

USP

Campus de São Carlos

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO
PARA OBTENÇÃO DE
PARÂMETROS DE PROJETO E
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE
FILTRAÇÃO COM TAXA
DECLINANTE

**Bernardo Arantes do Nascimento
Teixeira**

Orientador: Luiz Di Bernardo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA OBTENÇÃO
DE PARÂMETROS DE PROJETO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS
DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE.

Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

nº 596-REPIDISCA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO



PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE
PARÂMETROS DE PROJETO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS
DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE.

Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

Tese apresentada à Escola
de Engenharia de São Car-
los, da Universidade de
São Paulo, para a obtenção
do Título de Doutor em En-
genharia: Hidráulica e Sa-
neamento.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017194

São Carlos
Estado de São Paulo

Maio, 1991

Para:

SARAH,

HAYDÉE,

MARIANA e LAURA,

(que me ajudam a ver o sentido das coisas)

e OLEGÁRIO.

(cuja lembrança às vezes me embaça a visão)

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

Ao Prof. Luiz Di Bernardo, pela orientação segura, os ensinamentos transmitidos, o apoio e a confiança durante a realização do presente trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo estímulo, os auxílios e a convivência amiga.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de Doutorado (Proc. 86/2367-0) e pela concessão de auxílio para a montagem da instalação experimental (Proc. 86/3182-3).

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), pela permissão de montagem da instalação experimental nas dependências da Estação de Tratamento de Água.

Aos funcionários da Estação de Tratamento de Água de São Carlos, pelo apoio durante a realização da fase experimental.

E, finalmente, a Haydée, Mariana e Laura, pelas presenças, a paciência, a motivação e o amor.

S U M Á R I O

	pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. MÉTODOS DE OPERAÇÃO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE	5
3.2. HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE	14
3.3. CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE	21
3.4. COMPORTAMENTOS DESCRITOS PARA SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL	33
4. METODOLOGIA	46
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.1.1. Características do Método Proposto	46
4.1.2. Etapas de Desenvolvimento da Pesquisa	48
4.2. PRIMEIRA ETAPA: OPERAÇÃO COM TAXA CONSTANTE	49
4.2.1. Instalação Piloto	49
4.2.2. Metodologia dos Ensaios	53
4.3. SEGUNDA ETAPA: SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO COM TAXA DECLINANTE	56
4.4. TERCEIRA ETAPA: OPERAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL	57
4.4.1. Instalação Piloto	57
4.4.2. Metodologia dos Ensaios	62
5. RESULTADOS	66
5.1. PRIMEIRA ETAPA	66
5.1.1. Determinação Inicial das Curvas de Perda de Carga	66
5.1.2. Operação com Taxas de Filtração Constantes	69

	pág.
5.2. SEGUNDA ETAPA	72
5.3. TERCEIRA ETAPA	73
5.3.1. Determinação das Curvas de Perda de Carga	73
5.3.2. Operação com Taxas de Filtração Declinantes	74
5.3.3. Operação do Filtro Independente	76
6. DISCUSSÃO	78
6.1. PRIMEIRA ETAPA	78
6.1.1. Perdas de Carga Iniciais	78
6.1.2. Ensaio com Taxa Constante	81
6.2. SEGUNDA ETAPA	86
6.3. TERCEIRA ETAPA	88
6.3.1. Avaliação da Operação do SFTD Experimental	88
6.3.2. Comparação entre Simulação e Operação Real do SFTD	96
6.3.3. Comparação entre a Operação do SFTD e a do Filtro F5	98
6.3.4. Verificação do Método de Levantamento de Dados Proposto	100
6.3.5. Descrição Final do Método Proposto	104
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICE "A" - Quadros com os Dados de Perda de Carga e Turbidez dos Ensaio da Primeira Etapa	113
APÊNDICE "B" - Curvas com Valores de Perda de Carga Total e de Turbidez do Afluente e do Efluente, em Função do Tempo, nos Ensaio da Primeira Etapa	129
APÊNDICE "C" - Curvas com Valores de Perdas de Carga ao Longo do Meio Filtrante, em Função do Tempo, nos Ensaio da Primeira Etapa	140
APÊNDICE "D" - Resultados de Simulações do Comportamento de um SFTD em Computador	150

	pág.
APÊNDICE "E" - Representação Gráfica dos Resultados de Simulações do Comportamento de SFTD	154
APÊNDICE "F" - Quadros com Dados de Perda de Carga Total, Taxas de Filtração e Turbidez dos Ensaios da Terceira Etapa	158
APÊNDICE "G" - Curvas com Valores da Perda de Carga Total e das Taxas de Filtração, em Função do Tempo, nos Ensaios da Terceira Etapa	173
APÊNDICE "H" - Quadros com Valores das Taxas de Filtração em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa	183
APÊNDICE "I" - Quadros com Valores de Turbidez Média do Afluente e dos Efluentes em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa	187
APÊNDICE "J" - Curvas de Medição Contínua da Turbidez do Afluente e dos Efluentes em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa	191
APÊNDICE "L" - Curvas com Valores das Perdas de Carga ao Longo do Meio Filtrante, em Função do Tempo, em Alguns Ciclos da Terceira Etapa	197
APÊNDICE "M" - Quadros com Valores de Perda de Carga Total, Taxas de Filtração e Turbidez do Filtro Independente Operado na Terceira Etapa	201
APÊNDICE "N" - Testes de Significância das Diferenças entre os Valores Médios do Coeficiente <u>a</u>	206

L I S T A D E S Í M B O L O S

- A = área de um filtro, em planta (L^2)
- A_t = área total dos filtros, em planta (L^2)
- a = coeficiente de variação da perda de carga com o tempo (dimensão inversa à de C_0)
- a^* = coeficiente de variação da perda de carga com o tempo (LT^{-1})
- BI = índice de traspasse (modelo de Hudson) (L^4T^{-1})
- b = constante (modelo de Arboleda et alii) adimensional
- C_e = coeficiente de esfericidade dos grãos do meio filtrante
- C_0 = concentração de partículas no afluente ao filtro (expressa como turbidez, número de partículas, sólidos suspensos etc.)
- d = tamanho dos grãos do meio filtrante (L)
- \bar{d} = média geométrica das aberturas de duas peneiras consecutivas da série granulométrica (L)
- d_{10} = tamanho efetivo dos grãos do meio filtrante (L)
- d_{60} = tamanho correspondente a 60% , em peso, dos grãos retidos nas peneiras da série granulométrica (L)
- F = relação entre a taxa máxima e a taxa média de filtração num SFTD
- g = aceleração da gravidade (LT^{-2})
- H = perda de carga ou carga hidráulica total (L)
- H_0 = perda de carga total inicial (L)
- h = perda de carga devida à retenção de impurezas no filtro (L)
- h_d = altura de água sobre o meio filtrante (L)
- h_m = perda de carga no meio filtrante limpo (L)
- h_t = perda de carga turbulenta (L)
- K = coeficiente de permeabilidade (LT^{-1})
- K_0 = coeficiente de permeabilidade no meio filtrante limpo (LT^{-1})
- K' = coeficiente de perda de carga laminar (T)
- K'_0 = coeficiente de perda de carga laminar inicial (T)

K_t = coeficiente de perda de carga turbulenta ($L^{-5}T^2$)
 k = coeficiente de perda de carga devida à retenção de impurezas (T)
 L = espessura do meio filtrante (L)
 N_0 = nível inicial de operação de um SFTD (L)
 N_1 = nível mínimo de operação de um SFTD (L)
 N_2 = nível máximo de operação de um SFTD (L)
 N_3 = nível máximo durante a lavagem de uma unidade de um SFTD (L)
 n = coeficiente (modelos de Mintz e de Shekhtman) adimensional
 P = volume filtrado adimensional
 p = porcentagem do meio filtrante compreendida entre duas peneiras consecutivas da série granulométrica
 Q = vazão total num sistema de filtração (L^3T^{-1})
 q = vazão através de um filtro (L^3T^{-1})
 T = tempo adimensional
 t = tempo (T)
 V = volume de água filtrada (L^3)
 v = taxa ou velocidade de filtração (LT^{-1})
 α = constante (modelo de Arboleda et alii) adimensional
 β = constante (modelo de Arboleda et alii) adimensional
 δ = volume relativo de partículas retidas no filtro ($=\sigma/\epsilon_0$)
 ϵ_0 = porosidade no meio filtrante limpo
 ν = viscosidade cinemática (L^2T^{-1})
 σ = depósito específico (volume de partículas retidas/volume de meio filtrante)

Obs: as unidades de medida de perda de carga referem-se a altura de coluna de água.

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

	pág.
Figura 3.1. Variação da perda de carga com o tempo para o método de operação com carga hidráulica, resistência do filtro e taxa de filtração constantes.	7
Figura 3.2. Variação da taxa de filtração com o tempo na operação com taxa declinante verdadeira.	8
Figura 3.3. Arranjo típico de um filtro operando com distribuição equitativa de vazão.	9
Figura 3.4. Arranjo típico de um filtro operando com taxa declinante variável.	10
Figura 3.5. Variações típicas dos níveis d'água e das taxas de filtração num sistema operando com taxa declinante variável.	11
Figura 3.6. Arranjo típico de um filtro operando com taxa declinante variável, com armazenamento a montante dos filtros.	12
Figura 3.7. Curvas utilizadas para projeto de filtro com taxa declinante segundo Hudson.	22
Figura 3.8. Variação das perdas de carga e dos níveis de operação com as taxas de filtração em um sistema com taxa declinante variável.	25
Figura 3.9. Variação da taxa de filtração e das perdas de carga ao longo do tempo para um SFTD variável, segundo Cleasby (1972a).	33
Figura 3.10. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração, observadas na investigação experimental de Di Bernardo & Cleasby (1980).	35
Figura 3.11. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração obtidas por Gregory e Yadav em Medmenhan, segundo Arboleda et alii (1985).	36
Figura 3.12. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração obtidas por Gregory e Yadav em Burham, segundo Arboleda et alii (1985).	37
Figura 3.13. Variações das taxas de filtração com o tempo, na ETA "Northwest River", em Chesapeake, EUA.	39

	pág.
Figura 3.14. Variações das taxas de filtração e dos níveis no canal comum de distribuição de água, para uma taxa média de 292 m ³ /m ² .d, obtidas numa ETA.	40
Figura 3.15. Variações das taxas de filtração e do nível d'água num sistema de filtração com taxa declinante variável em que o armazenamento a montante dos filtros é significativo.	41
Figura 3.16. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD, para dois valores de perda de carga turbulenta.	42
Figura 3.17. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD, com taxa média alta e três valores de perda de carga turbulenta.	43
Figura 3.18. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD com seis unidades, para dois valores de perda de carga turbulenta.	44
Figura 4.1. Curvas típicas de variação das perdas de carga totais com o tempo, para diferentes taxas de filtração.	47
Figura 4.2. Esquema da instalação piloto utilizada na primeira etapa da pesquisa, mostrando apenas um dos quatro filtros empregados.	50
Figura 4.3. Detalhe do sistema de alimentação dos filtros pilotos, mostrando os rotâmetros e as válvulas para ajuste da vazão afluyente a cada unidade.	51
Figura 4.4. Vista dos turbidímetros de escoamento contínuo.	53
Figura 4.5. Esquema do SFTD experimental utilizado na terceira etapa da pesquisa, mostrando apenas um dos quatro filtros da bateria.	58
Figura 4.6. Vista da caixa de nível constante e dos trechos iniciais das tubulações de alimentação dos filtros da instalação experimental da terceira etapa.	59
Figura 4.7. Disposição das tubulações de entrada do SFTD experimental da terceira etapa.	60
Figura 4.8. Esquema da disposição das tubulações de saída do SFTD experimental.	61
Figura 4.9. Filtros pilotos utilizados na terceira etapa da pesquisa.	61

	pág.
Figura 5.1. Curvas com valores das perdas de carga nos meios filtrantes limpos e nas saídas dos filtros, em função das taxas de filtração, na primeira etapa	68
Figuras B.1 a B.10. Curvas com valores de perda de carga total e de turbidez do afluente e do efluente, em função do tempo, nos ensaios da primeira etapa.	130 a 139
Figuras C.1 a C.9. Curvas com valores das perdas de carga ao longo do meio filtrante, em função do tempo, nos ensaios da primeira etapa.	141 a 149
Figuras E.1 a E.3. Representação gráfica dos resultados de simulações do comportamento de SFTD.	155 a 157
Figuras G.1 a G.3. Curvas com valores da perda de carga total e das taxas de filtração, em função do tempo, nos ensaios da terceira etapa.	174 a 182
Figuras J.1 a J.5. Curvas de medição contínua da turbidez do afluente e dos efluentes, em alguns ciclos do SFTD experimental da terceira etapa.	192 a 196
Figuras L.1 a L.3. Curvas com valores das perdas de carga ao longo do meio filtrante, em função do tempo, em alguns ciclos da terceira etapa.	198 a 200

L I S T A D E Q U A D R O S

	pág.
Quadro 3.1. Métodos de operação de filtros	6
Quadro 3.2. Taxas de filtração e perdas de carga durante o processo repetitivo de um SFTD variável.	31
Quadro 5.1. Valores das perdas de carga nas saídas dos filtros pilotos e respectivas taxas de filtração, determinados experimentalmente antes do início dos ensaios da primeira etapa.	66
Quadro 5.2. Perdas de carga nos meios filtrantes limpos e respectivas taxas de filtração, antes do início da primeira etapa.	67
Quadro 5.3. Resumo dos principais resultados obtidos na primeira etapa.	71
Quadro 5.4. Valores das perdas de carga nas saídas dos filtros pilotos e respectivas taxas de filtração, determinados experimentalmente antes do início dos ensaios da terceira etapa.	74
Quadro 6.1. Determinação do coeficiente a para os ensaios da primeira etapa.	83
Quadro 6.2. Primeira comparação entre valores teóricos e experimentais das taxas de filtração e dos níveis de operação do SFTD.	96
Quadro 6.3. Segunda comparação entre valores teóricos e experimentais das taxas de filtração e dos níveis de operação do SFTD.	97
Quadro 6.4. Determinação do coeficiente a para os ensaios da terceira etapa.	101
Quadro 6.5. Comparação entre os tempos teóricos e experimentais de duração dos ciclos do SFTD.	102
Quadros A.1 a A.31. Dados de perda de carga e turbidez dos ensaios da primeira etapa.	114 128
Quadros F.1 a F.3. Dados de perda de carga total, taxas de filtração e turbidez dos ensaios da terceira etapa.	159 172
Quadros H.1 a H.3. Valores das taxas de filtração em alguns ciclos do SFTD experimental da terceira etapa.	184 186

	pág.
Quadros I.1 a I.3. Valores de turbidez média do afluente e dos efluentes em alguns ciclos do SFTD experimental da terceira etapa.	188 a 190
Quadros M.1 a M.3. Valores de perda de carga total, taxas de filtração e turbidez do filtro independente da terceira etapa.	202 a 205
Quadro N.1. Testes da significância das diferenças entre valores médios de <u>a</u> .	207

