	1,50	0,32	0,21	0,20	-	0,21	-	0,21	-	0,19	-	0,25	0,28	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,49
16:02	28.440	29	1,60	0,56	1,60	0,23	-	0,20	-	0,22	-	0,19	-	0,56	0,55	0,63	0,62	0,73	0,70	0,80	0,78
20:11	43.380	28	1,60	0,70	1,60	0,28	1,60	0,21	-	0,20	-	0,21	-	0,70	0,64	0,91	0,89	0,98	0,96	1,05	1,03
23:55	56.820	28	1,60	0,80	1,60	0,42	1,60	0,38	1,60	0,23	-	0,20	-	0,80	0,64	1,10	1,14	1,20	1,21	1,27	1,28
2:06	64.880	27	1,50	0,79	1,50	0,38	1,50	1,35	1,50	0,21	-	0,18	-	0,90	0,64	1,19	1,21	1,32	1,28	1,40	1,35

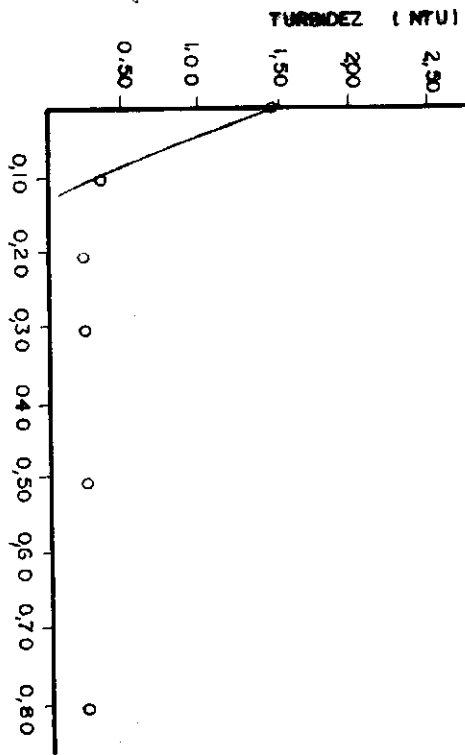
OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

LEGENDA

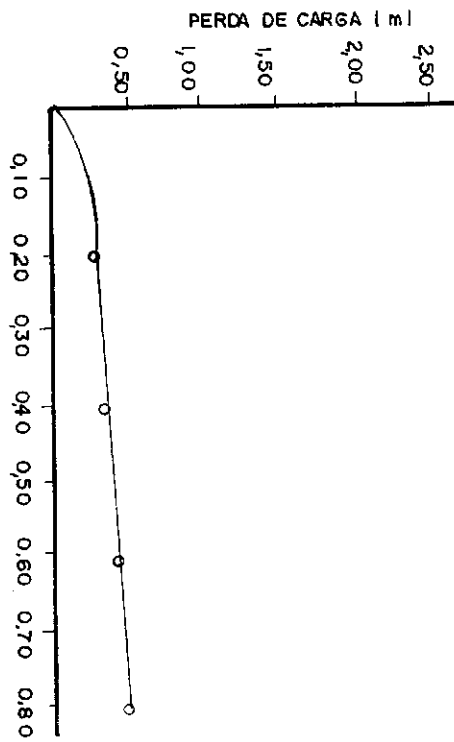
○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

— CURVA TEÓRICA.

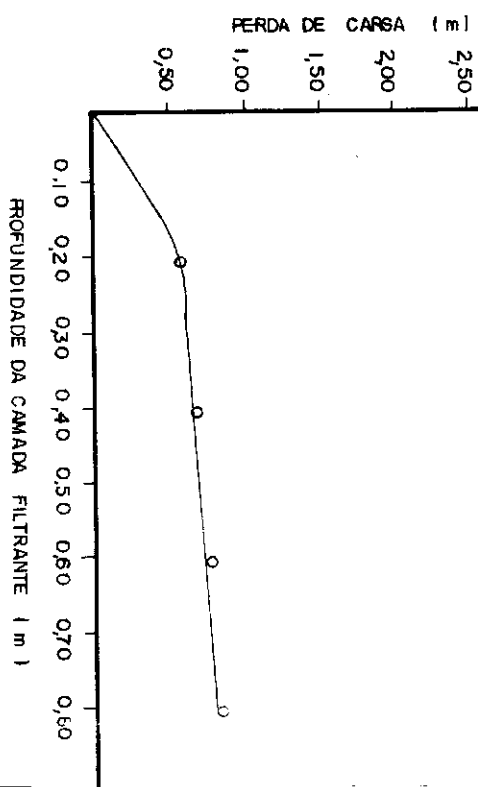
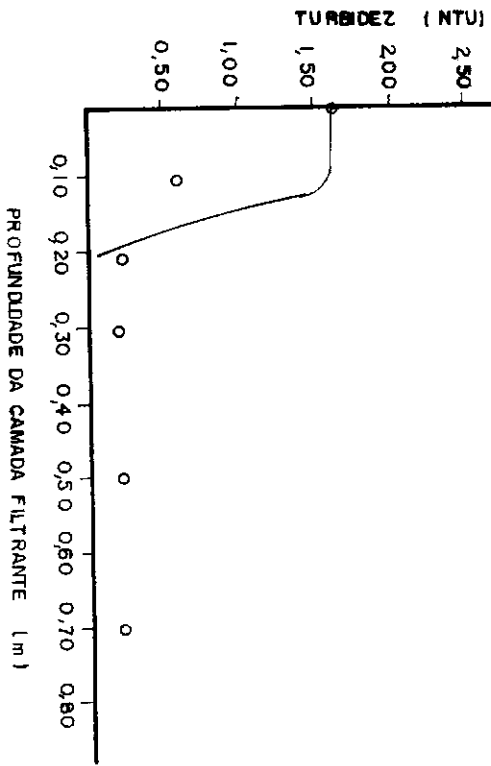




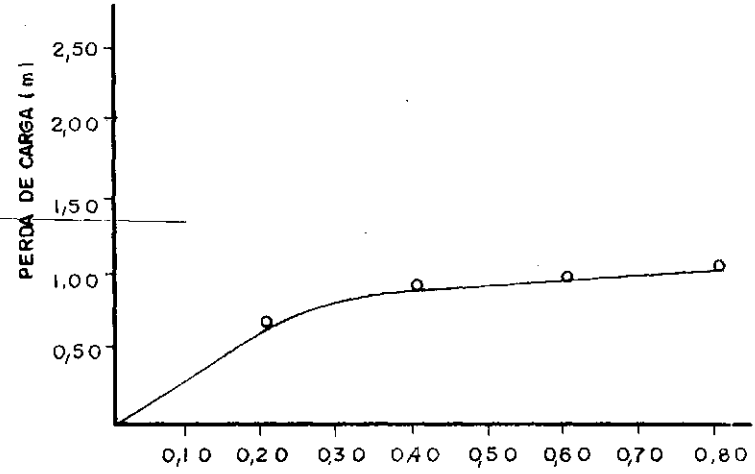
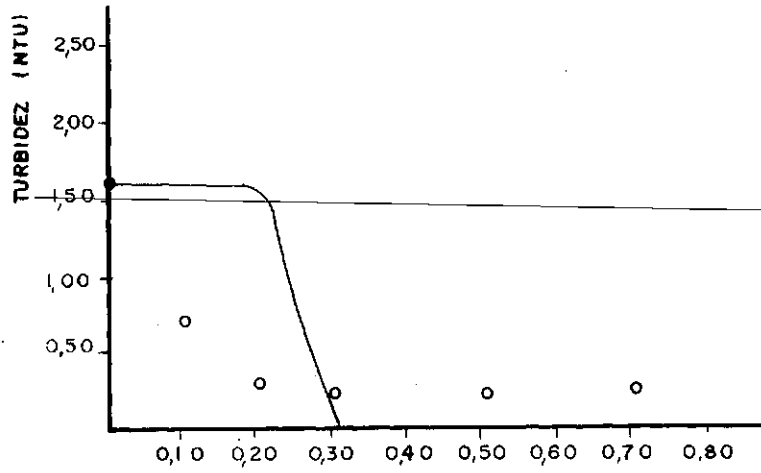
t = 14.580 s



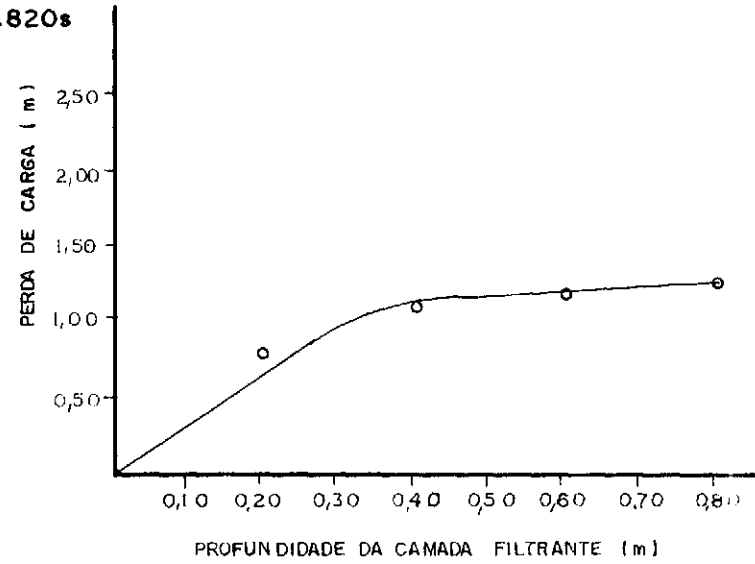
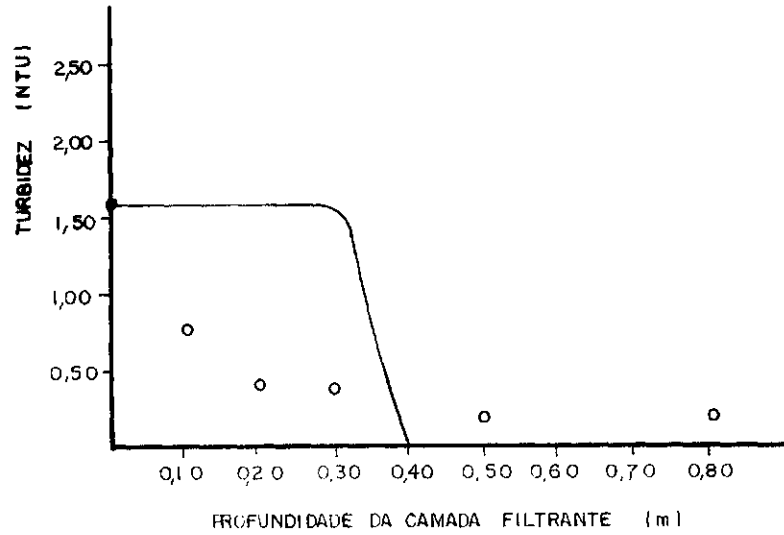
t = 28.440 s