R E S U M O

Foi desenvolvida, por meio de considerações teóricas e de investigações experimentais, uma pesquisa a respeito de sistemas de filtração com taxa declinante variável (SFTD), tendo como principal objetivo a verificação de um método proposto para o levantamento de parâmetros de projeto e operação de tais sistemas. Segundo o método, a obtenção de dados referentes a um SFTD pode se dar a partir do emprego de um único filtro piloto de taxa constante, juntamente com a aplicação do modelo teórico desenvolvido por Di Bernardo. Numa primeira etapa, foram realizados, utilizando-se como afluente a água decantada da Estação de Tratamento de São Carlos, diversos ensaios de filtração com taxa constante e nível variável, procurando-se determinar um coeficiente de variação da perda de carga com o tempo, característico do meio filtrante utilizado. Foram também estabelecidas as curvas de variação das perdas de carga laminares e turbulentas em função das taxas de filtração, possibilitando, através do referido modelo teórico, a realização de simulações do comportamento de um SFTD, em computador. Foi, em seguida, montada e operada uma instalação piloto trabalhando como um SFTD, além de um filtro independente, operando em paralelo com taxa constante. O comportamento registrado no SFTD experimental foi o típico desse método de operação de filtros, com as taxas de filtração variando na forma de degraus e a caracterização dos níveis de operação mínimo e máximo. Os valores medidos para todos esses parâmetros foram, na média, bastante próximos dos obtidos através da simulação em computador, comprovando-se a adequação do modelo empregado. Observou-se também que a evolução da perda de carga total no SFTD era semelhante à do filtro independente, operado em paralelo com uma taxa correspondente à de um dos filtros da bateria com o mesmo estado de colmatação. Desta forma, constatou-se que o crescimento da perda de carga num SFTD é o mesmo de um filtro isolado que trabalha com uma taxa constante igual à taxa máxima daquele sistema. Como esta taxa pode ser determinada por meio da simulação teórica, a operação de um filtro piloto de taxa constante é suficiente para caracterizar o aumento da perda de carga no SFTD e, conseqüentemente, prever o tempo necessário para se atingir o nível máximo de operação, definindo a duração das carreiras de filtração. Este procedimento foi feito no final da pesquisa, comparando-se os tempos obtidos teoricamente, a partir do coeficiente de variação de perda de carga anteriormente calculado, com os efetivamente registrados durante a operação do SFTD. Os resultados bastante próximos entre os tempos teóricos e experimentais permitiram concluir pela validade do método de levantamento de dados proposto.

A B S T R A C T

Based on theoretical considerations and experimental investigations, a research about variable declining rate filtration systems (DRFS) was conducted, with the main purpose of studying a method to obtain parameters required for design and operation of these systems. Initially, several filtration tests with constant rates and variable levels were carried out, in order to calculate a coefficient, typical for the filter bed in the pilot plant, describing head loss increase with time. Equations for the variations of laminar and turbulent head losses in function of filtration rates were also established. Simulations of DRFS's behaviors were thus performed in a computer, adopting the mathematical model developed by Di Bernardo. Then, a DRFS pilot plant was set up and operated, with a constant rate filter (CRF) working in parallel. The results of DRFS runs have showed a typical behavior, with the filtration rates declining in steps and the occurrence of minimum and maximum operation levels. Measurements of these rates and levels have agreed with the simulations results, indicating a good performance of the mathematical model. The rise in total head loss was observed to be similar in both DRFS and CRF, whenever the latter was operated with a filtration rate equivalent to the filter in DRFS at the same clogging state. It means that the slope of the clogging head loss curve for a bank of several declining rate filters was the same as the slope for a single CRF operating at the maximum rate occurring in DRFS. Since this rate can be obtained from the simulation model, the operation of a pilot CRF is sufficient to define the rise in DRFS's level and, consequently, its run length. Such a procedure was performed by comparing run lengths calculated from the previously fixed head loss coefficient, to those from the operation of the DRFS pilot plant. The good agreement between both theoretical and experimental values has then comproved the validity of the proposed method.

1. INTRODUÇÃO

A filtração através de meios granulares representa uma das mais importantes etapas do tratamento de águas para abastecimento, encontrando também aplicações no tratamento de águas residuárias. Seja como a principal unidade presente, constituindo uma filtração direta, seja como parte integrante de sistemas com diversas unidades em sequência, o filtro pode ser considerado, na maior parte dos casos, como a última barreira, o passo definitivo no processo de remoção das partículas contidas no meio líquido. Deste modo, tanto o projeto como a operação das unidades de filtração, baseados em considerações teóricas e obtidas da experiência, devem ser alvo das maiores atenções, de modo que os padrões de qualidade sejam sempre alcançados. Uma eficiência adequada e boas características de economia e operacionalidade devem ser condições básicas de sistemas de filtração bem projetados.

Sempre com o objetivo de realizar a separação e a retenção das partículas presentes na água, diferentes tipos de filtros têm sido usados. Especificamente na área do tratamento de águas para abastecimento, os mais empregados têm sido os filtros rápidos por gravidade, que, por sua vez, também apresentam diversas variações. Uma das principais características que determinam esta variedade diz respeito ao método de operação utilizado, dividindo os sistemas de filtração em dois grupos: os que trabalham com uma taxa de filtração constante e os que apresentam taxas variáveis. Dentre estes últimos, destacam-se os sistemas de filtração com taxa declinante (SFTD).

Em termos históricos, pode-se registrar uma utilização quase exclusiva da filtração com taxa constante até meados da década de 50. A partir desta época, começou-se a considerar também a operação com taxa declinante, que, desde então, apresentava uma série de vantagens sobre os sistemas tradicionalmente empregados. Em virtude destas vantagens, seria de se esperar uma aplicação em larga escala da filtração com taxa declinante nos anos subsequentes; tal, entretanto, não aconteceu, embora o número de instalações operando desta maneira fosse, pouco a pouco, crescendo. Vários motivos devem ter contribuído para limitar uma utilização mais ampla do novo método de operação, entre eles, com certeza, um certo desconhecimento acerca de seu funcionamento.

A apresentação, no final da década de 60, do método de operação conhecido como taxa declinante variável tornou ainda mais evidentes algumas das desvantagens dos sistemas com taxa constante, sobretudo daqueles que necessitam de equipamentos controladores, que são dispensáveis na filtração com taxa declinante. Não obstante, o emprego desta última ainda encontrava restrições, pelo motivo já citado e por uma certa complexidade apresentada nos projetos das instalações, sobretudo quanto ao comportamento hidráulico das mesmas.

A publicação de resultados da operação de SFTD, tanto em instalações pilotos, quanto em estações de tratamento, contribuiu, a partir de meados dos anos 70, para esclarecer algumas das dúvidas relativas à taxa declinante, em particular à taxa declinante variável. Tais resultados evidenciaram uma vez mais a superioridade deste método de operação, seja em relação à qualidade do efluente produzido, seja quanto à duração das carreiras de filtração ou ao volume de água filtrado por unidade de perda de carga.

Ainda assim, a referida complexidade hidráulica inerente aos projetos de SFTD persistia, dificultando sua aplicação numa escala mais ampla. Os critérios de projeto existentes até o início da década de 80 eram baseados em parâmetros empíricos e fixados arbitrariamente, além de não contemplarem a taxa declinante variável. Era clara a necessidade de se estabelecerem critérios mais adequados, através de métodos racionais de projeto.

Ao longo daquela década, foram feitas algumas tentativas no sentido de serem obtidos tais métodos. Na maior parte dos casos, foram desenvolvidos modelos matemáticos teóricos procurando descrever o comportamento de SFTD, e a partir dos quais seria possível projetá-los. A maioria destes modelos, entretanto, apresentava duas características desfavoráveis: equações relativamente complexas necessitando resolução por métodos numéricos; e, principalmente, a necessidade de recorrerem a formulações empíricas para descrever as alterações do meio filtrante com o tempo. Por este motivo, os modelos incluíam parâmetros empíricos, alguns de difícil determinação, a partir de instalações experimentais. Tal fato, mais a complexidade dos cálculos envolvidos, tornaram tais modelos pouco atrativos.

O modelo proposto em 1985 por Di Bernardo, porém, apresentou alguns aspectos que o diferenciaram dos demais. Embora também seja constituído por um sistema de equações, que precisa ser resolvido por um método iterativo, apresenta cálculos mais simples que os dos outros modelos e, o que é importante, não inclui coeficientes empíricos. Isto acontece porque o modelo não incorpora nenhuma fórmula descrevendo as mudanças no meio filtrante ao longo do tempo. Assume-se uma situação de equilíbrio, com cada filtro de uma bateria trabalhando com uma determinada taxa de filtração, decorrente do seu estado de colmatação. Por tratar-se de taxa declinante variável, onde as vazões nos filtros mantêm-se aproximadamente constantes no intervalo entre duas lavagens consecutivas, declinando na forma de degraus ao longo das carreiras dos mesmos, o modelo é bastante eficiente para a obtenção das taxas e dos níveis de operação. Com isto, uma parte dos parâme-

tros necessários ao projeto e à operação do sistema pode ser determinada, a partir dos valores adotados para a taxa média e a carga disponível para a filtração.

Por outro lado, ao evitar as formulações empíricas que tentam prever o comportamento dos filtros ao longo do tempo, o modelo de Di Bernardo não é capaz de determinar a duração das carreiras de filtração, que se constitui num parâmetro bastante significativo. Tal dificuldade, entretanto, é comum aos diversos sistemas de filtração, sejam eles de taxa constante ou de clinante. O uso das referidas formulações empíricas tem sido bastante limitado, e elas raramente têm sido aplicadas na prática. As alternativas têm sido a fixação arbitrária da duração das carreiras, a partir de experiências anteriores em condições semelhantes, ou sua obtenção diretamente através da operação de uma instalação piloto. No caso de um filtro com taxa constante, este último procedimento, que é preferível ao anterior, pode ser executado com relativa facilidade.

Para um SFTD, no entanto, a implantação e operação de uma instalação piloto são bem mais complexas, podendo, em função do número de unidades da bateria, tornar-se inviáveis. Seria desejável, portanto, que o levantamento de dados relativos a um SFTD pudesse ser feito empregando-se instalações mais simples, como a representada por um filtro piloto operando com taxa constante. Tal prática pode ser perfeitamente possível, uma vez que, conforme já referido, cada filtro de um SFTD variável trabalha com taxas aproximadamente constantes em cada ciclo entre as sucessivas lavagens das unidades. Para que o procedimento proposto possa ser corretamente realizado, de modo que os dados obtidos com um tipo de operação sejam aplicáveis ao outro, deve-se dispor de um método adequado para o levantamento dos mesmos. Tal método deve basear-se em considerações teóricas e práticas, necessitando ser verificado experimentalmente. Esta verificação consta, basicamente, da comparação entre o desempenho de um filtro piloto com taxa constante e o de uma instalação piloto de um SFTD, avaliando-se como o comportamento deste pode ser deduzido a partir dos dados observados naquele.

O estabelecimento do referido método para o levantamento de parâmetros de operação e projeto, entre eles a duração das carreiras de filtração, permitirá, em conjunto com os procedimentos de cálculo já desenvolvidos, que a implantação de sistemas de filtração com taxa declinante se faça sem maiores dificuldades, possibilitando uma aplicação mais ampla deste método de operação, com seus conseqüentes benefícios.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo da presente pesquisa foi o de propor um método, desenvolvido a partir de considerações teóricas e de investigação experimental, através do qual seja possível o levantamento de dados sobre um sistema de filtração com taxa declinante variável, empregando-se uma instalação piloto com taxa de filtração constante. Tal método deve permitir a obtenção, num único filtro piloto, dos parâmetros de operação e projeto de um sistema com taxa declinante composto por um número qualquer de unidades, incluindo dados referentes à duração das carreiras de filtração e aos intervalos entre lavagens.

Paralelamente, procurou-se analisar alguns aspectos relativos ao desempenho de um SFTD, a partir da observação do comportamento de uma instalação piloto trabalhando segundo tal método de operação. A capacidade do modelo teórico de DI BERNARDO (1985, 1986a) de prever alguns dos parâmetros de um SFTD foi também objeto de investigação.

O trabalho desenvolvido teve como objetivo, ainda, a caracterização de um coeficiente de variação da perda de carga com o tempo, através do qual possa ser prevista, para um determinado filtro e em função da carga hidráulica disponível, a duração das carreiras de filtração, sob diferentes condições de vazão e qualidade do afluente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MÉTODOS DE OPERAÇÃO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE

Embora consistindo basicamente na passagem de um fluído através de um meio poroso e permeável, a fim de se obter um certo grau de separação das fases sólida, líquida e gasosa eventualmente presentes no primeiro, a filtração é um fenômeno que pode apresentar-se sob as mais variadas formas.

No caso específico da filtração de águas para abastecimento, através da qual se pretende a remoção de partículas suspensas e coloidais originalmente presentes nas águas naturais, vários tipos de filtros têm sido utilizados ao longo do tempo. No decorrer deste século, entretanto, tem havido um predomínio da chamada filtração rápida, caracterizada pela passagem da água por um meio granular, normalmente areia, em decorrência da ação da gravidade. A expressão "rápida" serve para distinguir este tipo de filtração daquela em que as velocidades de escoamento da água são significativamente menores, e que é conhecida como filtração lenta.

Mesmo os filtros rápidos por gravidade podem, por sua vez, diferir entre si quanto a uma série de características, tais como: dimensões, espessura do leito filtrante, tipo de materiais empregados, granulometria, sentido de escoamento da água, relação com outras unidades de tratamento etc. Desse modo, pode-se ter, por exemplo, filtros de camadas múltiplas ou de camada simples, de fluxo ascendente ou descendente, com ou sem unidades de pré-tratamento.

Uma das principais características que diferenciam os filtros rápidos diz respeito ao seu método de operação. Entende-se por método de operação a maneira pela qual se determina o comportamento da velocidade de filtração e do nível d'água nos filtros. O comportamento destes parâmetros é função de características construtivas, tais como a forma de entrada da água na caixa do filtro, e também operacionais, como o intervalo entre lavagens das diversas unidades. As diversas combinações destas e outras características irão definir o método de operação de um determinado filtro, que poderá, assim, ser classificado como de taxa constante ou declinante, de nível variável ou

de nível constante.