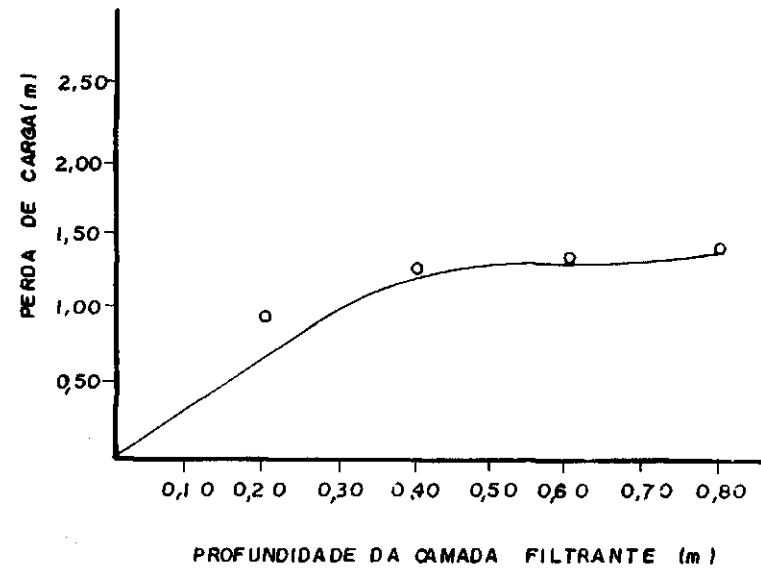
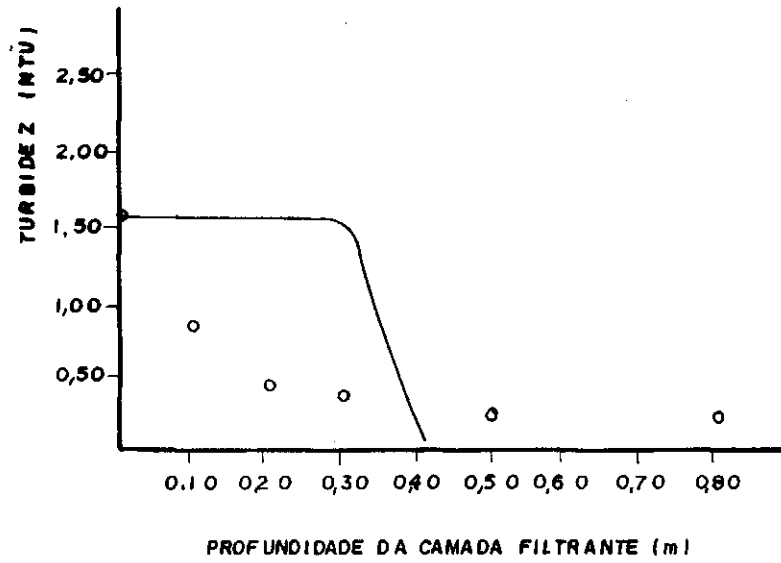
t = 43.380 s



t = 56.820 s



t = 64.880 s



ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE  
 FILTRO Nº: 02 AREIA: 0,59 TESTE Nº: 14 TAXA DE FILTRAÇÃO: 1,54 mm/s. DATA: 27 / 2 / 88 VOLUME FILTRADO: 1764 litros  
 DURAÇÃO: 1230 min  $I_0 = 0,21$

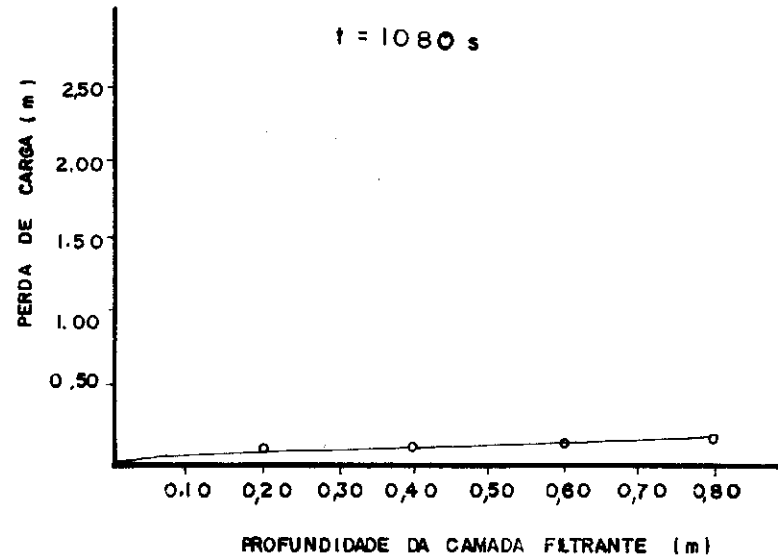
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)																	
				(E)10 (T)	(E)20 (T)	(E)30 (T)	(E)50 (T)	(E)80 (T)	(E)120 (T)	(E)140 (T)	(E)160 (T)	(E)180 (T)	(E)20 (T)	(E)40 (T)	(E)60 (T)	(E)80 (T)					
8:21	1080	27	1,40	0,77	-	0,67	-	0,59	-	0,51	-	0,41	-	0,05	0,04	0,09	0,09	0,013	0,13	0,17	0,17
12:10	14.820	29	1,50	0,21	-	0,20	-	0,21	-	0,20	-	0,19	-	0,12	0,13	0,16	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
16:03	28.800	29	1,60	0,71	1,59	0,22	-	0,21	-	0,20	-	0,20	-	0,25	0,26	0,29	0,30	0,33	0,34	0,37	0,39
20:13	43.800	28	1,60	0,82	1,60	0,54	1,52	0,23	-	0,21	-	0,21	-	0,41	0,36	0,47	0,43	0,51	0,47	0,55	0,52
00:01	57.480	28	1,60	0,90	1,60	0,45	1,60	0,40	0,90	0,23	-	0,22	-	0,42	0,36	0,55	0,54	0,62	0,58	0,66	0,63
04:17	72.840	27	1,50	1,10	1,50	0,67	1,50	0,50	1,49	0,23	-	0,20	-	0,54	0,36	0,64	0,63	0,72	0,66	0,77	0,72

OBS: AS COLUNAS À ESQUERDA E MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

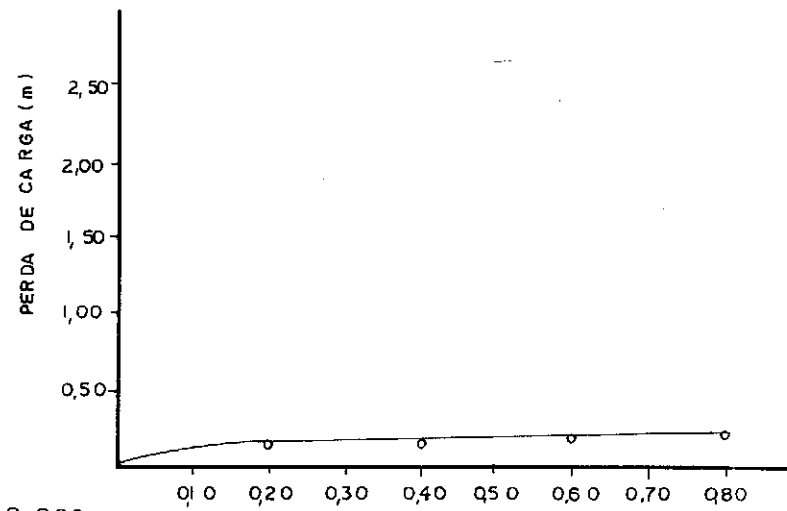
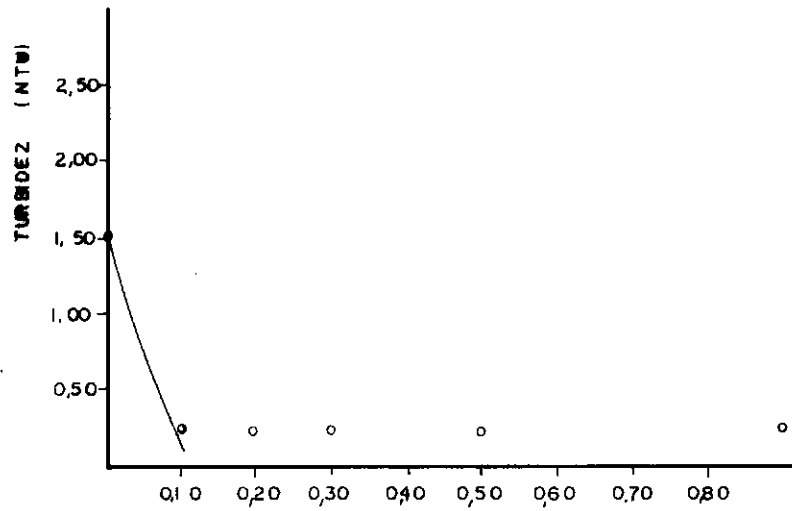
L E G E N D A

○ - DADOS EXPERIMENTAIS

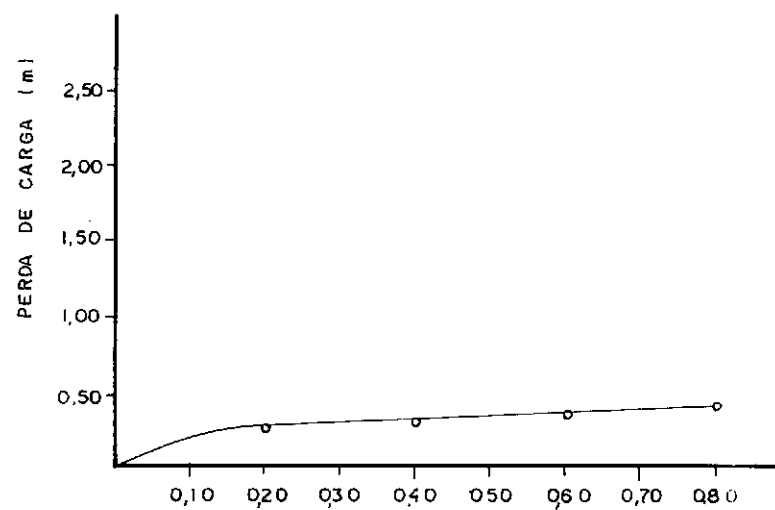
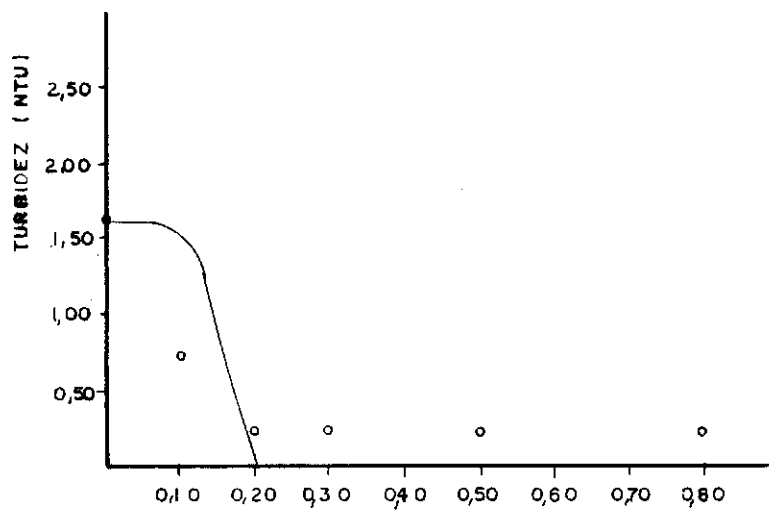
— CURVA TEÓRICA



$t = 14.820 \text{ s}$



$t = 28.800 \text{ s}$

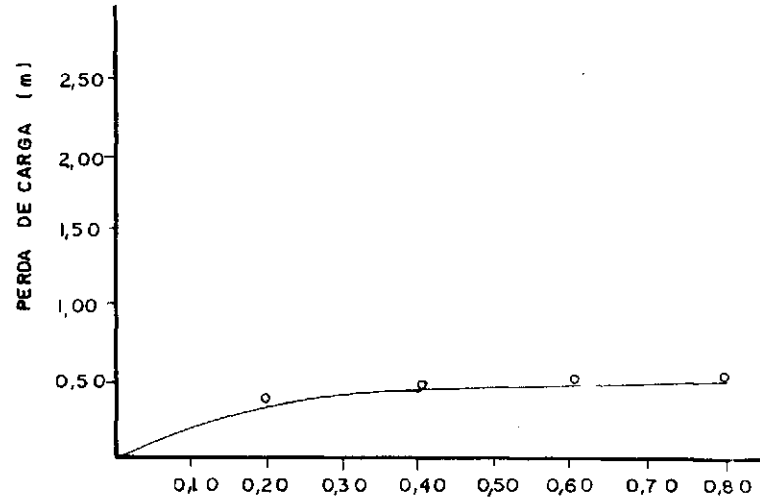
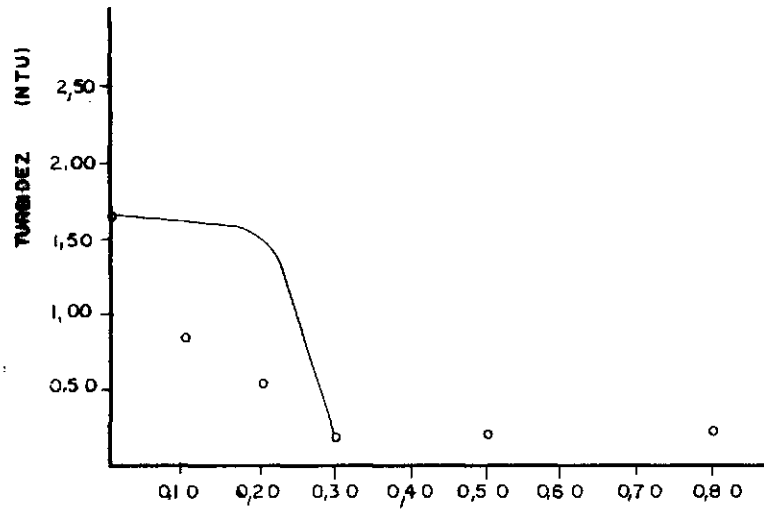


PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)

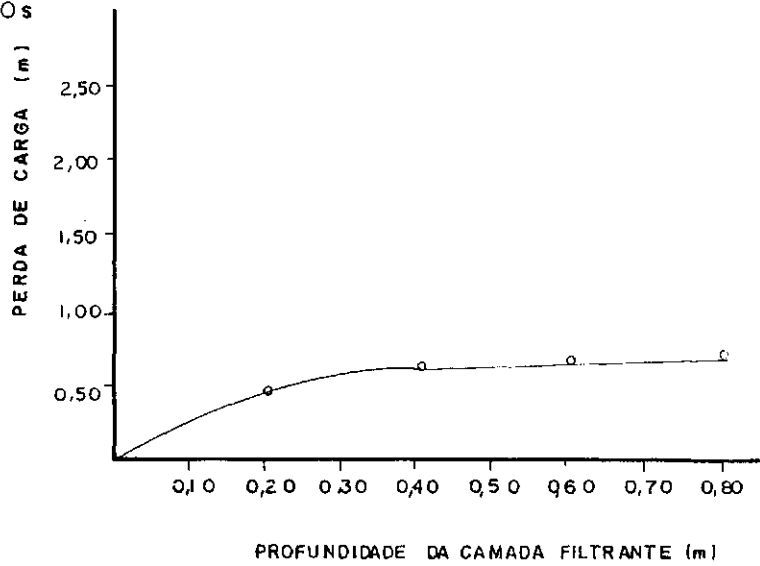
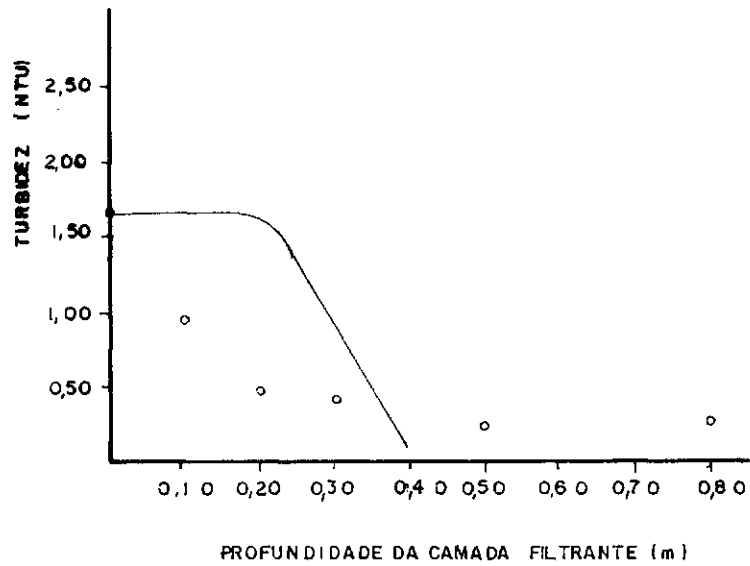
PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)



t = 43,800 s



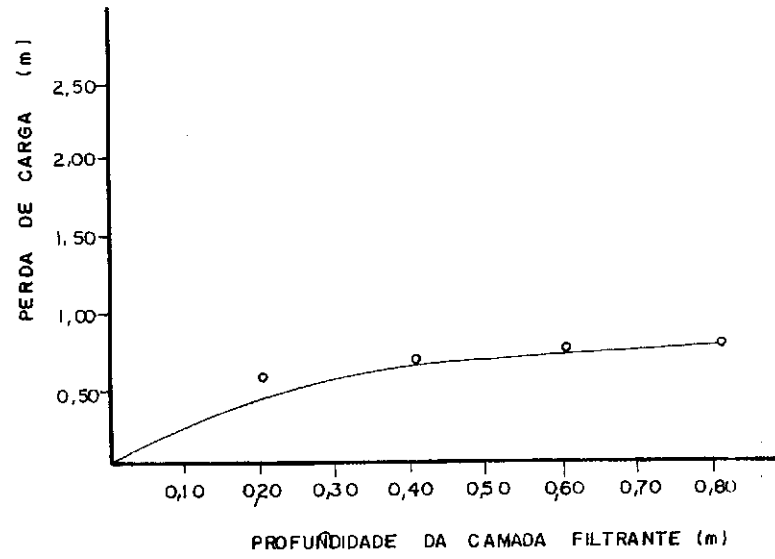
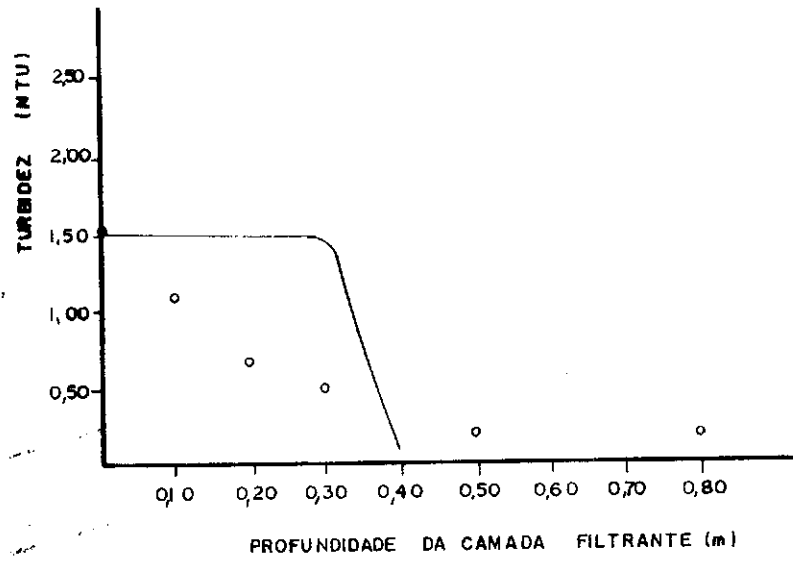
t = 57,480 s



PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)

PROFUNDIDADE DA CAMADA FILTRANTE (m)

t = 72 840 s



## ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

FILTRO Nº: 01 AREIA: 0,50 mm. TESTE Nº: 15 TAXA DE FILTRAÇÃO: 2,88 mm/s. DATA: 29 / 12 / 88 VOLUME FILTRADO: 1673 Litros.  
 DURAÇÃO: 629 min.  $J_0 = 0,56$ .