Os diferentes métodos de operação dependem, essencialmente, de como se relacionam a carga hidráulica para a filtração e a resistência do filtro. A carga hidráulica equivale à diferença entre as cotas do nível d'água de montante e de jusante do filtro, em pontos sob pressão atmosférica; seu valor pode manter-se constante ou variar durante a carreira de filtração, conforme variem ou não aqueles níveis. A resistência do filtro, por sua vez, é a soma das diversas perdas de carga existentes no sistema, tanto aquelas de correntes da passagem da água pelo meio filtrante limpo e pelas canalizações e acessórios, quanto aquela que vai surgindo à medida em que ocorre retenção de partículas no filtro. A tendência é o aumento destas perdas ao longo do tempo, a menos que haja diminuição da velocidade de escoamento ou algum dispositivo destinado, especificamente, a manter a resistência total do sistema num valor constante. De modo geral, a taxa ou velocidade de filtração está relacionada com a carga hidráulica e com a resistência do filtro através da seguinte expressão (ARBOLEDA, 1974; DI BERNARDO, 1983):

$$\text{Taxa de Filtração} \propto \frac{\text{Carga Hidráulica}}{\text{Resistência Total}} \quad (3.1)$$

Assim, em função do comportamento destes parâmetros ao longo de uma carreira de filtração, resultarão os diferentes métodos de operação apresentados, esquematicamente, no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Métodos de operação de filtros

Carga Hidráulica	Resistência Total	Taxa de Filtração	Método de Operação Característico
Constante	Constante	Constante	Taxa constante com controlador
Variável	Constante	Constante	Taxa constante com controlador
Constante	Variável	Variável	Taxa declinante verdadeira
Variável	Variável	Constante Variável	Distribuição equitativa de vazões Taxa declinante variável

No primeiro caso, não há variações significativas dos níveis d'água no filtro, de modo que a carga hidráulica permanece praticamente constante durante todo o tempo. É necessária a instalação de um dispositivo controlador, no qual a perda de carga diminui ao longo do tempo, compensando o aumento da mesma no meio filtrante e fazendo com que a resistência total do filtro também se mantenha constante. Como resultado, a taxa de filtração não varia entre duas lavagens consecutivas do mesmo filtro. A figura 3.1 mostra um esquema do comportamento descrito.

Neste método de operação devem ser previstos dispositivos controladores de vazão e de nível, que podem ser instalados na entrada ou na saída dos filtros. Tais controladores constam basicamente de um medidor de va-

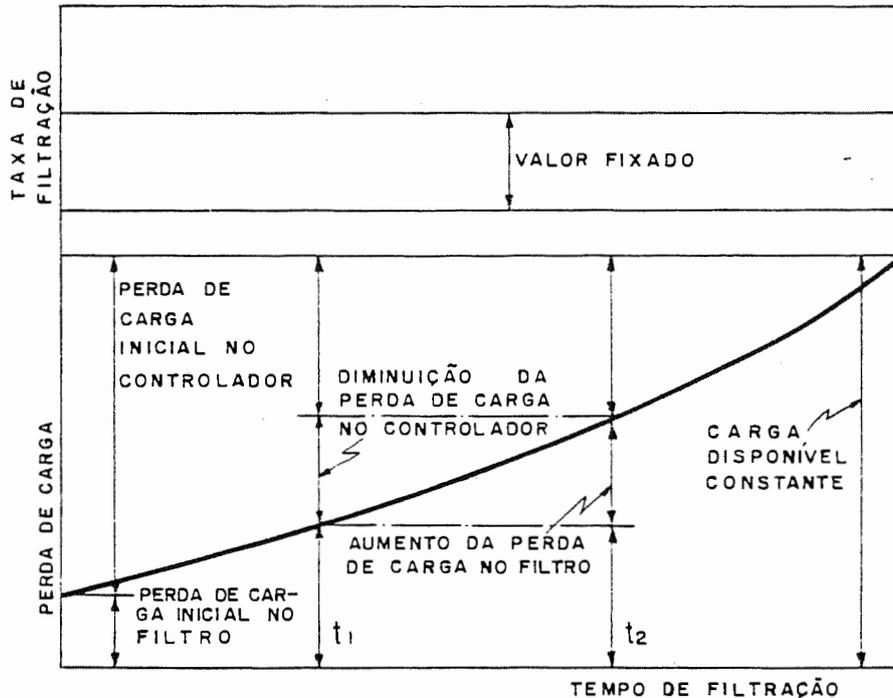


Fig. 3.1. Variação da perda de carga com o tempo para o método de operação com carga hidráulica, resistência do filtro e taxa de filtração constantes (DI BERNARDO, 1983).

zão, um sensor de nível, um transmissor de sinais, um dispositivo para fixação da taxa desejada e uma válvula de controle. Esta válvula começa a trabalhar quase fechada, no início da carreira de filtração, e vai se abrindo no decorrer do tempo de operação do filtro; no momento em que tal válvula estiver totalmente aberta, o filtro deve ser retirado de operação para ser lavado.

Embora amplamente utilizado na prática, este método de operação apresenta uma série de inconvenientes (CLEASBY, 1969, 1972a; DI BERNARDO, 1983): a) custo elevado dos equipamentos; b) custo de operação e manutenção; c) ocorrência de variações súbitas de vazão por ocasião da paralisação de um dos filtros, devido à necessidade de se manter o nível pré-fixado, com a consequente perda de qualidade do efluente.

O segundo método de operação apresentado no Quadro 3.1 é bastante semelhante ao anterior, apenas sem a manutenção do nível constante. Para a taxa de filtração permanecer constante, o controlador deve compensar não só a variação da perda de carga no meio filtrante, mas também eventuais variações na carga hidráulica. Este método, embora raramente empregado, apresenta os mesmos inconvenientes relativos a custo já citados; além disto, necessita de controle manual ou automático de nível, para compensar diferenças entre a vazão afluente e a efluente ao filtro. Os ajustes decorrentes podem gerar variações bruscas de vazão, prejudicando a qualidade da água filtrada.

Os inconvenientes citados para os dois métodos já referidos podem

agravar-se quando os equipamentos instalados apresentarem problemas de funcionamento ou quando não puderem sofrer manutenção adequada; o mesmo pode acontecer quando a operação do sistema não for suficientemente qualificada , levando a uma perda do controle do mesmo.

Quando a carga hidráulica permanece constante ao longo da carreira de filtração, enquanto a resistência do filtro aumenta continuamente, devido à retenção de impurezas, tem-se a operação com taxa declinante verdadeira. A taxa de filtração é elevada no início, diminuindo com o tempo, conforme pode ser visto na figura 3.2.

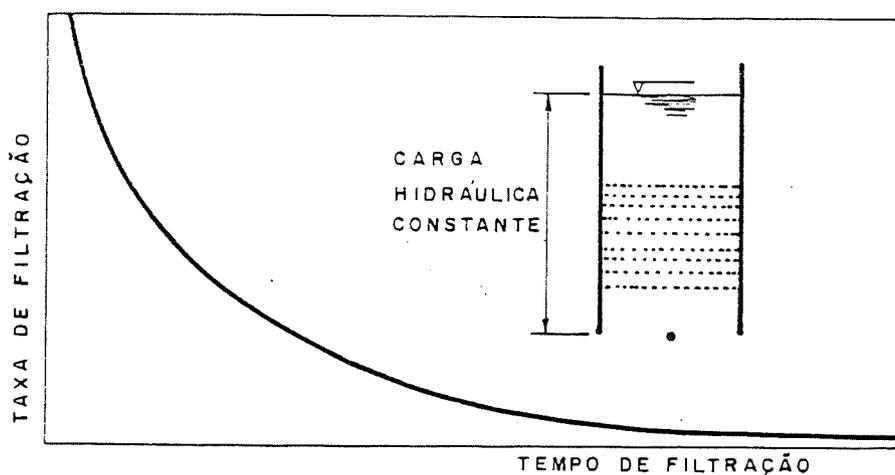


Fig. 3.2. Variação da taxa de filtração com o tempo na operação com taxa declinante verdadeira (DI BERNARDO, 1983).

Este tipo de operação não necessita de controladores de vazão e de nível complexos, podendo exigir apenas um dispositivo limitador de vazão, como uma placa de orifício, para evitar a ocorrência de taxas de filtração muito elevadas no início da carreira. O emprego deste sistema na prática apresenta uma certa dificuldade, pois as vazões dos diversos filtros de uma estação, ao variarem independentemente umas das outras, poderão resultar num valor diferente da vazão total, levando à necessidade de algum método de controle, como o armazenamento da vazão excedente. É um método raramente empregado, embora suas vantagens sobre os sistemas com taxa constante, com relação à qualidade do efluente e à duração das carreiras de filtração, tenham sido destacadas por vários autores (CLEASBY, 1972a; HUDSON , 1959; HUDSON & HAZEY, 1959; TUEPKER, 1965).

Por fim, tem-se a situação em que tanto a carga hidráulica quanto a resistência do filtro variam com o tempo, podendo dar origem a taxas de filtração constantes ou variáveis, dependendo da disposição construtiva e da operação do sistema. Dois métodos de operação são característicos desta categoria: o da distribuição equitativa de vazões e o de taxa declinante variável.

Quando a entrada de água nos filtros se dá por meio de vertedores com descarga livre, de modo que a vazão afluyente à estação é distribuída igualmente entre as unidades em operação, tem-se o primeiro destes métodos. O nível d'água em cada filtro varia independentemente dos demais, causando um aumento da carga hidráulica correspondente e compensando o aumento da resistência do filtro; deste modo, a taxa de filtração permanece praticamente constante (ARBOLEDA, 1974; AULTMAN, 1959; CLEASBY, 1969, 1972a; DI BERNARDO, 1983). Na verdade, uma parte da vazão afluyente é armazenada, à medida que o nível d'água se eleva, diminuindo a vazão efluente (CHAUDHRY, 1987a); o volume armazenado, entretanto, é geralmente desprezível em relação ao volume de água produzido num mesmo período, podendo-se considerar a taxa de filtração constante.

A figura 3.3 mostra um arranjo típico de um filtro empregando este método de operação. Algumas vantagens deste sistema seriam (CLEASBY, 1969, 1972a; DI BERNARDO, 1983): a) se a vazão total afluyente permanece constante, a taxa de filtração é mantida constante sem o uso de equipamentos controladores; b) a distribuição da água entre os filtros é feita por meio de dispositivo simples, como o vertedor; c) quando um filtro é retirado de operação para ser lavado, a vazão correspondente ao mesmo é distribuída igualmente entre os restantes, de uma maneira gradual, sem a necessidade de equipamentos e ajustes manuais, garantindo-se a qualidade do efluente; d) a diminuição da taxa de filtração, como a que ocorre nos demais filtros quando o que foi lavado é recolocado em operação, também é gradual; e) a perda de carga em um filtro qualquer é visual, identificando-se facilmente a ocorrência do nível máximo, para que se proceda à lavagem; f) não é necessário um medidor de vazão para cada filtro, uma vez que basta dividir a vazão total

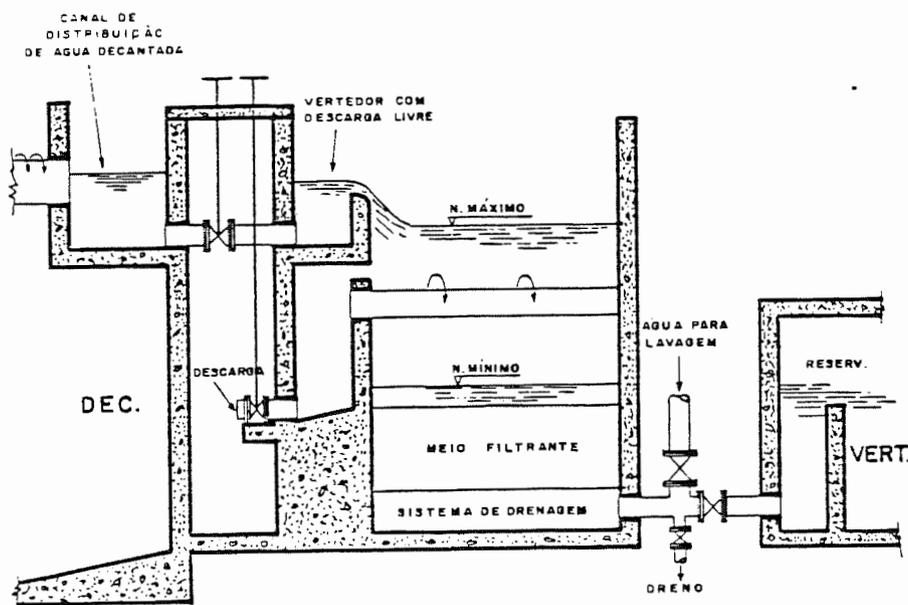


Fig. 3.3. Arranjo típico de um filtro operando com distribuição equitativa de vazão (DI BERNARDO, 1983).

da estação pelo número de unidades em operação, para obter-se a vazão em cada uma delas; g) caso se queira, entretanto, tais vazões podem ser facilmente medidas nos próprios vertedores de entrada dos filtros; h) para manter-se o nível mínimo de operação acima do leito filtrante, basta elevar-se o vertedor de saída a uma altura conveniente, eliminando-se também a possibilidade de ocorrência de pressão inferior à atmosférica nos filtros.

A única desvantagem do sistema de distribuição equitativa de vazão com relação aos métodos anteriores é a necessidade de uma altura maior da caixa do filtro, para permitir a variação do nível d'água em seu interior e garantir o funcionamento do vertedor de entrada com descarga livre.

Se a entrada de água nos filtros localiza-se abaixo do nível mínimo de operação dos mesmos, as unidades passam a constituir um sistema de vasos comunicantes, com os níveis d'água interdependentes. Caso a distribuição da água seja feita por meio de tubulação ou canal de dimensões suficientemente grandes, o nível será o mesmo em todos os filtros, assim como a sua variação ao longo do tempo. Se, além disto, os filtros forem lavados, um por vez, em intervalos de tempo significativos, tem-se o método de operação denominado taxa declinante variável (CLEASBY, 1969, 1972a). Um arranjo típico deste sistema é mostrado na figura 3.4.