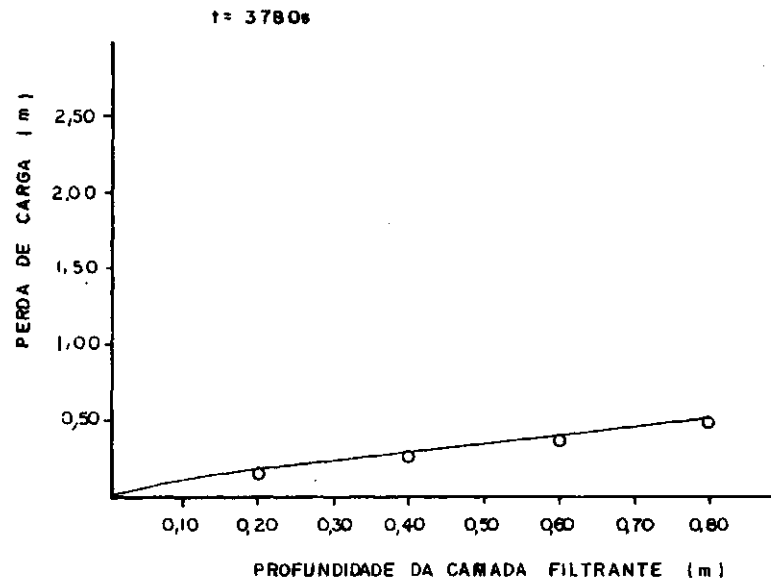
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE ( PROFUNDIDADE EM cm)										(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)				
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 80 (T)													
9:27	3780	26	1,50	0,43	-	0,36	-	0,34	-	0,36	-	0,25	-	0,16	0,18	0,29	0,30	0,38	0,41	0,49	0,52
12:15	13860	29	1,40	0,47	1,13	0,22	-	0,21	-	0,21	-	0,19	-	0,47	0,55	0,60	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89
14:58	23640	29	1,50	0,55	1,50	0,23	1,16	0,19	-	0,21	-	0,19	-	0,89	0,97	1,03	1,11	1,15	1,22	1,26	1,33
18:32	36480	29	1,30	0,60	1,30	0,30	1,30	0,25	0,36	0,22	-	0,18	-	1,25	1,02	1,42	1,44	1,54	1,55	1,65	1,66

OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

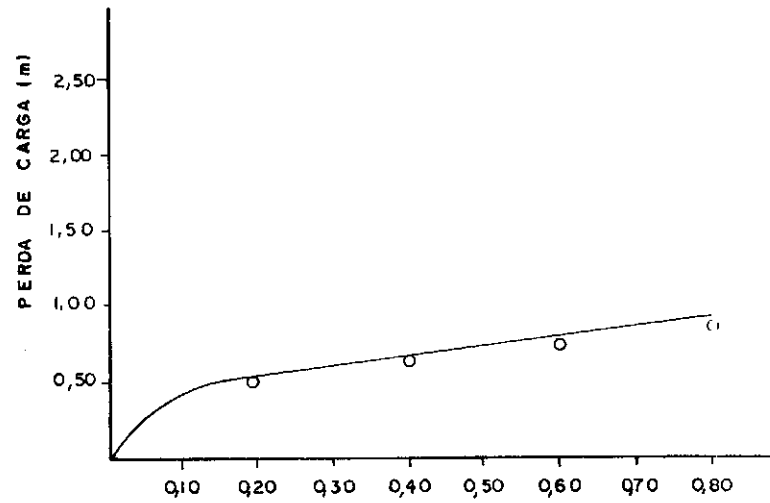
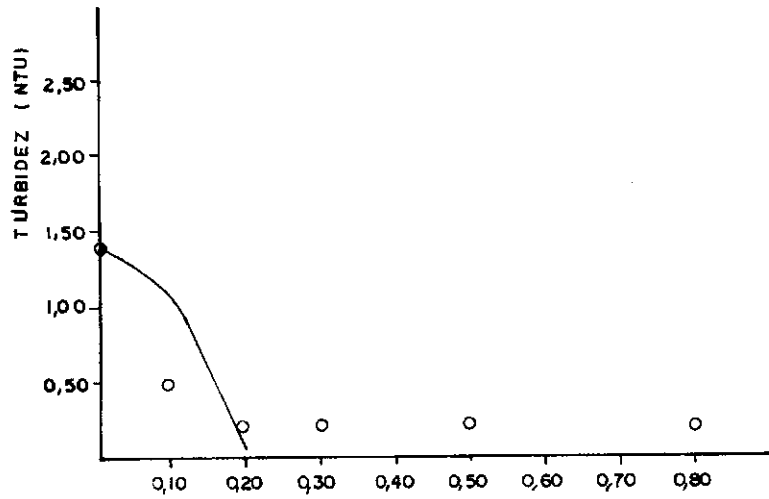
### LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

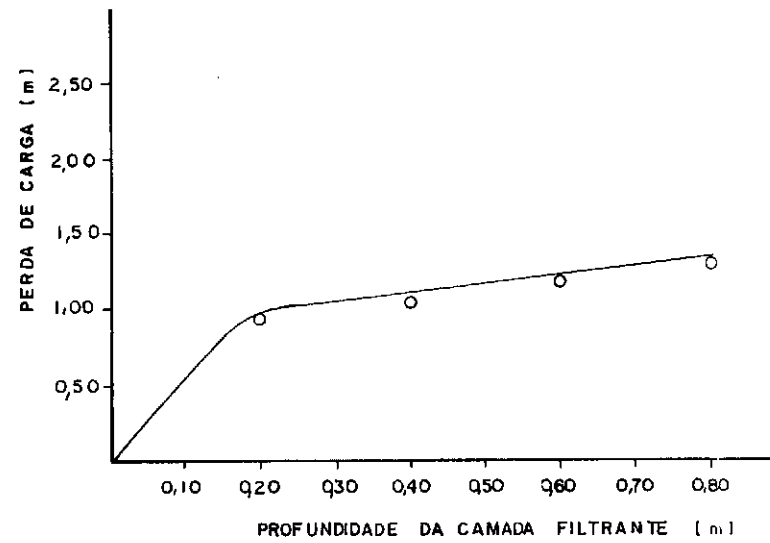
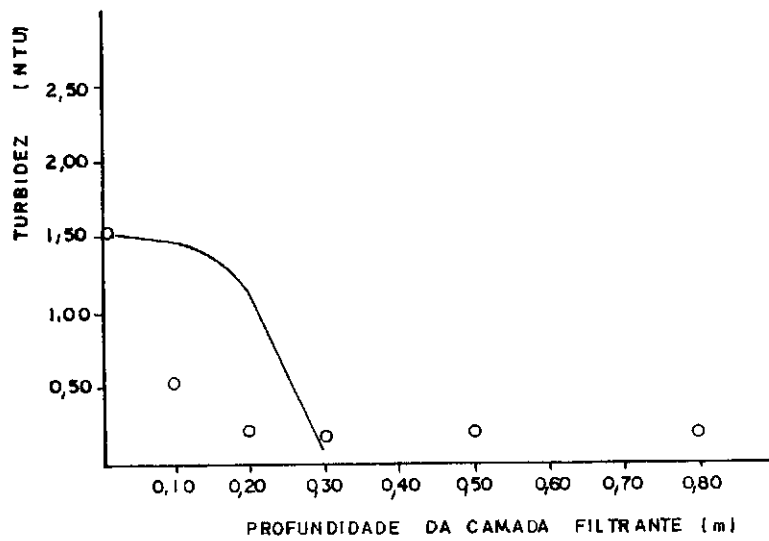
— - CURVA TEÓRICA.



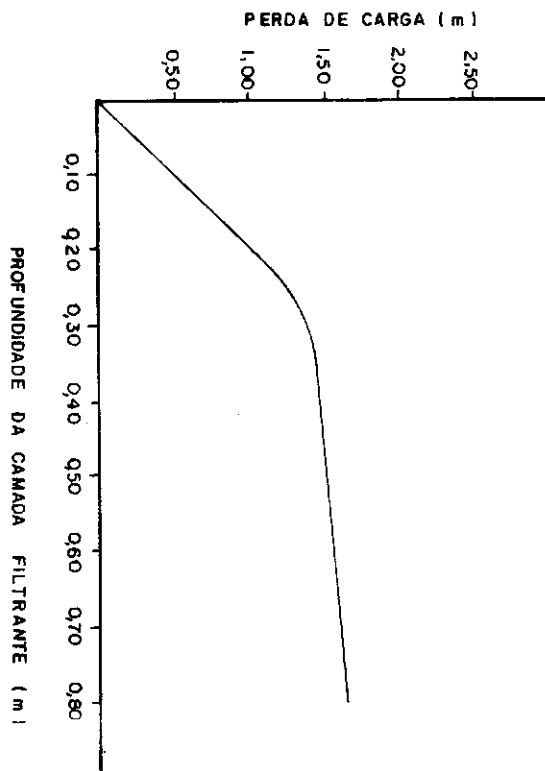
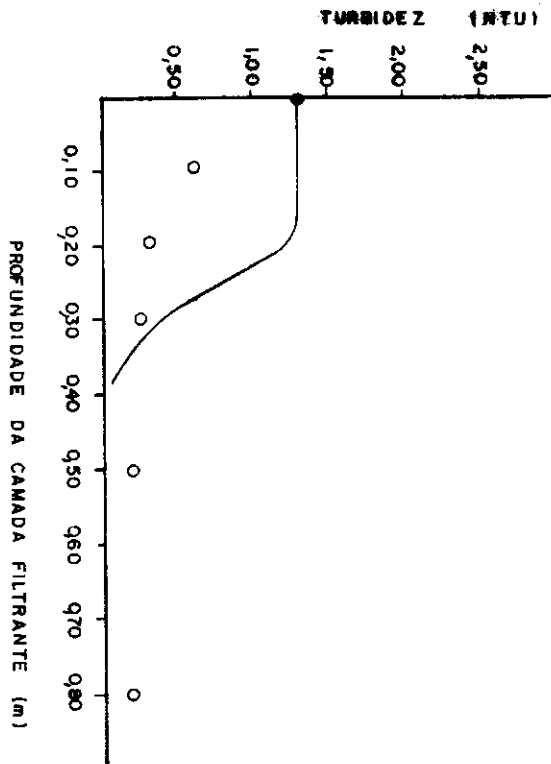
t = 13860 s



t = 23640 s



t = 36450 s



### ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE.

FILTRO Nº 02 AREIA: 0,59 TESTE Nº: 15 TAXA DE FILTRAÇÃO: 2,83 mm/s DATA 15 / 12 / 89 VOLUME FILTRADO: 1610,0 litros.  
 DURAÇÃO: 617 min.  $T_0 = \underline{0,39}$

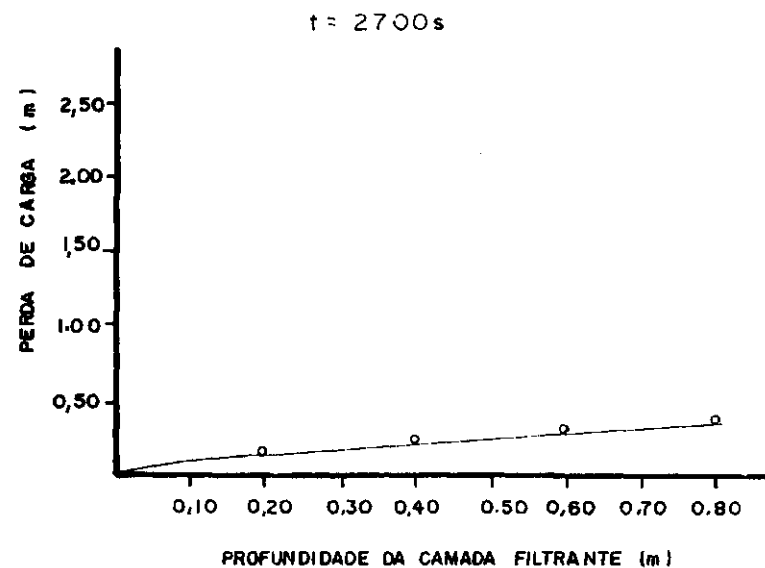
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m)								
			AFLUENTE	EFLUENTE PROFUNDIDADE EM (Cm)										PROFUNDIDADE EM Cm							
				(E) 10 (T)	(E) 20 (T)	(E) 30 (T)	(E) 50 (T)	(E) 60 (T)	(E) 20 (T)	(E) 40 (T)	(E) 60 (T)	(E) 80 (T)									
9:21	2700	26	1,50	0,61	-	0,43	-	0,40	-	0,37	-	0,26	-	0,12	0,10	0,20	0,18	0,28	0,26	0,36	0,34
12:17	13.260	29	1,40	0,40	0,91	0,23	-	0,21	-	0,20	-	0,21	-	0,30	0,32	0,37	0,40	0,45	0,48	0,53	0,56
14:59	19.380	29	1,50	0,56	1,47	0,41	0,35	0,22	-	0,21	-	0,19	-	0,50	0,51	0,62	0,59	0,72	0,67	0,80	0,75
18:34	35.880	29	1,30	0,59	1,30	0,40	1,28	0,33	0,38	0,20	-	0,17	-	0,79	0,68	0,94	0,91	1,07	0,99	1,15	1,07

OBS. AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

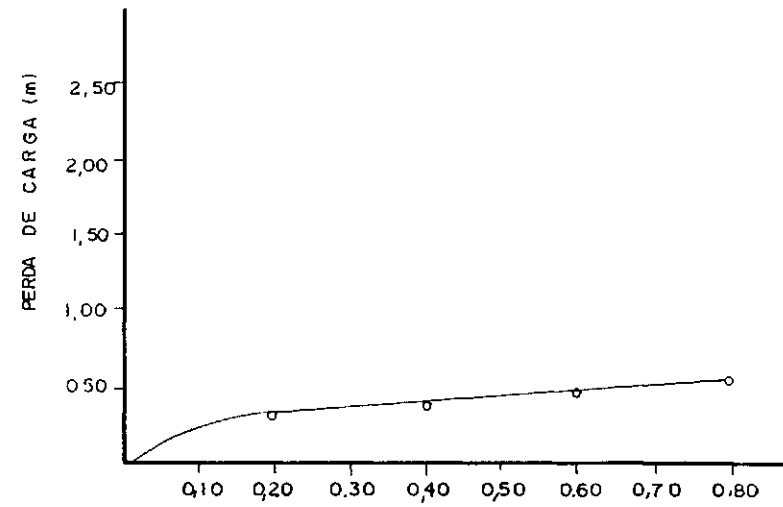
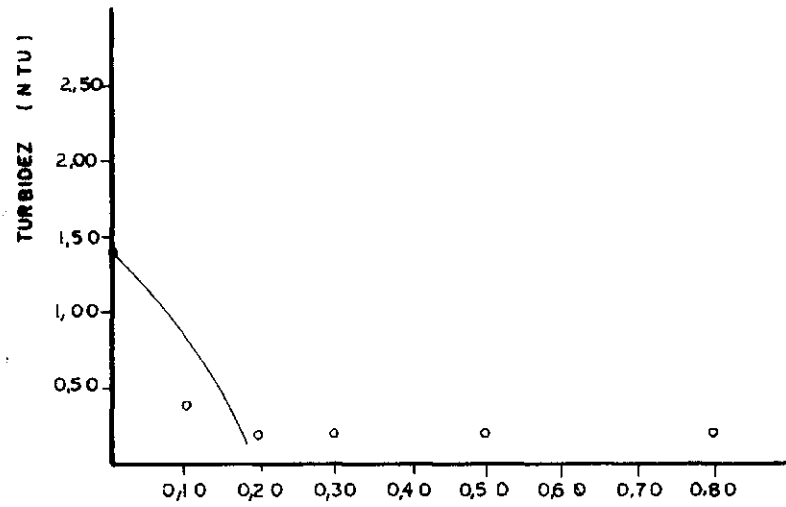
#### L E G E N D A

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

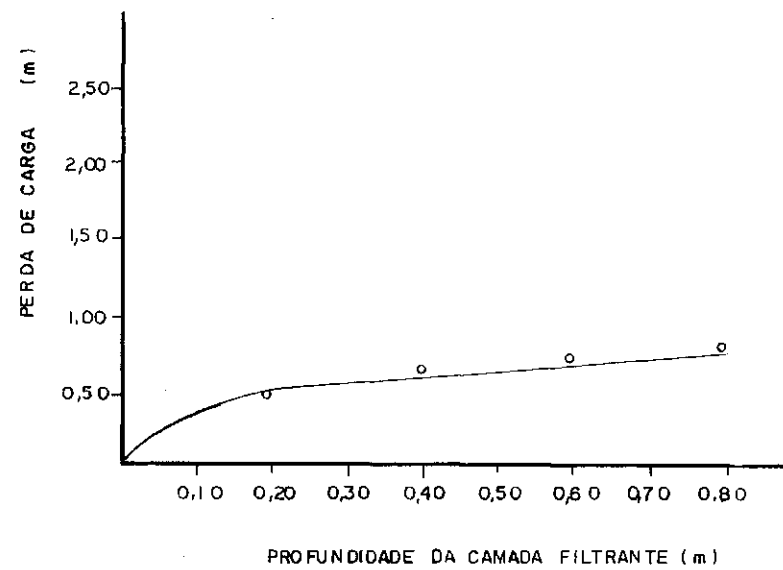
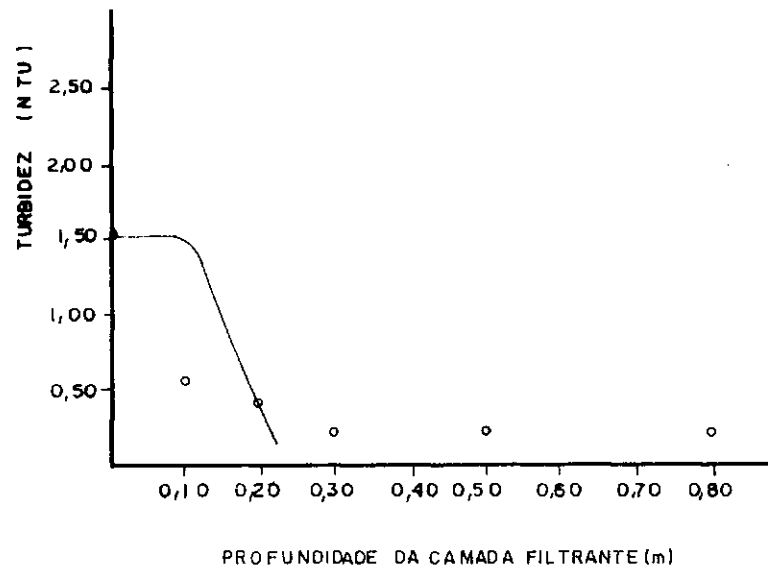
— - CURVA TEÓRICA.