A taxa declinante variável é bastante semelhante ao sistema com distribuição equitativa de vazão, incorporando algumas de suas vantagens. Além disto, tornou possível, na prática, o emprego da taxa de filtração declinante, que também apresenta vários pontos favoráveis. Na verdade, trata-se de uma combinação destes dois métodos, com a taxa de filtração podendo manter-se constante em determinados períodos, mas sempre declinando do início

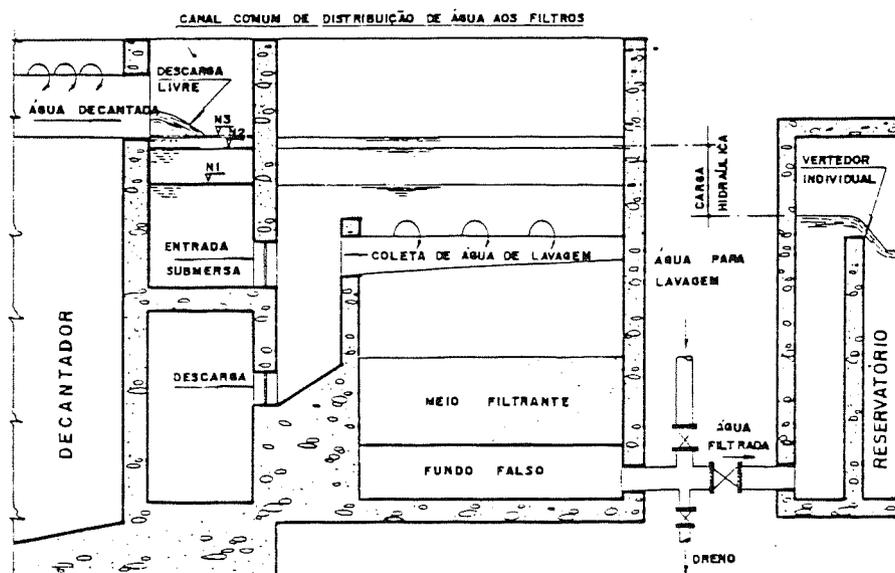


Fig. 3.4. Arranjo típico de um filtro operando com taxa declinante variável (DI BERNARDO, 1983).

para o fim da carreira do filtro.

O comportamento de um sistema de filtração com taxa declinante variável pode ser analisado com o auxílio da figura 3.5, correspondente a uma bateria de quatro filtros em operação estável. Nesta situação, cada filtro deve estar trabalhando com uma taxa de filtração determinada pelo seu estado de colmatação. Assim, o filtro que foi lavado há mais tempo trabalha com a menor taxa, enquanto o mais recentemente lavado trabalha com a maior. No período entre as lavagens, as taxas permanecem constantes, com o aumento da resistência dos filtros sendo compensado pelo aumento da carga hidráulica, através da elevação do nível d'água de N1 para N2. Quando este último é atingido, o filtro mais sujo é retirado de operação para ser lavado. Durante a lavagem, os filtros restantes devem absorver a vazão daquele retirado de operação e, assim, o nível d'água sobe até N3. Quando o filtro recém-lavado volta a operar, passa a fazê-lo com a maior taxa, enquanto os demais apresentam uma redução proporcional dos seus valores. O nível d'água desce até o valor mínimo N1, recomeçando a subir em seguida e repetindo-se o ciclo.

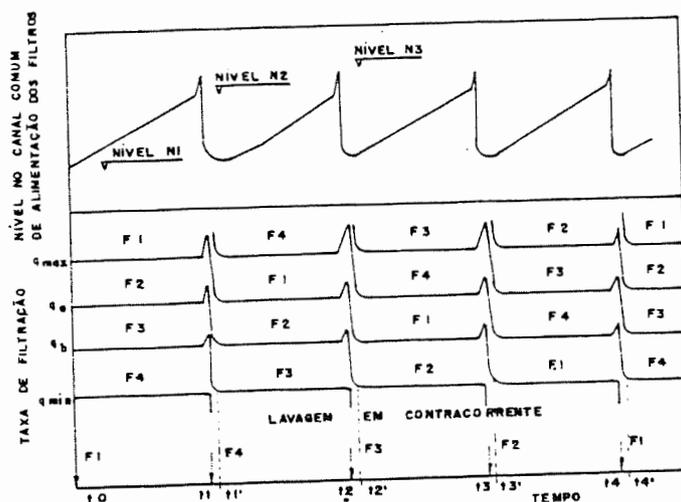


Fig. 3.5. Variações típicas dos níveis d'água e das taxas de filtração num sistema operando com taxa declinante variável (DI BERNARDO, 1986b).

O sistema caracteriza-se, portanto, por um comportamento repetitivo, no qual cada filtro tem sua taxa reduzida na forma de degraus, ao longo de sua carreira. A vazão total do sistema é sempre atendida pela bateria de filtros, eliminando-se este inconveniente do sistema com taxa declinante verdadeira. Uma condição essencial para o funcionamento cíclico do sistema é a de que somente um filtro seja lavado de cada vez, sempre que o nível máximo de operação for atingido. A duração de cada ciclo, por sua vez, depende da qualidade do afluente às unidades; caso não haja variações significativas, os intervalos entre lavagens sucessivas têm duração aproximadamente igual.

O arranjo e o comportamento típicos descritos para o sistema com taxa declinante variável podem sofrer pequenas modificações, em função das características específicas de uma dada instalação. Caso haja perdas de car

ga significativas na entrada de cada um dos filtros, os níveis nestes poderão ser um pouco diferentes entre si; por isso, costuma-se adotar como referência o nível no canal comum de distribuição de água aos filtros. Perdas de carga significativas, tanto na entrada quanto na saída das unidades, podem ser necessárias para limitar a vazão nos filtros recém-lavados ou minimizar a ocorrência de picos, evitando-se a produção de efluente de pior qualidade.

Outra variação pode ocorrer quando se dispõe de uma área a montante dos filtros, à qual possa estar associado um armazenamento substancial de água. Isto acontece, por exemplo, quando a saída dos decantadores se dá por meio de tubulações perfuradas, com as respectivas saídas submersas no canal de distribuição, conforme a figura 3.6. Neste caso, o armazenamento se estende por todas as unidades a montante dos filtros, resultando em variações menores dos níveis d'água. Também as taxas de filtração são afetadas, apresentando mudanças mais lentas e graduais, podendo-se inclusive reduzir ou eliminar os picos que ocorrem por ocasião das operações de lavagem (DI BERNARDO, 1986b).

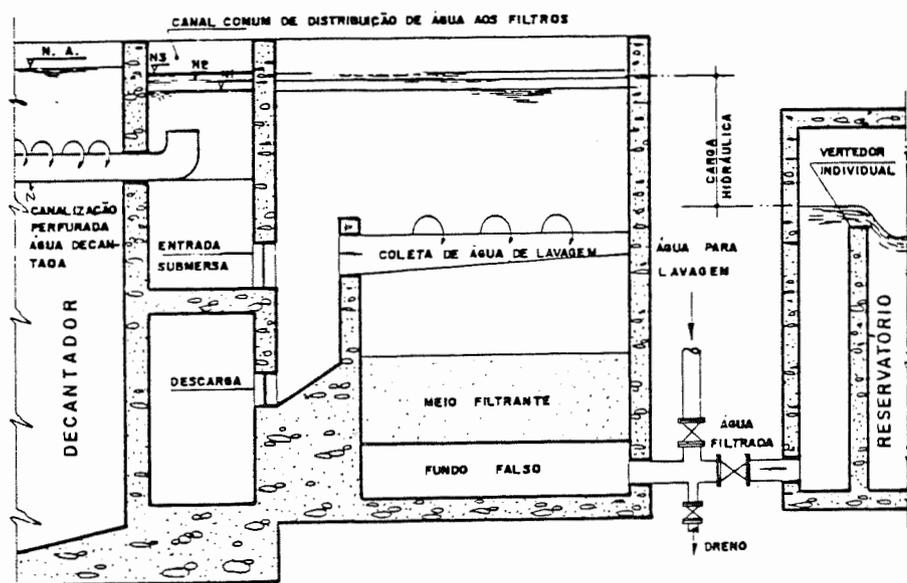


Fig. 3.6. Arranjo típico de um filtro operando com taxa declinante variável, com armazenamento a montante dos filtros (DI BERNARDO, 1986b).

O armazenamento a montante é provavelmente um dos responsáveis pelos diferentes comportamentos que têm sido observados para a variação das taxas de filtração no intervalo entre as lavagens. Nos trabalhos iniciais relativos à taxa declinante variável (CLEASBY, 1969, 1972a), todas as taxas eram consideradas como ligeiramente declinantes no referido intervalo. Trabalhos posteriores apresentaram resultados nos quais as taxas de filtração, ou mantinham-se constantes nos valores atingidos logo no início dos intervalos

(CLEASBY & DI BERNARDO, 1980), ou declinavam durante um período inicial e mantinham-se constantes até o fim do intervalo (DI BERNARDO, 1985), ou, ainda, apresentavam um comportamento diferente para cada um dos filtros da bateria, com algumas taxas declinando e outras aumentando (ARBOLEDA et al., 1985). Apesar destas diferenças durante os intervalos, o padrão de redução das taxas de filtração na forma de degraus foi obtido em todos os casos citados.

Independentemente destas e outras variações em seu comportamento, o método de operação com taxa declinante variável apresenta como principais vantagens (CLEASBY, 1969, 1972a, 1981; CORNWELL et alii, 1984; DI BERNARDO, 1983): a) não há necessidade de instalação de equipamentos controladores de vazão; b) quando um filtro é retirado de operação para lavagem, a sua vazão é distribuída proporcionalmente entre os demais, de maneira gradual e sem a ocorrência de transientes prejudiciais à qualidade do efluente; além disto, a vazão a ser distribuída é pequena, pois o filtro que precisa ser lavado é o que está operando com a taxa mínima; c) a qualidade do efluente é melhor quando a taxa de filtração diminui do início para o fim da carreira, minimizando-se ou eliminando-se a ocorrência do traspasse final; d) quando não há armazenamento, a perda de carga é evidente ao operador, pela simples observação do nível d'água no sistema; e) o volume de água produzido por unidade de perda de carga devida à retenção de partículas é maior; f) a carga hidráulica necessária para se obter carreiras de filtração com a mesma duração que a de um sistema com taxa constante, é menor, pois há uma recuperação de carga com a diminuição da taxa de filtração; esta recuperação é particularmente significativa nas tubulações e acessórios, onde a perda de carga é turbulenta, variando, aproximadamente, com a segunda potência da vazão.

Algumas desvantagens apontadas num sistema de filtração com taxa declinante variável seriam (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION FILTRATION COMMITTEE, 1984): a) o operador precisa conhecer bem o sistema e saber prever o comportamento hidráulico dos filtros quando ocorrerem mudanças na vazão afluente à estação; b) a vazão em cada filtro não é conhecida, dificultando a operação, a menos que medidores individuais sejam instalados; c) o projeto hidráulico apresenta uma maior complexidade do que nos demais sistemas. A respeito destas objeções, deve-se ressaltar que as duas primeiras não são exclusivas do método de controle em questão: uma boa operação é sempre desejável, e alguns sistemas com taxa constante em que os controladores não funcionam bem podem apresentar um grau de dificuldade muito maior no seu funcionamento. Quanto à complexidade dos projetos, é realmente um fato real, o qual tem dificultado uma aplicação mais ampla da filtração com taxa declinante variável. Uma série de estudos, entretanto, tem sido conduzida no sentido de um melhor conhecimento desta tecnologia de filtração. Tais estudos, que serão abordados mais detidamente nos itens seguintes, e entre os quais a presente pesquisa pretende incluir-se, têm contribuído para uma maior facilidade de no projeto e na operação de sistemas de filtração com taxa declinante variável.

3.2. HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE

Os filtros rápidos de areia começaram a ser utilizados no tratamento de água para abastecimento nas últimas décadas do século XIX. Desde esta época, e até a segunda metade da década de 50, praticamente todas as unidades deste tipo eram projetadas para serem operadas a uma taxa constante, cujo valor padrão era de cerca de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ($2 \text{ gpm}/\text{ft}^2$). Tais especificações foram adotadas a partir de testes realizados nos EUA por Fuller (citado por CLEASBY & BAUMANN, 1962, e por HUDSON, 1981), entre 1895 e 1897, permanecendo inalteradas nos 60 anos seguintes. Algumas exceções ocorreram, como o sistema com taxa declinante instalado por Hazen, ainda em 1899, em Albany, EUA, e outro adaptado por Easterday em St. Louis, EUA, já em 1949 (HUDSON, 1981). Outra das raras referências ao uso de taxas de filtração variáveis durante o período anterior a 1950, diz respeito a variações decorrentes da curva de consumo de água, visando minimizar as unidades de reservação, e não a um sistema com taxa declinante (JENKS, 1928). A regra geral, entretanto, era a manutenção de taxas constantes, através do emprego de dispositivos controladores, sobretudo os do tipo Venturi.

O emprego de taxas declinantes na filtração rápida passou a ser objeto de estudos na década de 50, como consequência de dois fatores: a constatação de que os controladores de vazão podiam prejudicar a qualidade da água filtrada, e a necessidade de se empregar maiores taxas de filtração, superando o valor tradicionalmente usado.

O aspecto relativo aos controladores de vazão foi abordado inicialmente por BAYLIS (1958), que, em pesquisas desenvolvidas por volta de 1940 e publicadas quase 20 anos depois, investigou a ocorrência de pequenas variações momentâneas de pressão e vazão (em inglês: "surges" = "ondas", "pulsações") nas saídas de filtros. O autor concluiu que os medidores do tipo Venturi, largamente empregados nos controladores, eram responsáveis por tais fenômenos, bem como, em menor escala, válvulas parcialmente fechadas. Verificou-se que a amplitude das ondas aumentava com o crescimento da perda de carga nos filtros, sendo também proporcional ao quadrado da vazão. O principal efeito gerado pela ocorrência destes transientes, e que registrava-se a partir de determinada amplitude, era o de provocar a passagem de material previamente retido pelo filtro, comprometendo a qualidade do efluente.

Além destas perturbações, que são inerentes aos dispositivos empregados e ocorrem mesmo quando o seu funcionamento é considerado normal, a operação instável dos controladores pode provocar a ocorrência de outras. Um exemplo desta instabilidade, referido por vários autores (BAYLIS, 1958; CLEASBY et alii, 1963; HUDSON, 1963; ROGERS, 1964), é o fenômeno designado, em inglês, por "hunting" ("caçada"). Tal fenômeno acontece quando um dispositivo controlador, na tentativa de manter a vazão num valor constante pré-fixado, oscila continuamente entre valores pouco acima e pouco abaixo do mesmo, afetando negativamente a qualidade da água filtrada e agravando os efeitos das pulsações citadas anteriormente.

De maneira geral, as variações bruscas das taxas de filtração são prejudiciais à qualidade do efluente, o que foi comprovado através de investigação experimental (CLEASBY et alii, 1963). A ocorrência destas variações em decorrência da presença dos controladores, equipamentos destinados justamente a manter as vazões constantes, seria, portanto, um motivo razoável para se tentar a remoção dos mesmos, ou sua substituição por outros dispositivos que não apresentassem tal comportamento. A operação com taxa declinante, por prescindir do uso dos controladores de vazão, apresenta-se, sob este aspecto, como uma alternativa, que passou a ser considerada à época.

Por outro lado, a tentativa de se operar os filtros com taxas mais elevadas foi a causa imediata dos primeiros estudos específicos a respeito da filtração com taxa declinante, realizados na década de 50. Um dos primeiros (JACKSON, 1955), descrevia experiências em que os controladores de vazão de alguns filtros da estação de tratamento de Washington, EUA, haviam sido retirados. As conclusões do autor foram favoráveis ao emprego de taxas maiores, bem como enfatizaram a necessidade de se substituir os controladores, que causavam uma perda de carga bastante alta. De fato, conforme referência posterior (HUDSON, 1981), todos os demais filtros daquela estação tiveram tais dispositivos removidos, passando a operar na forma declinante.

Comentando tais experiências, HUDSON (1956) manifestou-se favoravelmente a esta modalidade de operação (designada inicialmente por ele como "pressão constante"), realizando a seguir uma série de testes em Wyandotte, EUA, nos anos de 1957/58. Os resultados foram publicados no ano seguinte, em artigos (HUDSON, 1959; HUDSON & HAZEY, 1959) nos quais pela primeira vez apareceu a expressão "taxa declinante", que descrevia com mais propriedade o método de operação, no lugar de "taxa variável" ou "pressão constante". O experimento apresentado nos artigos mostrava uma comparação entre um filtro operando a uma taxa constante de $140 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, e outro, cujo controlador de vazão havia sido retirado, fazendo com que a taxa declinasse de 160 para $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Foi obtido um efluente de melhor qualidade no filtro com taxa declinante, atribuindo-se tal fato à diminuição dos efeitos provocados pelos transientes ("surges") e à redução na ocorrência do traspasse. Além disto, as carreiras de filtração foram 37% mais longas do que as registradas na unidade com taxa constante.

Ainda nesta época, foram publicados os resultados de outra experiência comparando a filtração com taxa constante e a com taxa declinante, levando a efeito em Chicago, EUA (BAYLIS, 1959). O segundo método de operação foi obtido simplesmente mantendo-se a válvula do controlador de vazão numa posição fixa. Os resultados não mostraram diferenças na qualidade do efluente produzido, mas as carreiras de filtração foram maiores nas unidades com taxa declinante. O autor manifestou a opinião de que o controle de vazão deveria ser mantido, a menos que trabalhos posteriores demonstrassem uma melhoria na qualidade da água filtrada, ao mesmo tempo em que encorajava a realização de novos testes em outras estações de tratamento. As taxas de filtração empregadas neste experimento variaram bem mais do que no anterior, atingindo, em alguns casos, valores iniciais de $290 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e finais da ordem de $115 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

A partir dos resultados positivos obtidos em Wyandotte, sistemas com taxa declinante foram adotados em Detroit e Poughkeepsie, EUA (HUDSON, 1963, 1981). As principais características destes sistemas eram: existência de uma câmara de equalização após os filtros, a fim de atenuar variações de vazão resultantes da retirada e colocação de unidades em operação; ausência de qualquer equipamento controlador de vazão; colocação de uma placa de orifício nas linhas de saída dos filtros, para limitar a vazão máxima no início das carreiras. Como o nível d'água permanecia aproximadamente constante em todos os filtros, variando apenas na câmara de equalização, estes sistemas são considerados como "controlados pelo efluente" (HUDSON, 1981). Além disto, a vazão em tais filtros, assim como nos experimentos já citados, varia continuamente ao longo da carreira de filtração, caracterizando um sistema com taxa declinante verdadeira.

Na década de 60, a necessidade de se produzir água de qualidade cada vez melhor e de se empregar taxas de filtração maiores, apontava no sentido de uma generalização da operação de filtros com taxa declinante, ao lado do uso de filtros com camadas múltiplas e de avanços no pré-tratamento da água a ser filtrada (HUDSON, 1963; LING, 1962; SEGALL & OKUN, 1966). Entretanto, não há, neste período, registro de um grande número de instalações projetadas ou adaptadas para a operação com taxa declinante. Por outro lado, muitas estações de tratamento, cujos controladores de vazão apresentavam defeitos ou simplesmente não funcionavam, estavam trabalhando, involuntariamente, segundo esse método de operação.

Outra investigação realizada em filtros de uma estação de tratamento apresentou resultados favoráveis à taxa declinante (TUEPKER, 1965). Segundo seu autor, as vantagens seriam a ocorrência de menores perdas de carga, devido à ausência dos controladores, bem como o aumento da duração das carreiras. Os dados apresentados indicam tratar-se, uma vez mais, de um sistema com taxa declinante verdadeira, controlado pelo efluente. As taxas de filtração variavam continuamente entre o valor inicial de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e o final de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

O sistema conhecido como taxa declinante variável somente surgiu no final da década de 60, apresentado por CLEASBY (1969, 1972a, 1972b). O autor destaca, em seus artigos, os dois métodos que dispensam o uso de dispositivos controladores de vazão: a distribuição equitativa de vazão e a taxa declinante variável. O segundo método é considerado mais vantajoso, tendo o seu emprego fortemente recomendado. Dois exemplos de adaptação de estações existentes, que passaram a operar como um sistema de filtração com taxa declinante (SFTD) são apresentados: Taipé, Taiwan (1968) e Ames, EUA (1972). No primeiro caso, parte da estação sofreu as modificações, apresentando um melhor desempenho que as unidades restantes, que permaneceram trabalhando com os controladores de vazão. No segundo caso, todos os filtros foram convertidos para o novo sistema, apresentando resultados satisfatórios, sobretudo quanto à qualidade do efluente nos momentos em que há variações de vazão.

O principal aspecto a ser destacado no comportamento hidráulico

do sistema proposto por Cleasby é o fato da taxa de filtração declinar na forma de degraus, mantendo-se relativamente constante entre duas lavagens sucessivas, diferentemente da taxa declinante verdadeira, que diminui continuamente ao longo da carreira de um filtro. Esta diferença é devida à interligação existente entre as unidades e à variação do nível d'água acima do leito filtrante, características do primeiro método. O mesmo efeito pode ser obtido nos filtros com câmara de equalização na saída, cujo nível é também variável. Tal comportamento, entretanto, não é referido em nenhum artigo abordando tal concepção (BRYANT, 1974; HUDSON, 1963, 1981).

Apesar do significativo avanço proporcionado pelos trabalhos publicados por Cleasby, a filtração com taxa declinante aparentava uma certa complexidade, sobretudo quanto à previsão de seu comportamento hidráulico. Os critérios de projeto na década de 70 referiam-se sempre a uma taxa de filtração declinando continuamente ao longo da carreira de filtração, além de contemplar o funcionamento de um único filtro, e não de uma bateria. Deste modo, BRYANT (1974), em artigo amplamente favorável à aplicação da taxa declinante, ainda apresentava, baseando-se nos trabalhos pioneiros de Hudson, parâmetros de projeto incluindo a câmara de equalização. ARBOLEDA (1974), em artigo sobre sistemas de controle hidráulico da filtração, também destaca a taxa declinante, apresentando exemplos de sua aplicação em Cochabamba, Bolívia, e Medellín, Colômbia. Embora as publicações de Cleasby sejam mencionadas por aquele autor, havendo uma distinção entre a taxa declinante verdadeira e a variável, os critérios de projeto desta última continuam a supor um decréscimo da taxa de filtração durante todo o período de funcionamento das unidades. O mesmo critério é considerado por AMIRTHARAJAH (1979), num capítulo específico sobre projetos de sistemas de filtração contido em livro sobre tratamento de água. Este autor, entretanto, reconhece a necessidade de um estudo quantitativo mais rigoroso acerca da filtração com taxa declinante.

Já na década de 80, em livro de sua autoria (HUDSON, 1981), um dos primeiros defensores da filtração com taxa declinante apresenta critérios de projeto considerando a variação contínua deste parâmetro. A câmara de equalização ainda é recomendada, e os valores das taxas máximas e mínimas de filtração são determinados com base num "índice de traspasse" (em inglês: "breakthrough index"), proposto pelo autor na década de 50. O principal objetivo da metodologia de cálculo apresentada é a fixação das dimensões de uma placa de orifício (ou outro dispositivo limitador de vazão), a ser introduzida na canalização de saída dos filtros. Embora relativos à taxa declinante verdadeira e baseados num parâmetro empírico, os critérios apresentados por Hudson foram bastante utilizados na prática, inclusive em situações onde o comportamento era de taxa declinante variável. No Brasil, um artigo relativamente recente (LIMA, 1985) ainda recomenda tais critérios no projeto de filtros com taxas declinantes.

A inexistência de parâmetros mais apropriados para o projeto de sistemas de filtração com taxa declinante variável devia-se à ausência de estudos específicos sobre este método de operação. Apenas dez anos após a sua apresentação por Cleasby, tais sistemas passaram a ser objeto de inves

tigações experimentais visando um melhor conhecimento a respeito de seu comportamento e das variáveis envolvidas. Por esta época, Gregory e Yadav (citados por ARBOLEDA et alii, 1985), operando uma instalação piloto e levantando dados nos filtros de uma estação de tratamento, obtiveram um desempenho próximo ao descrito por Cleasby. Concluíram, além disto, que o sistema com taxa declinante apresentava, comparativamente a um com taxa constante, carreiras de filtração mais longas e efluentes com qualidade igual ou melhor.

Os mesmos resultados foram obtidos em outra investigação experimental conduzida pouco depois (DI BERNARDO & CLEASBY, 1980). Esta pesquisa, além de comprovar a superioridade da filtração com taxa declinante, forneceria importantes subsídios para um melhor equacionamento da hidráulica destes sistemas, conforme artigo subsequente (CLEASBY & DI BERNARDO, 1980). Questões como a carga hidráulica necessária, as variações dos níveis d'água, a influência do número de filtros da bateria, das perdas de carga turbulentas e da taxa máxima de filtração, entre outras, passaram a ter respostas mais satisfatórias, embora ainda persistissem algumas dúvidas. De qualquer forma, estes estudos contribuíram significativamente para um maior conhecimento do assunto e ampliaram as possibilidades de utilização dos SFTD. Artigos posteriores (CLEASBY, 1981; DI BERNARDO, 1983) apresentaram mais esclarecimentos e difundiram ainda mais este método de operação.

Apesar das conclusões favoráveis ao uso da filtração com taxa declinante, um estudo publicado pela mais conceituada associação norte-americana ligada ao tratamento de água optou pela recomendação de serem realizadas mais pesquisas comparando este sistema com os de taxa constante, principalmente em instalações reais e sob condições bastante controladas (AWWA Filtration Committee, 1984). Por outro lado, um artigo publicado no mesmo ano do referido estudo (CORNWELL et alii, 1984) descrevia os resultados operacionais de várias estações de tratamento operando parcial ou totalmente como SFTD, todas nos EUA. As informações prestadas pelos responsáveis por estas estações indicavam um bom funcionamento das mesmas, com destaque para a facilidade de operação, várias vezes referida. Os autores do artigo também pesquisaram, junto a agências regulamentadoras de vários estados norte-americanos, sobre a existência de normas específicas para a filtração com taxa declinante. De um modo geral, tais normas não existiam, o que pode prejudicar o emprego deste método de operação. Por exemplo, havendo limitação da taxa máxima de filtração, um sistema com taxa constante pode adotar tal valor e mantê-lo durante toda a carreira; já num SFTD, o valor máximo corresponde à taxa inicial, fazendo com que o sistema trabalhe com uma taxa média menor. A falta de uma regulamentação específica, assim como a recomendação feita pela AWWA, indicavam que a filtração com taxa declinante encontrava uma certa limitação nos EUA, não obstante suas vantagens e sua aceitação crescente.

Por outro lado, a falta de critérios bem estabelecidos para o dimensionamento de SFTD, aliada a sua relativa complexidade hidráulica, também continuava dificultando o seu emprego em maior escala, não impedindo, porém, que várias estações de tratamento fossem projetadas ou adaptadas para trabalhar segundo este método de operação. ARBOLEDA et alii (1985) registraram mais de 100 destes casos apenas na América Latina. A concepção destas u

nidades, no entanto, era feita a partir de critérios empíricos, os quais, a pesar de muitas vezes funcionarem na prática, careciam de um melhor embasamento teórico. A obtenção de uma metodologia mais racional para o projeto e a operação de SFTD era, portanto, essencial para assegurar aplicabilidade e otimização ao mesmo.

Tentativas neste sentido foram empreendidas por diversos pesquisadores. Na URSS, GRABOVSKII & LARKINA (1984) desenvolveram fórmulas aproximadas descrevendo a variação da taxa de filtração com o tempo, utilizando as equações de variação do coeficiente de permeabilidade propostas por Shekhtman e por Mintz. Alguns parâmetros presentes no modelo são de difícil determinação, como a densidade média das partículas retidas no leito filtrante. Embora obtida a partir de considerações teóricas, a formulação proposta envolve um certo empirismo, além de cálculos relativamente complexos. As mesmas observações podem ser feitas com relação a outro modelo soviético publicado no ano seguinte (YAROSHEVSKAYA & KUL'SKII, 1985). Ambos os modelos, ademais, consideram a taxa de filtração declinando continuamente, embora o artigo em que o primeiro deles é apresentado faça referência aos trabalhos de Di Bernardo e Cleasby sobre a taxa declinante variável.

Abordando especificamente este método de operação, ARBOLEDA et alii (1985) também desenvolveram um modelo matemático procurando determinar, a partir de princípios hidráulicos básicos, parâmetros relativos a SFTD. O modelo proposto utiliza sistemas de equações relacionando as perdas de carga e as taxas de filtração com o tempo. Também neste caso, os autores precisaram recorrer a uma equação empírica para descrever a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo; optaram por uma atribuída a Ives. O modelo padece das mesmas dificuldades dos anteriores: não possui uma base totalmente racional, inclui três constantes empíricas de difícil determinação e depende de cálculos relativamente trabalhosos, a serem executados em computador. Alguns resultados teóricos apresentados pelos autores ajustam-se bem aos dados da pesquisa anterior de Gregory e Yadav, mas os parâmetros a dotados são válidos apenas para uma determinada carreira de filtração. O modelo serve, assim, mais como um indicador do comportamento que certo SFTD deverá apresentar.

Uma outra proposta seguindo a mesma linha de pensamento foi apresentada por CHAUDHRY (1987a, 1987b). O autor vale-se de um desenvolvimento teórico e da equação proposta por Shekhtman para chegar a uma equação diferencial ordinária não-linear de primeira ordem, que pode ser resolvida numericamente. A partir dela, e de alguns parâmetros característicos do sistema, podem ser previstas as variações nas taxas de filtração, perdas de carga e concentração de impurezas durante o funcionamento de um SFTD. O modelo foi deduzido para uma operação com a taxa declinando continuamente, sendo depois adaptado para uma bateria de filtros trabalhando com taxa declinante variável. O autor apresenta uma série de simulações do comportamento de um SFTD, variando os diversos parâmetros envolvidos, os quais aparecem no modelo como adimensionais. Os resultados obtidos são interessantes, mas precisariam ser verificados com dados de operação real. No mais, há a necessidade de se levantarem parâmetros em instalação piloto e de se efetuar a integração nu-

mérica da equação diferencial, atividades que limitam a aplicação do modelo.