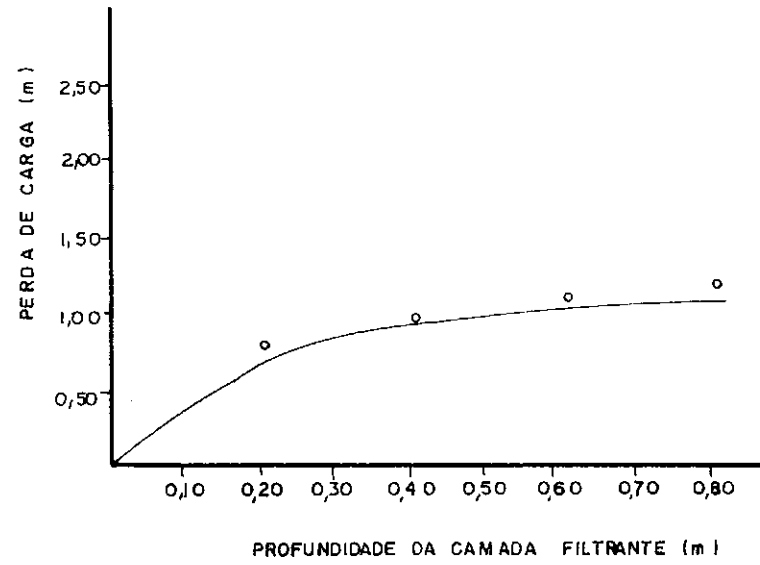
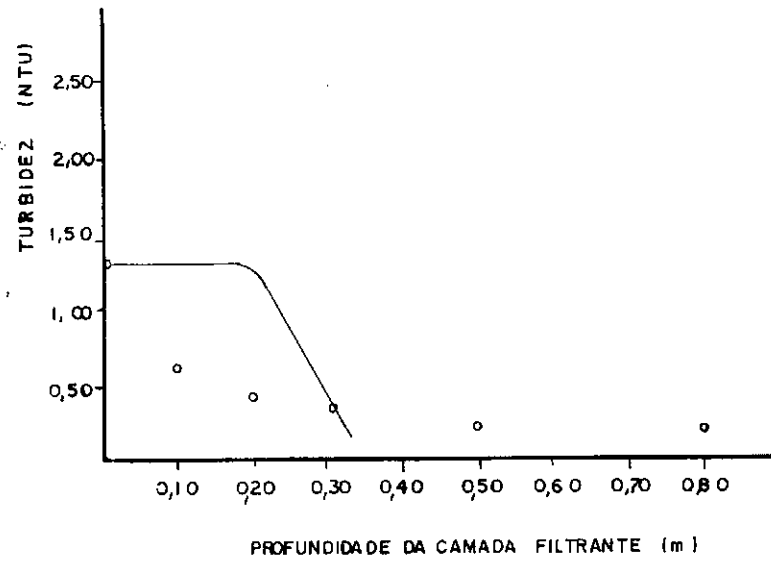
t = 13.260 s



t = 19.390 s



t = 30.880 s





ESTUDOS EM FILTRO PILOTO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO GAVIÃO - FORTALEZA - CE

FILTRO Nº 03

AREIA: 0,89

TESTE Nº: 15

TAXA DE FILTRAÇÃO: 2,99 m m/s

DATA: 29 / 12 / 88

VOLUME FILTRADO: 1672,0 Litros

DURAÇÃO: 606 min.

$I_0 = 0,30$

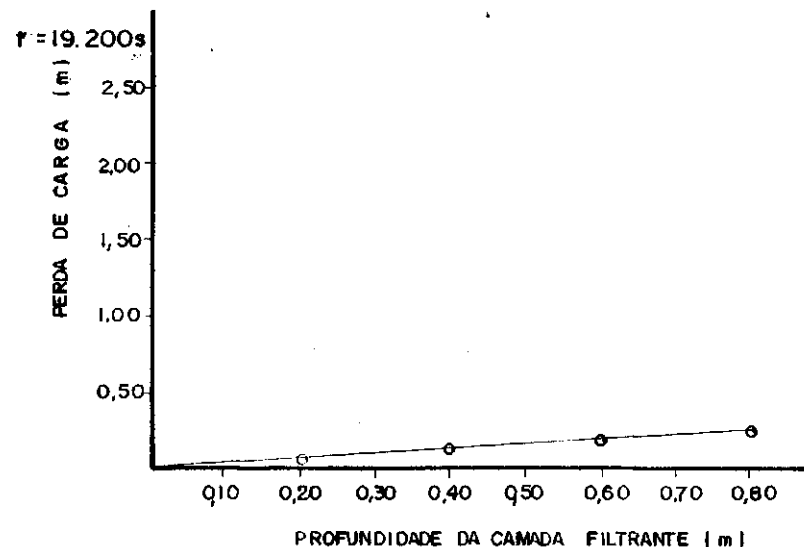
HORA DA LEITURA	TEMPO DE FILTRAÇÃO (s)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TURBIDEZ (NTU)										PERDA DE CARGA (m) (PROFUNDIDADE EM cm)								
			AFLUENTE	EFLUENTE (PROFUNDIDADE EM cm)										(E)20 (T)	(E)40 (T)	(E)60 (T)	(E)80 (T)				
				(E)10 (T)	(E)20 (T)	(E)30 (T)	(E)50 (T)	(E)80 (T)													
9:20	1920	26	1,50	0,51	—	0,49	—	0,44	—	0,43	—	0,32	—	0,05	0,07	0,11	0,13	0,17	0,19	0,23	0,25
12:18	12.600	29	1,40	0,82	0,86	0,32	—	0,20	—	0,21	—	0,20	—	0,21	0,20	0,28	0,26	0,35	0,32	0,41	0,38
15:00	22.320	29	1,50	0,85	1,45	0,35	0,93	0,25	—	0,20	—	0,19	—	0,44	0,40	0,52	0,48	0,59	0,54	0,65	0,60
18:35	35.220	29	1,30	0,88	1,30	1,47	1,23	0,30	0,62	0,19	—	0,17	—	0,59	0,48	0,69	0,65	0,77	0,71	0,83	0,77

OBS - AS COLUNAS À ESQUERDA (E) MOSTRAM DADOS EXPERIMENTAIS E À DIREITA (T) VALORES TEÓRICOS.

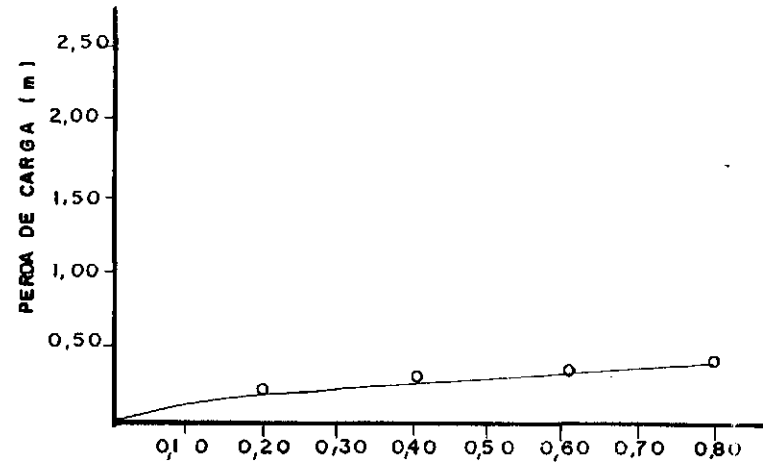
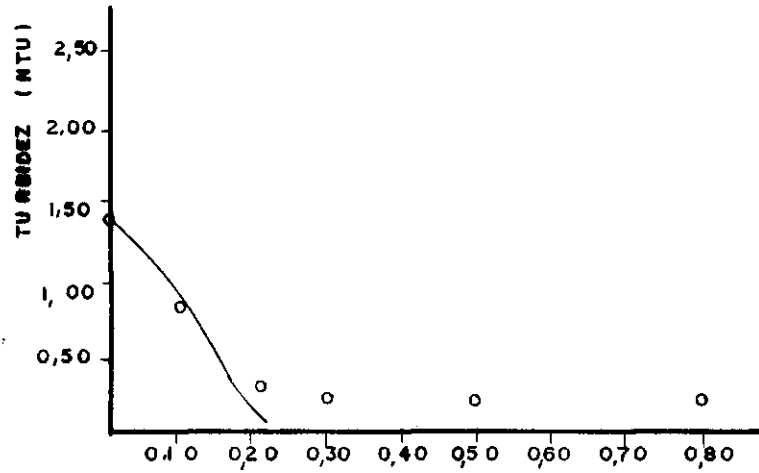
LEGENDA

○ - DADOS EXPERIMENTAIS.