Um significativo avanço no sentido de se prever as taxas de filtração e as variações de nível num SFTD foi obtido através do modelo proposto por DI BERNARDO (1985, 1986a). Em comparação aos anteriores, este caracteriza-se pela sua simplicidade de aplicação e sua racionalidade. Trata-se de um sistema de equações obtidas a partir de fórmulas de perda de carga utilizadas em qualquer projeto de filtração. Sua resolução, por método iterativo, dá as variações de nível e as vazões nos filtros, tanto durante a operação normal, quanto durante a lavagem de uma das unidades. Não há necessidade de se recorrer a equações empíricas relacionando o coeficiente de permeabilidade e o tempo de operação, nem há parâmetros de difícil determinação. O dimensionamento do sistema é facilmente obtido, e, da mesma forma, podem ser analisados os efeitos da variação do número de filtros na bateria, da taxa média de filtração, da carga hidráulica disponível, das perdas de carga turbulentas etc.

Uma das limitações do modelo em questão é a de não prever o comportamento do sistema ao longo do tempo, justamente por não incorporar equações prevendo a variação do coeficiente de permeabilidade. O autor assume um comportamento repetitivo para as taxas de filtração, que permaneceriam constantes no intervalo entre duas lavagens consecutivas. O modelo também só é aplicável quando não há armazenamento significativo a montante dos filtros (DI BERNARDO, 1986b), pois, caso contrário, não se obtém uma condição de equilíbrio rapidamente entre as vazões de entrada e saída das unidades. Tal comportamento, embora teoricamente correto e capaz de explicar divergências entre dados obtidos em diferentes situações, ainda necessita ser comprovado experimentalmente.

Com relação às investigações experimentais sobre a filtração com taxa declinante, há que se destacar um outro trabalho (HILMOE & CLEASBY, 1986) comparando a filtração direta de águas superficiais com taxa constante e através de um SFTD. Com os dados obtidos em instalação piloto, onde a taxa era mantida constante pela variação do nível d'água acima do leito filtrante, os autores não detectaram diferenças entre os efluentes dos dois sistemas, sendo que, em ambos, a qualidade era ligeiramente pior no início das carreiras de filtração. Comprovou-se a menor necessidade de carga hidráulica para o sistema com taxa declinante, que apresentou as maiores taxas nos filtros que eram recolocados em operação, logo após sua lavagem.

Na mais recente publicação acerca da filtração com taxa declinante (SAATÇI, 1990), é retomado o modelo proposto por CHAUDHRY (1987a), um pouco modificado e na forma dimensional. O autor procurou expandir a teoria anteriormente desenvolvida, incluindo os modelos de Mintz, de Shekhtman e de Ives, ao avaliar a variação do coeficiente de permeabilidade. A análise é feita para sistemas com distribuição equitativa de vazão e com taxa declinante verdadeira. São apresentados dados experimentais objetivando sustentar as proposições feitas, mas ficam mais uma vez evidentes as limitações advindas do emprego de equações empíricas na formulação do comportamento de sistemas de filtração com taxa declinante.

3.3. CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE

As primeiras unidades de filtração trabalhando com taxa declinante foram obtidas a partir de modificações de instalações com taxa constante já existentes, geralmente retirando-se os dispositivos controladores, ou fixando-se suas válvulas numa posição única. Ao longo do tempo, várias estações de tratamento tiveram seus filtros convertidos deliberadamente para o novo modo de operação, enquanto outras passaram a trabalhar com taxa declinante de maneira involuntária, devido ao fato de os controladores simplesmente terem deixado de funcionar.

A metodologia empregada no projeto das primeiras unidades concebidas de maneira a trabalhar especificamente com taxa declinante não é claramente apresentada quando da descrição das mesmas (HUDSON, 1959a, 1959b, 1963). Provavelmente, os critérios devem ter sido os mesmos apresentados cerca de vinte anos depois (HUDSON, 1981). Durante boa parte deste tempo, não há referência à publicação de outra metodologia, embora vários sistemas com taxa declinante tenham sido implantados neste período.

Já na década de 70, BRYANT (1974) apresentou uma sequência de passos a serem seguidos para o projeto de tais sistemas. Também ARBOLEDA (1974) publicou, em seu artigo sobre controle hidráulico da filtração, algumas considerações a respeito do assunto, incluindo um gráfico relacionando as variações das perdas de carga com as taxas de filtração. Embora não cheguem a configurar uma metodologia, tais considerações seriam aplicáveis à realização de projetos, tendo sido apresentadas de forma mais sistematizada num livro posterior (AMIRTHARAJAH, 1979).

Trabalhando diretamente com a taxa declinante variável, CLEASBY & DI BERNARDO (1980) apresentaram critérios para a determinação da carga hidráulica necessária à operação do sistema, bem como das variações dos níveis d'água e das taxas de filtração. A metodologia proposta aplicava-se a projetos de estações novas e também para a conversão de sistemas trabalhando anteriormente com taxa constante (CLEASBY, 1981).

No decorrer dos anos 80, surgiram vários modelos numéricos tendo como característica comum o emprego de teorias tradicionalmente utilizadas para prever a variação do estado de colmatação dos filtros com o tempo (ARBOLEDA, 1985; CHAUDHRY, 1987a, 1987b; GRABOVSKII & LARKINA, 1984; SAATÇI, 1990; YAROSHEVSKAYA & KUL'SKII, 1985). Seus autores pretendiam descrever o comportamento de sistemas com taxa declinante, seja verdadeira ou variável, a partir destes modelos, prevendo variações de vazão, de perda de carga e da concentração de partículas na água.

Um último modelo, desenvolvido especificamente para a taxa declinante variável (DI BERNARDO, 1985, 1986a, 1986b), proporcionou critérios totalmente racionais para projetos de SFTD, estabelecendo as taxas de filtração em cada uma das unidades de uma bateria, bem como as variações de nível, tanto durante a operação, quanto durante a lavagem dos filtros.

A seguir, são descritos e analisados os critérios e modelos mais significativos entre os aqui referidos:

a. HUDSON (1981)

Este autor propõe uma sequência de projeto constituída dos seguintes passos, que devem ser acompanhados com auxílio da figura 3.7:

1º passo: determinação das características do filtro, quanto a espessura e granulometria do leito filtrante, sistema de drenagem e diâmetros das tubulações.

2º passo: determinação das perdas de carga no filtro limpo, para diversas taxas de filtração, a partir de instalação piloto ou de fórmulas teóricas, dando origem à linha A.

3º passo: seleção da carga hidráulica disponível, linha B.

4º passo: cálculo das perdas de carga turbulentas para diversas taxas de filtração, subtraindo-se da carga disponível para originar a curva C.

5º passo: determinação da taxa de filtração que pode ocorrer quando é maior o risco de traspasse; o autor demonstra matematicamente que, neste momento, a perda de carga total deve ser igual a 2/3 da disponível; a referida taxa é obtida a partir de um parâmetro empírico, o "índice de traspasse", definido como:

$$BI = \frac{v \cdot d^3 \cdot H}{L} \quad (3.2)$$

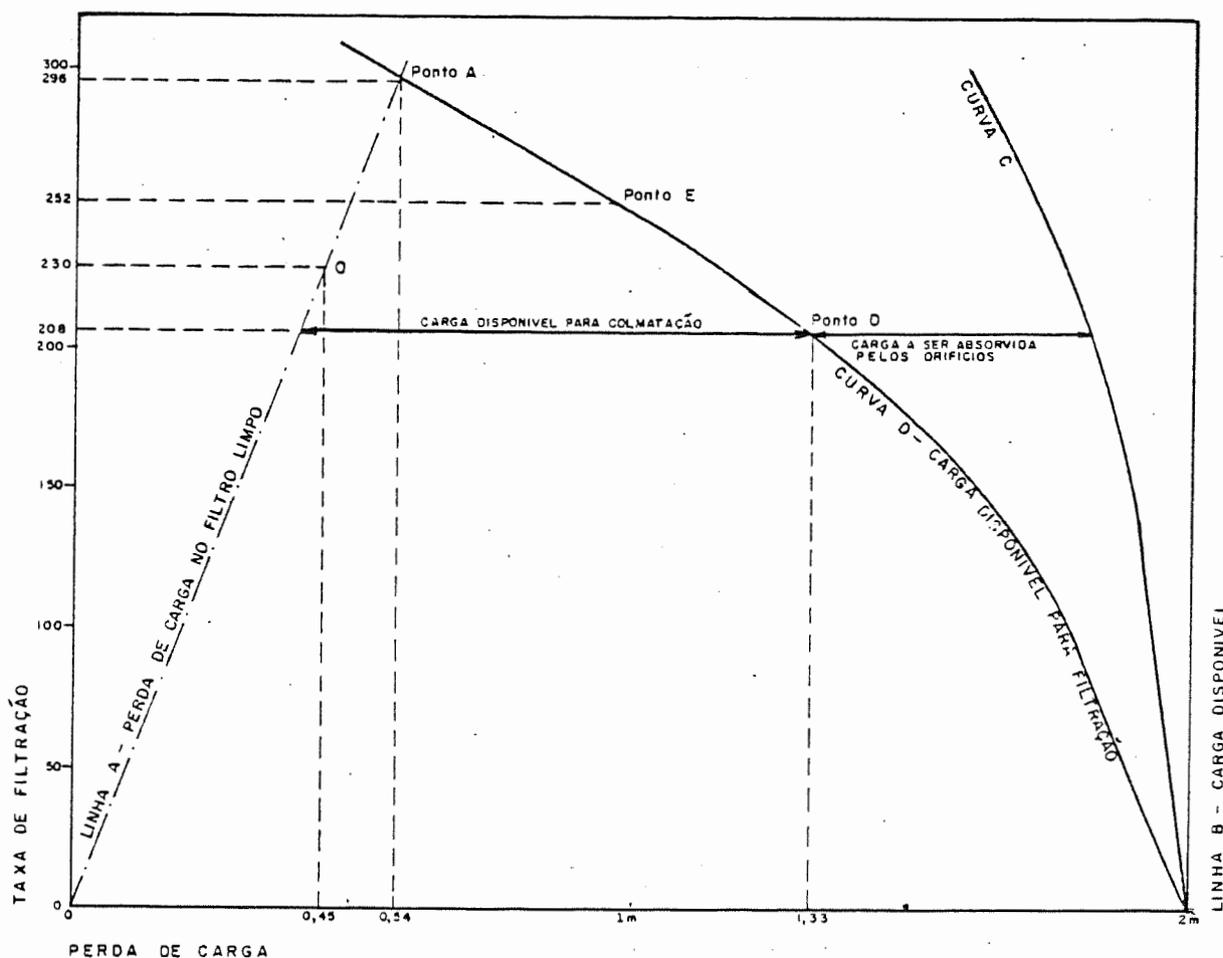


Fig. 3.7. Curvas utilizadas para projeto de filtro com taxa declinante segundo Hudson (LIMA, 1985).

onde: BI : índice de traspasse (função do tipo de floco, variando de 1, para flocos muito fracos, a 16, para flocos fortes) ($L^4 T^{-1}$).
 v : taxa de filtração (LT^{-1} , no caso em cm/min).
 d : tamanho efetivo dos grãos de areia (L, em mm.).
 H : carga hidráulica (no caso, 2/3 da carga disponível) (L).
 L : espessura do leito filtrante (L).

6º passo: determinação do ponto D, a partir dos valores de v e h determinados no passo anterior.

7º passo: cálculo das dimensões da placa de orifícios a ser introduzida na tubulação de saída do filtro, de modo que a perda de carga para a taxa calculada no 5º passo seja igual à distância horizontal entre o ponto D e a curva C; definidas as dimensões da placa, traça-se a curva D e obtém-se o ponto A, intersecção com a linha A, correspondente à taxa máxima de filtração no início da carreira.

8º passo: verificação da taxa média de filtração, através da obtenção do ponto E, equidistante entre A e D; caso esta taxa não corresponda ao valor desejado, deve-se proceder a novo cálculo, alterando-se as características do meio filtrante, ou a carga hidráulica disponível, ou as perdas de carga turbulentas, ou ainda variando-se o índice de traspasse, através de modificações nas condições de pré-tratamento.

O método proposto por Hudson é passível das seguintes considerações: a taxa de filtração declina continuamente, caracterizando uma taxa de clinante verdadeira; a taxa média é tomada como o valor médio entre a máxima e a mínima, o que pode não acontecer, uma vez que a curva de variação da mesma não é linear; o principal objetivo do método é a determinação da placa de orifício; o cálculo refere-se a um filtro isolado, e não a uma bateria; o parâmetro básico, o índice de traspasse, é empírico, e sua determinação incorreta pode levar a desvios consideráveis; há uma preocupação em se limitar o traspasse no fim da carreira de filtração e não no início, ocasião em que as altas taxas podem ser mais prejudiciais.

b. BRYANT (1974)

A metodologia apresentada por este autor inclui os seguintes passos:

1º passo: seleção do meio filtrante.

2º passo: determinação da maior taxa média de filtração admissível, obtida de dados da experiência, tal que a relação entre a taxa máxima e a mínima resultantes seja de aproximadamente 2:1.

3º passo: estimativa das perdas de carga no filtro limpo.

4º passo: cálculo da altura de água acima do leito filtrante, a qual deve ser maior que a perda de carga devido à retenção de impurezas, para se evitar a ocorrência de pressão negativa.

5º passo: cálculo das perdas de carga nas tubulações e drenos, incluindo a placa de orifício que deve ser instalada; o autor afirma, sem demonstração alguma, que o valor ótimo destas perdas turbulentas é dado por:

$$h_t = \frac{h_d - h_m}{0,75} \quad (3.3)$$

onde: h_t = perda de carga turbulenta (L).
 h_d = altura de água sobre o meio filtrante (L).
 h_m = perda de carga no meio filtrante limpo (L).

6º passo: seleção do volume da câmara de equalização, de modo a minimizar a velocidade de variação das taxas de filtração.

Como pode-se notar, trata-se de taxa declinante verdadeira com câmara de equalização após os filtros. Os critérios de projeto, conforme publicados pelo autor, são pouco claros, além de empíricos e arbitrários, dificultando uma análise mais profunda dos mesmos. Embora refira-se aos intervalos de lavagem entre os filtros, o autor não considera o funcionamento de uma bateria dos mesmos, mas sim de uma unidade isolada.

c. ARBOLEDA (1974), AMIRTHARAJAH (1979)

Estes autores não apresentam propriamente um método de cálculo de um SFTD, senão algumas indicações para o projeto do mesmo. A principal característica é a obtenção de curvas relacionando perdas de carga e taxas de filtração em coordenadas logarítmicas. O procedimento de cálculo segue aproximadamente o do método proposto por Hudson, diferindo principalmente quanto ao critério para o término da carreira de filtração. Em vez de adotar um índice de traspasse, o projetista deve fixar duas destas variáveis: taxa de filtração mínima, perda de carga máxima devida à retenção de impurezas, carga hidráulica máxima disponível. Além disto, a placa de orifício pode ou não ser necessária, sendo eventualmente substituída por uma elevação conveniente no vertedor de água filtrada. Esta última alternativa permitiria, inclusive, a adoção do sistema no qual um filtro é lavado com a água proveniente diretamente dos demais, que é uma maneira de simplificar ainda mais as instalações (ARBOLEDA, 1974; OKUN & SCHULZ, 1983).

Ambos os autores já incorporam, em suas considerações, o conceito de taxa declinante variável, prevendo a variação das taxas de filtração segundo degraus. No entanto, os critérios de projeto prevêm uma variação contínua, com as taxas declinando no intervalo entre duas lavagens consecutivas. Outro avanço é representado pela análise do sistema de filtração funcionando como uma bateria, e não em termos de uma única unidade.

d. CLEASBY & DI BERNARDO (1980), CLEASBY (1981)

A principal inovação apresentada por estes autores foi a de trabalharem, de forma controlada, com um sistema com taxa declinante variável, possibilitando uma definição clara do comportamento hidráulico do mesmo, pelo menos para a situação estudada. Assim, o sistema é caracterizado pela diminuição das taxas de filtração em degraus, permanecendo as mesmas constantes no intervalo entre duas lavagens. Neste período, o nível d'água acima do leito filtrante sobe continuamente, a partir de um valor mínimo inicial, obtido quando um filtro recém-lavado é posto em operação, até um máximo final, quando outra unidade deve ser lavada. Durante a lavagem, também ocorrem acréscimos, tanto no nível d'água, quanto nas taxas de filtração dos filtros remanescentes.

A metodologia proposta pelos autores visa a determinação da carga hidráulica necessária à obtenção de uma determinada taxa média de filtração, bem como a fixação dos níveis de operação e das taxas nas diversas unidades ao longo do tempo.

Os autores observaram que as variações das perdas de carga com o tempo eram semelhantes em filtros idênticos operados em paralelo, um com taxa constante, os outros constituindo um SFTD. Assim, as variações dos níveis neste último podem ser determinadas dividindo-se a perda de carga total ocorrida num filtro com taxa constante, que apresente a mesma duração na carreira de filtração, pelo número de unidades do SFTD.

O método proposto também faz uso, basicamente, das curvas relacionando perdas de carga e taxas de filtração, interpretadas de acordo com o comportamento descrito para a taxa declinante variável e apresentadas conforme a figura 3.8. A taxa máxima de filtração no início da carreira é limitada em 1,3 a 1,5 vezes a taxa média. Isto é obtido adotando-se valores adequados para a carga hidráulica disponível (correspondente ao nível N2), ou aumentando-se as perdas de carga turbulentas (curva 2).

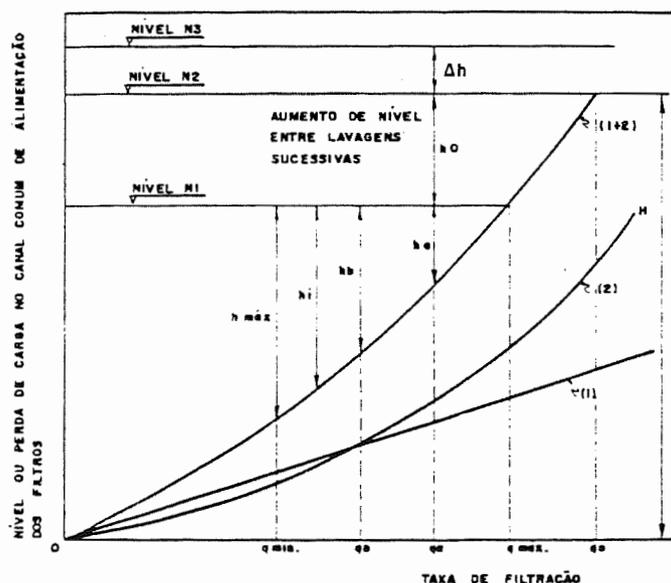


Fig. 3.8. Variação das perdas de carga e dos níveis de operação com as taxas de filtração em um sistema com taxa declinante variável (DI BERNARDO, 1983).

Para determinar as taxas de filtração, os autores assumiram uma distribuição simétrica das mesmas em relação à taxa média. Esta é uma aproximação, que supõe uma variação linear do coeficiente de permeabilidade durante a colmatação dos filtros, que na verdade não ocorre. O método proposto também não permite prever-se a duração das carreiras de filtração.

Não obstante estas limitações, esta metodologia representou uma

significativa contribuição para projetos de SFTD, permitindo, além da obtenção de dados para sua implantação, avaliar-se a influência de parâmetros como o número de filtros da bateria, a carga hidráulica disponível, as perdas de carga turbulentas etc. O seu grande mérito foi o de não recorrer a coeficientes empíricos, caracterizando-se como um critério racional, cujas limitações foram reduzidas, em parte, por aperfeiçoamentos e correções posteriores (CLEASBY, 1981). O desenvolvimento de um modelo mais eficiente (DI BERNARDO, 1985, 1986a), entretanto, tornou-a uma metodologia superada.

e. GRABOVSKII & LARKINA (1984), YAROSHEVSKAYA & KUL'SKII (1985), ARBOLEDA et alii (1985), CHAUDHRY (1987a, 1987b), SAATÇI (1990)

Embora desenvolvidos separadamente por autores de diversas origens (URSS, Colômbia, Brasil e Arábia Saudita), os modelos em questão apresentam alguns pontos em comum, que permitem uma análise conjunta dos mesmos.

Inicialmente, todos foram obtidos a partir de considerações teóricas tradicionalmente empregadas na análise de sistemas de filtração em geral. Os estudos foram feitos utilizando-se equações de balanço de massa, de continuidade e de variação, ou da própria taxa de filtração com o tempo, ou do coeficiente de permeabilidade com o depósito de partículas no meio filtrante. A forma de apresentação dos modelos também é semelhante, constituindo-se de equações diferenciais ou sistemas de equações, que necessitam de resolução por métodos numéricos, normalmente com o uso de computadores.

Em seu estudo, GRABOVSKII & LARKINA (1984) deduzem fórmulas aproximadas que descrevem a variação da taxa de filtração e do coeficiente de permeabilidade com o tempo. Para este último, são empregadas as formulações propostas por Mintz e por Shekhtman, apresentadas sob a forma única de:

$$K(t) = K_0 (1 - \delta^n)^3 \quad (3.4)$$

onde: $K(t)$: coeficiente de permeabilidade num tempo qualquer t (LT^{-1});
 K_0 : coeficiente de permeabilidade no meio filtrante limpo (LT^{-1});
 $\delta = \sigma/\epsilon_0$: volume relativo de partículas retidas.
 σ : depósito específico (volume de partículas retidas/volume do leito filtrante).
 ϵ_0 : porosidade do meio filtrante limpo.
 n : coeficiente que assume o valor 1 no modelo de Mintz (suspensões coaguladas) e 0,5 no de Shekhtman (não coaguladas).

Apesar de fazer referências aos trabalhos de Cleasby e Di Bernardo, o referido estudo considera a taxa declinando de maneira contínua durante toda a carreira de filtração. São também apresentadas fórmulas para determinar a duração da carreira de filtração que acarreta a máxima produção de água filtrada ou o mínimo consumo de água para lavagem. As equações resultantes no modelo incorporam coeficientes empíricos, alguns de difícil de terminação, como a densidade média dos depósitos de partículas. Não há comprovação experimental das fórmulas desenvolvidas.

No outro trabalho soviético (YAROSHEVSKAYA & KUL'SKII, 1985), os autores também supõem a taxa de filtração declinando de maneira contínua e, além disto, de forma linear. O modelo baseia-se numa fórmula proposta anteriormente por Mintz, através da qual pode-se determinar o tempo durante o qual um filtro pode ser operado sem perda de qualidade do efluente. Esta equação inclui quatro coeficientes empíricos que refletem as condições da água a ser filtrada e do meio granular. A partir da referida fórmula, da variação linear da taxa de filtração e do acréscimo de perda de carga com o tempo, são desenvolvidas equações cuja solução, por métodos numéricos, permite que se projetem filtros com taxa declinante verdadeira. Como no caso anterior, os autores não apresentam dados comprovando a aplicabilidade e a validade da teoria proposta.

O modelo matemático desenvolvido por ARBOLEDA et alii (1985) refere-se especificamente a sistemas de filtração com taxa declinante variável. A partir de princípios básicos de hidráulica, o modelo procura determinar alguns parâmetros operacionais de tais sistemas, como as taxas de filtração e as variações de níveis e perdas de carga ao longo do tempo. Para tanto, é utilizado um sistema de equações com a seguinte forma geral:

$$H = (K'_i/A) q_i + K_t (q_i)^2 \quad (3.5)$$

$$K'_i = K'_0 (1 + \alpha V_i)(1 - \beta V_i)^{bv_i} \quad (3.6)$$

$$Q = \sum q_i + (dH/dt) A_t \quad (3.7)$$

- onde:
- H : perda de carga total (L).
 - $K'_i = L/K$: coeficiente de perda de carga laminar (T).
 - L_i : espessura do leito filtrante (L).
 - K : coeficiente de permeabilidade (LT^{-1}).
 - A : área de um filtro (L^2).
 - q_i : vazão através do filtro de ordem i (L^3T^{-1}).
 - K_t : coeficiente de perda de carga turbulenta ($L^{-5}T^2$).
 - K'_0 : coeficiente de perda de carga laminar inicial (T).
 - V_i : volume de água filtrada até um tempo t (L^3).
 - v_i : taxa de filtração (LT^{-1}).
 - α, β, b : constantes empíricas.
 - Q : vazão total afluente ao sistema (L^3T^{-1}).
 - dH/dt : acréscimo de nível num intervalo de tempo (LT^{-1}).
 - A_t : área total dos filtros (L^2).

A primeira das três equações traduz as perdas de carga existentes ao longo de cada unidade filtrante, sendo largamente empregada em projetos de filtração; nela estão representadas as perdas de carga laminares e turbu

lentas através de um filtro, correspondentes, respectivamente, aos termos de primeira e segunda ordem. A equação seguinte mostra a variação do coeficiente de perda de carga laminar (que é inversamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade) em função do tempo, este apresentado como volume de água filtrado. Trata-se de uma equação aproximada, desenvolvida a partir de pesquisas feitas por Ives, e que incorpora três constantes empíricas. Tais constantes são obtidas através da calibração do modelo, ajustando-se a equação a dados experimentais, por um processo de tentativa e erro. Os autores reconhecem, entretanto, que os parâmetros calculados para uma carreira de filtração em particular não se aplicam necessariamente às demais, mesmo em condições aproximadas, indicando apenas uma tendência de comportamento dos filtros.

A terceira equação adotada no modelo é simplesmente um balanço de massa no sistema, com a vazão total afluente sendo igualada à soma das diferentes vazões em cada um dos filtros, mais o volume de água acumulado em decorrência da variação do nível d'água nestes.

O número de incógnitas (H, K_1', q_1) é igual ao de equações, constituindo um sistema determinado, que pode ser resolvido por métodos numéricos. Os autores apresentam a aplicação da teoria proposta a um caso experimental, obtendo um ajuste satisfatório entre o comportamento previsto e o observado. Não obstante tais resultados favoráveis, o modelo em questão apresenta limitações significativas, sobretudo em relação à determinação das constantes em píricas já referidas, o que dificulta bastante a sua utilização.

O estudo teórico desenvolvido por CHAUDHRY (1987a, 1987b) também utiliza as equações (3.5) e (3.7) para descrever as perdas de carga e o balanço de massa no sistema. Já para representar a variação do coeficiente de permeabilidade durante as carreiras de filtração, é empregado o modelo proposto por Shekhtman, apresentado na equação (3.4), com $n = 0,5$. A partir destas equações, o autor chega a uma formulação do tipo:

$$\frac{dP}{dT} = f(P,T) \quad (3.8)$$

onde: P : volume filtrado adimensional.
T : tempo adimensional.

Trata-se de uma equação diferencial ordinária não-linear de primeira ordem, estabelecida em termos de parâmetros adimensionais. A função $f(P,T)$ é representada por duas diferentes expressões, correspondentes aos casos em que consideram-se ou não as perdas de carga turbulentas. Os parâmetros adimensionais são obtidos a partir de dados como a área dos filtros, a vazão to tal afluente, a concentração da suspensão afluente, o coeficiente de permeabilidade inicial, o coeficiente de filtração e a capacidade final de deposição de partículas por unidade de volume do leito filtrante. Os dois últimos, pelo menos, necessitam de determinação experimental, sendo função de caracte rísticas do meio filtrante e da suspensão a ser filtrada; tal determinação é relativamente complexa, a exemplo dos métodos anteriores, constituindo-se em fator de dificuldade para a aplicação do modelo.

A equação (3.8) foi deduzida inicialmente para um filtro em operação contínua, caracterizando modos de operação com distribuição equitativa de vazão e com taxa declinante verdadeira. Na verdade, este último seria um caso particular do primeiro, em que a capacidade de armazenamento a montante dos filtros seria infinita e a variação do nível d'água, nula. O sistema com distribuição equitativa de vazões é considerado como um sistema com taxa declinante para efeito de elaboração do modelo teórico, sendo o acúmulo de água resultante da elevação do nível d'água acima dos filtros o responsável pela redução da taxa de filtração ao longo do tempo. Na maioria dos casos reais, entretanto, este volume acumulado é muito pequeno em relação ao volume filtrado no mesmo período, fazendo com que a taxa se mantenha praticamente constante neste modo de operação. Como é este o comportamento observado no intervalo entre duas lavagens num sistema de filtração com taxa declinante variável, a teoria pode ser aplicada a este caso. O resultado desta generalização é um sistema de equações do tipo da (3.8), que deve ser resolvido numericamente. A solução do mesmo mostra as variações das perdas de carga, das taxas de filtração e da concentração de partículas na água, durante o tempo de funcionamento de uma bateria de filtros.

O autor apresenta várias simulações do comportamento de sistemas de filtração com taxa declinante variável (CHAUDHRY, 1987b), em que os principais parâmetros investigados são o valor e a localização das perdas de carga turbulentas, a taxa média de filtração, a altura do leito filtrante e o número de filtros em operação. As curvas obtidas mostram diferentes padrões de comportamento para os referidos sistemas, tendo como ponto comum a variação da taxa de filtração na forma de degraus. Embora tais padrões sejam, na maior parte dos casos, teoricamente justificados, haveria necessidade de serem comprovados através de dados experimentais.