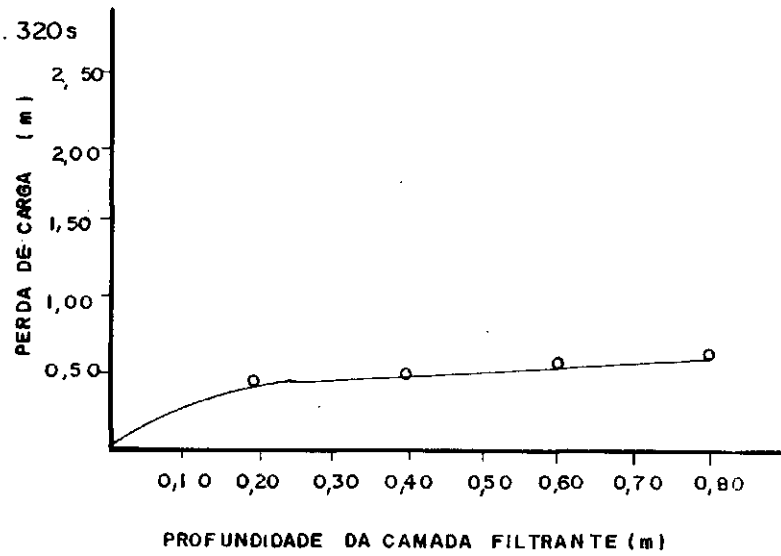
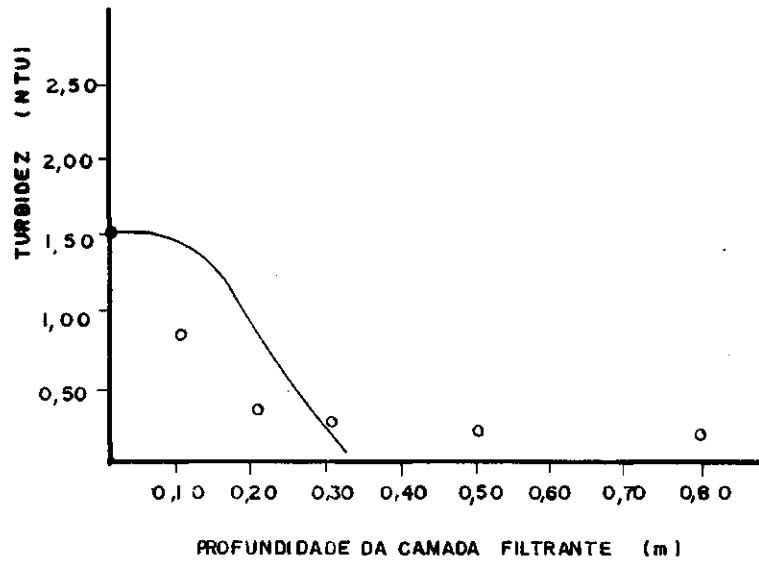
— — CURVA TEÓRICA.



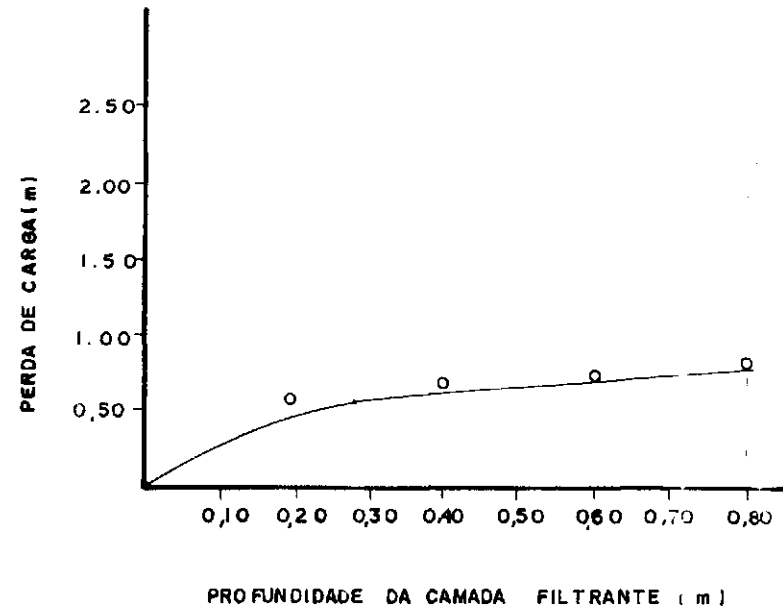
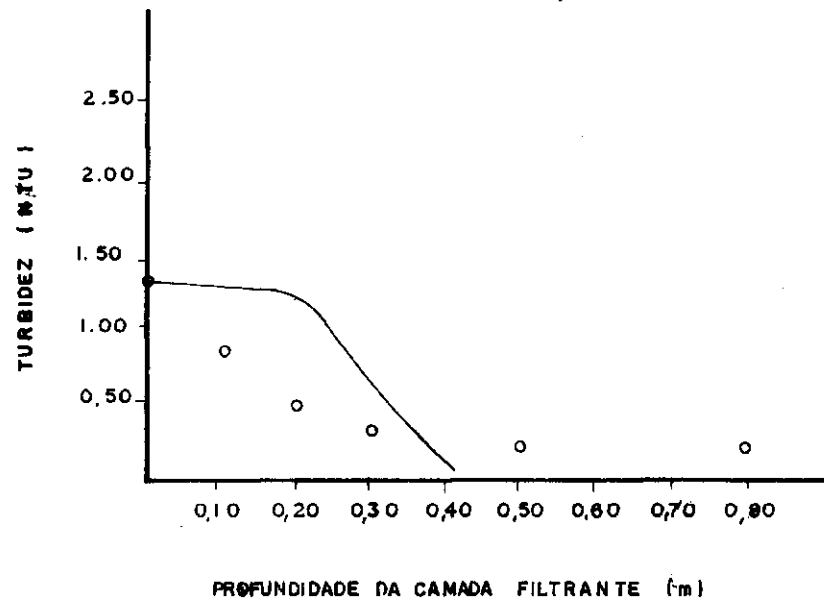
t = 12.600 s



t = 22.320 s



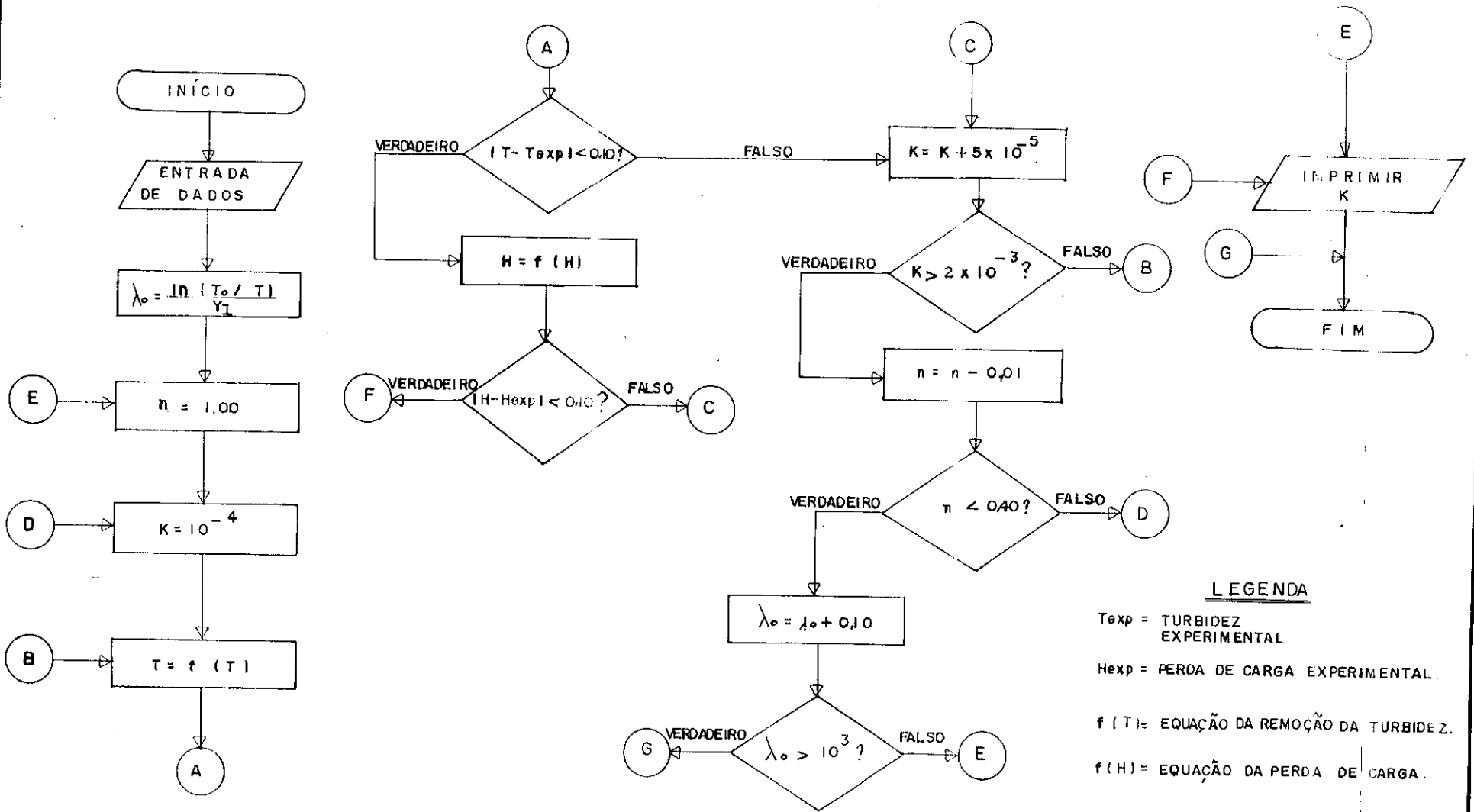
t = 35.220s



ANEXO II

Fluxogramas dos Programas para Computador Utilizado na Pesquisa.

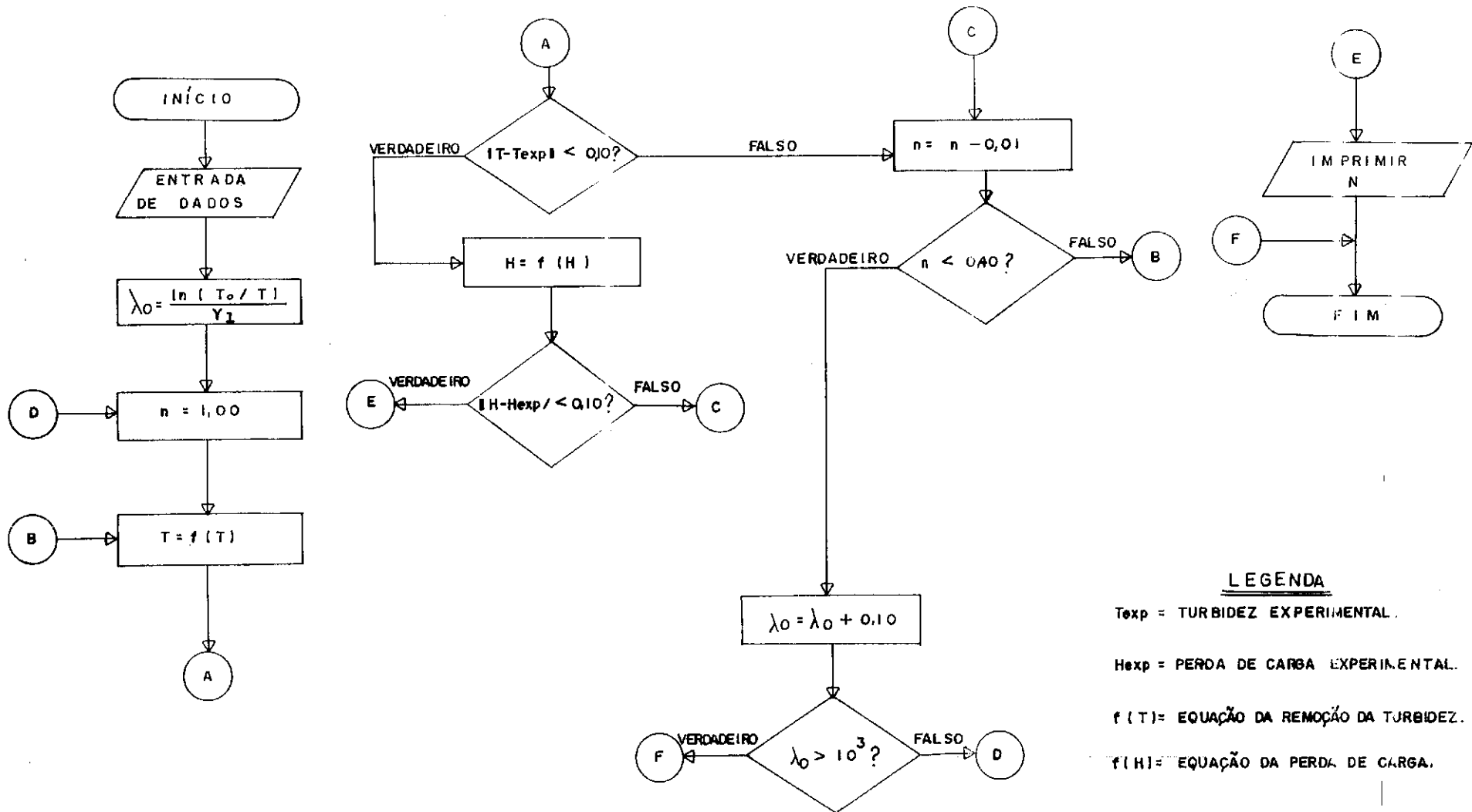
# FLUXOGRAMA I



### LEGENDA

- T<sub>exp</sub> = TURBIDEZ EXPERIMENTAL
- H<sub>exp</sub> = PERDA DE CARGA EXPERIMENTAL
- f(T) = EQUAÇÃO DA REMOÇÃO DA TURBIDEZ.
- f(H) = EQUAÇÃO DA PERDA DE CARGA.

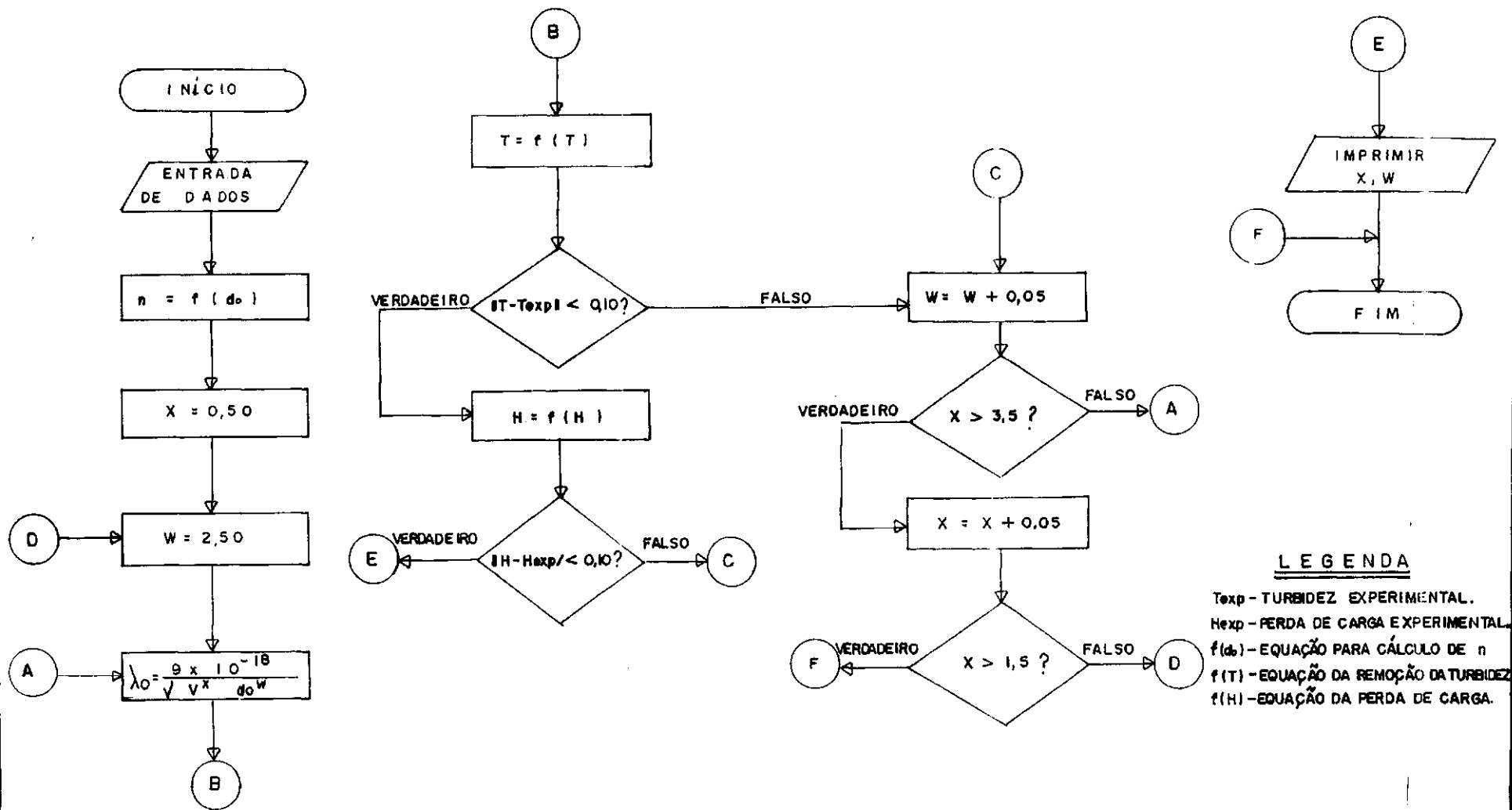
## FLUXOGRAMA II



### LEGENDA

- T<sub>exp</sub> = TURBIDEZ EXPERIMENTAL.
- H<sub>exp</sub> = PERDA DE CARGA EXPERIMENTAL.
- f(T) = EQUAÇÃO DA REMOÇÃO DA TURBIDEZ.
- f(H) = EQUAÇÃO DA PERDA DE CARGA.

### FLUXOGRAMA III



#### LEGENDA

- T<sub>exp</sub> - TURBIDEZ EXPERIMENTAL.
- H<sub>exp</sub> - PERDA DE CARGA EXPERIMENTAL.
- f(d<sub>0</sub>) - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DE n
- f(T) - EQUAÇÃO DA REMOÇÃO DA TURBIDEZ
- f(H) - EQUAÇÃO DA PERDA DE CARGA.

## BIBLIOGRAFIA

1. Lerk, C. F. & Heertjes, P. M., "The functioning of deep bed filters - Part I - The filtration of flocculated suspension" - Transaction of the Institute of chemical Engineers, T.138 1967.
2. Hazen Allen. "On Sedimentation". Journal ASCE, Vol. 53, p. 45, 1904.
3. Iwasaki, T., "Some Notes on Sand Filtration", Journal of AWWA, vol. 29, p. 1591 oct. 1937.
4. Maroudas, A & Eisenklam, P. "Clarification of Suspensions: a Study of Deposition Particle in Granular Media. Part 2: A theory of clarification". Chemical Engineering Science, Vol. 20, oct. 1965.
5. Ives, K. J., "Theory of Filtration", London, International Water Supply Congress and Exhibition", Special Subject n<sup>o</sup> 7, 1969.
6. Mackerle V. & Mackrle, S., "Adhesion in Filters". Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 87, p. 17-32, set. 1961.
7. Huisman, L, "Rapid Filtration", Delft, Delft University of Tecnology. 1984. 190p.
8. Corstjens, G. H., Journal H<sub>2</sub>O, Delft, Delft University of Tecnology 1972.
9. Geldreich, E. E., "The necessity of Controlling Bacterial Populations in Potable Watter: Community Water Supply" Journal of A.W.W.A., Vol. 64 (9), sept. 1972.



10. Amirtharajah, A e Wetstein, P., " Initial Degradation of Effluent Quality During Filtration", Journal of A.W.W.A., Vol. 72 (9), sept. 1980.
11. Ling, Joseph Tso-Ti, "A Study of Filtration through Uniform Sand Filter", Journal A.S.C.E., Vol. 81, paper nº 751, jul. 1955.
12. Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ciencias del Ambiente, "Teoria, Diseño e Control de los Processos de Clarificación del Agua", Peru. 1973. 558p.
13. \_\_\_\_\_, "Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua", Peru. 1973. 295p.
14. Pacitti, Tércio & Afkinson, Cyril P., "Programação e Métodos Computacionais", Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976. Vol. 2, 665p.
15. Barbosa, Luizmar Pimenta, "Estudo do Carvão de Coco Babaçu como Material Poroso para Filtros ", Dissertação de Mestrado, UFPb, Campina Grande, 1978, 131p.