Em trabalho recentemente publicado (SAATÇI, 1990), foram propostas algumas modificações no modelo teórico desenvolvido por Chaudhry. A primeira delas, que já havia sido apresentada em artigo anterior (SAATÇI, 1989), refere-se à maneira pela qual o coeficiente de permeabilidade correspondente a um determinado leito filtrante deve ser calculado. Enquanto Chaudhry adota o cálculo de K a partir do depósito específico médio no leito, Saatçi propõe a determinação da média harmônica entre os K_1 das diversas sub-camadas. Outra modificação é o emprego de variáveis dimensionais, que, segundo este último autor, teriam maior interesse para o engenheiro. Por fim, a teoria tem seu alcance ampliado, através da inclusão dos modelos de Mints e de Ives, ao lado do de Shekhtman, para descrever a variação de K ao longo das carreiras de filtração.

Objetivando comparar dados experimentais com as previsões teóricas do modelo modificado, são apresentados resultados de investigação realizada em laboratório com um filtro piloto. Tais dados, entretanto, são muito limitados, não permitindo concluir-se pela validade da proposta. Além disto, tanto as considerações teóricas quanto a investigação experimental referem-se a um sistema em operação contínua, ou seja, funcionando, ou com taxa declinante verdadeira, ou com distribuição equitativa de vazões. A dificuldade de serem obtidos alguns parâmetros empíricos, comum a todos os modelos

incluídos neste ítem, também é outro fator que persiste neste último, contribuindo para limitar sua utilização.

f. DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b)

O critério proposto por este autor para o projeto de sistemas de filtração com taxa declinante variável também se constitui num modelo matemático, apresentando-se como um sistema de equações que procura descrever o comportamento de uma bateria de filtros. A principal diferença em relação à aqueles reunidos no ítem anterior é o fato de que o modelo de Di Bernardo não emprega qualquer equação que represente a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo. Como consequência, não há parâmetros empíricos a serem determinados, o que vem a ser uma vantagem significativa do modelo. Por outro lado, este não é capaz de prever o desenvolvimento da filtração ao longo do tempo, principalmente em termos de duração das carreiras, intervalos entre lavagens e mesmo variações das taxas de filtração nestes períodos.

Apesar destas limitações, este modelo tem se constituído num instrumento bastante útil para o projeto e a análise de sistemas de filtração com taxa declinante variável, aos quais ele especificamente se refere. Através dele, pode-se determinar as taxas de filtração e as variações do nível d'água nos filtros, tanto durante o período de operação, quanto durante a retirada de um filtro para ser lavado. As influências do número de unidades, da taxa média de filtração, das perdas de carga turbulentas e da carga hidráulica disponível para a filtração, entre outros fatores, também podem ser investigadas empregando-se o modelo em questão.

Na elaboração do mesmo, considerou-se uma bateria de filtros trabalhando de maneira repetitiva, com as vazões em cada um deles mantendo-se constantes no intervalo entre lavagens consecutivas e declinando na forma de degraus. Além disto, o sistema não deve possuir capacidade de armazenamento de água significativa a montante dos filtros. Curvas típicas mostrando este padrão de comportamento foram apresentadas anteriormente nas figuras 3.5 e 3.8. Nesta última, a curva (1+2) é a representação gráfica da equação (3.5), que traduz as perdas de carga no filtro limpo.

O método de Di Bernardo considera que o escoamento através do leito filtrante é laminar, e assim permanece mesmo em estágios elevados de colmatação. Desta forma, a perda de carga devida à retenção de impurezas é sempre uma função linear da taxa de filtração, podendo ser expressa como:

$$h = k \cdot v \quad (3.9)$$

onde: h : perda de carga devida à retenção de impurezas (L).
 k : coeficiente de perda de carga devida à retenção de impurezas (T).
 v : taxa de filtração (LT^{-1}).

Assim, na figura 3.8, cada um dos valores de h_0 , h_a , h_b e h_{max} pode ser representado como função da respectiva taxa de filtração, segundo uma equação semelhante à (3.9), resultando em diferentes valores de k .

O grande mérito do modelo foi o de permitir que sejam determinados os valores de k (que é inversamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade, K), sem que seja preciso recorrer-se a qualquer formulação empírica, como em modelos já discutidos. Para tanto, o autor considerou que, durante o período em que um filtro é retirado de operação para ser lavado, não há retenção ou arraste significativo de partículas nos demais filtros. Deste modo, o valor de k em cada um deles, imediatamente antes da retirada daquela unidade, permanece o mesmo no momento de sua reintrodução no sistema, quando os filtros passam a operar com taxas diferentes das anteriores. Como consequência, pode-se montar um sistema de equações que, a partir da carga hidráulica total disponível e da taxa média de filtração, fornece as taxas em cada um dos filtros e as variações de nível no sistema.

Assim, considerando uma bateria de quatro filtros, conforme mostrado nas figuras 3.5 e 3.8, pode-se identificar as situações apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2. Taxas de filtração e perdas de carga durante processo repetitivo de um SFTD variável .

Situação	Nível D'água	Filtros	Taxas de Filtração	Perdas de Carga Devidas às Impurezas	Coefficientes de Perda de Carga
Filtro F1 recém-lavado	N_1	F1 F2 F3 F4	$v_{máx.}$ v_a v_b $v_{mín.}$	zero h_a h_b $h_{máx.}$	zero k_o k_a k_b
Antes da lavagem do filtro F4	N_2	F1 F2 F3 F4	$v_{máx.}$ v_a v_b $v_{mín.}$	h_o $h_a + h_o$ $h_b + h_o$ $h_{máx.} + h_o$	k_o k_a k_b $k_{máx.}$
Filtro F4 recém-lavado	N_1	F1 F2 F3 F4	v_a v_b $v_{mín.}$ $v_{máx.}$	h_a h_b $h_{máx.}$ zero	k_o k_a k_b zero

A equação (3.9) pode ser escrita para cada uma das linhas do Quadro 3.2, com os valores de k aparecendo em duas situações diferentes (antes e após a lavagem de um filtro). A partir deste conjunto de equações, e dos cálculos das perdas de carga no filtro limpo, através da equação (3.5), podem ser determinadas as taxas de filtração que ocorrerão em cada uma das unidades, bem como as variações do nível d'água, comum a todas. Para tanto, adota-se um valor inicial para, por exemplo, $v_{máx.}$, já tendo sido fixados a taxa média e o nível N_2 . As demais taxas podem ser então estimadas empregando-se o sistema de equações descrito. Por um processo iterativo, os valores obtidos vão sendo progressivamente corrigidos, até que seja obtida a

condição final, na qual a soma das taxas de filtração em todas as unidades seja igual à taxa média multiplicada pelo número destas. Utilizando um programa específico para computador, este processo pode ser realizado sem maiores dificuldades e de maneira rápida. Da mesma forma, as taxas de filtração e os níveis durante a lavagem de um filtro também podem ser determinados.

Aplicando o modelo a duas situações reais de operação, uma em escala piloto e outra numa estação de tratamento, DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b) obteve uma aproximação muito boa entre os valores previstos e os observados, mostrando que a teoria se ajusta bem às situações investigadas. Além disto, o autor realizou diversas simulações teóricas, comparando diferentes taxas médias de filtração, níveis máximos de operação (N_2) e número de unidades filtrantes, permitindo que se avalie a influência de cada um destes parâmetros sobre o comportamento do sistema. A partir dos resultados favoráveis obtidos, e em decorrência de sua simplicidade e facilidade de aplicação, o modelo em questão vem sendo empregado com sucesso em vários projetos de implantação ou reforma de estações de tratamento de água.

Conforme já referido, a maior limitação deste modelo diz respeito à sua impossibilidade de prever o desempenho do sistema ao longo do tempo. Ou seja, assume-se uma situação de equilíbrio, que deve ser atingida rapidamente, mantendo-se constante e repetindo-se a cada ciclo. Além do fato de estas suposições nem sempre ocorrerem, não há como determinar-se um dos principais parâmetros de projeto, que é a duração da carreira de filtração. Esta dificuldade, entretanto, não é exclusiva dos sistemas de filtração com taxa declinante, sendo comum aos demais métodos de operação. Para resolvê-la é que têm sido propostas diferentes formulações para a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo, algumas das quais foram adotadas pelos autores de alguns dos modelos discutidos anteriormente. Tais formulações, como se viu, incluem coeficientes empíricos, cuja determinação, às vezes bastante complexa, precisa ser feita em instalações pilotos. Na prática corrente de projetos de sistemas de filtração, mesmo para operação com taxa constante, tais procedimentos não têm sido empregados.

Quando a duração da carreira de filtração não é fixada arbitrariamente a partir de valores de experiências anteriores, a alternativa mais comum é a sua obtenção diretamente na instalação piloto. Em filtros operando com taxa constante, tal instalação é de fácil concepção e funcionamento. Já uma instalação piloto com taxa declinante é, em geral, muito mais complexa, tanto na sua implantação, quanto na operação. Seria interessante, portanto, dispôr-se de uma metodologia que permitisse a obtenção de dados de um sistema de filtração com taxa declinante variável a partir de um filtro piloto relativamente simples, o que viria completar o modelo proposto por Di Bernardo. A duração da carreira de filtração, além de outros parâmetros de interesse, poderia ser determinada durante a operação da instalação piloto, o que, em conjunto com os dados calculados através do modelo, permitiria a elaboração de projetos completos para os sistemas de filtração. O deenvolvimento e a verificação da referida metodologia para o levantamento dos dados são os objetivos da pesquisa aqui apresentada.

3.4. COMPORTAMENTO DESCRITOS PARA SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL

Neste ítem, serão abordados os comportamentos de sistemas de filtração com taxa declinante variável descritos na literatura. Serão considerados tanto os comportamentos de instalações reais, quanto os previstos teoricamente. Deve-se destacar que todos eles seguem o padrão já descrito anteriormente para este método de operação, e que as diferenças entre os mesmos referem-se a aspectos ou detalhes específicos, decorrentes da disposição do sistema ou do modelo teórico empregado. A comparação entre os diferentes comportamentos permite uma melhor análise dos dados, tanto dos já existentes, quanto dos obtidos nesta pesquisa.

Na primeira descrição da filtração com taxa declinante variável, não foi mencionada explicitamente a redução das taxas na forma de degraus, mas sim "uma taxa declinando gradualmente ao longo da carreira de filtração" (CLEASBY, 1969). Por outro lado, o autor referia-se a um aumento das taxas nos filtros mais limpos, para compensar a redução naqueles mais sujos; tais mudanças, entretanto, seriam sempre lentas e graduais. Estas observações, porém, não podem ser confirmadas a partir dos dados apresentados pelo autor, referentes a uma estação de tratamento adaptada para o novo método de operação; além de não serem suficientemente detalhados, foram obtidos em condições operacionais desfavoráveis.

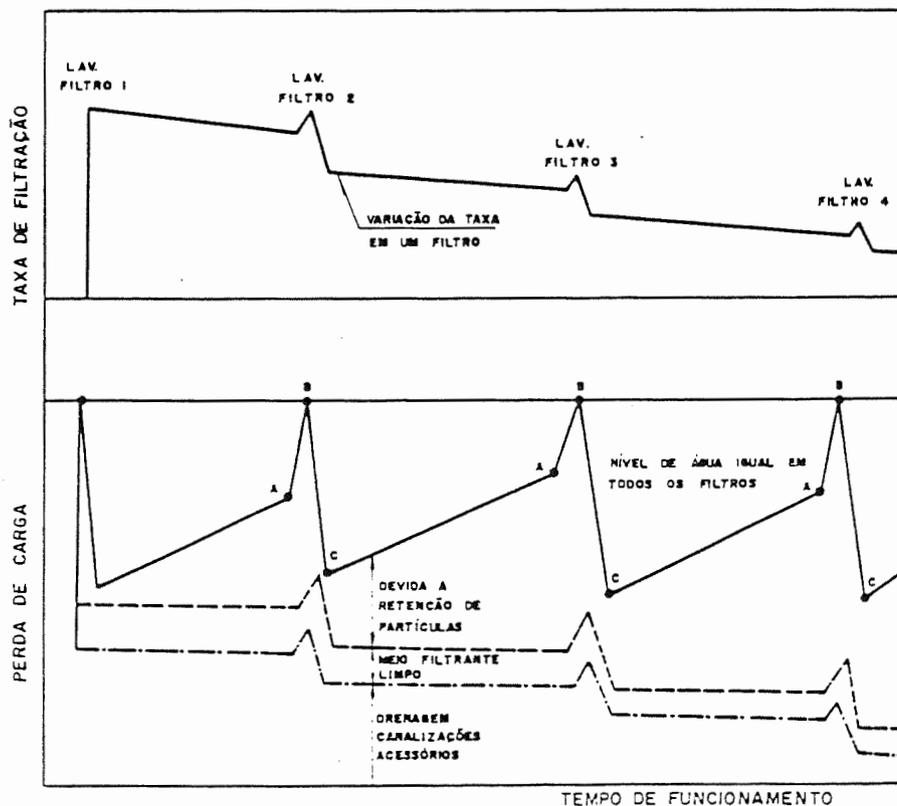


Fig. 3.9. Variação da taxa de filtração e das perdas de carga ao longo do tempo para um SFTD variável, segundo CLEASBY (1972a).

No artigo seguinte sobre o mesmo tema (CLEASBY, 1972a), já são apresentadas curvas de variação das taxas de filtração e do nível d'água num SFTD variável, aqui reproduzidas na figura 3.9. Embora a descrição no texto seja idêntica à anterior, as curvas indicam uma variação das taxas segundo degraus. Além disto, as mesmas declinam em todos os intervalos entre as lavagens, independentemente do estado de colmatação dos filtros. Ocorrendo esta situação, a taxa de filtração do sistema como um todo também deve declinar nos mesmos intervalos, sendo necessária alguma forma de armazenamento da água. Outra observação importante é a ocorrência dos picos, tanto nas taxas quanto na perda de carga (equivalente ao nível d'água), no momento da lavagem de uma das unidades. Por fim, deve-se mencionar o fato de o nível mínimo de operação (ponto C) ser rapidamente alcançado após o filtro recém-lavado entrar em operação, indicando um armazenamento pouco significativo a montante dos filtros.

Esta primeira descrição da filtração com taxa declinante variável traduzia o comportamento idealizado pelo seu autor, não sendo ainda produto de dados reais e apresentando possíveis contradições. Os primeiros resultados de um levantamento mais detalhado da operação de um sistema real, obtidos numa estação de abrandamento de água subterrânea (CLEASBY, 1972b), mostraram algumas divergências em relação à concepção teórica. As principais foram quanto às taxas de filtração, que, nos intervalos entre as lavagens, às vezes declinavam, outras mantinham-se constantes, ou ainda sofriam um ligeiro aumento; a variação na forma de degraus, porém, foi observada. A instalação investigada, entretanto, afastava-se de um sistema ideal, por apresentar filtros diferentes entre si, os quais também não eram lavados a intervalos regulares.

Outros resultados de estações de tratamento operando com taxa declinante variável (ARBOLEDA, 1974) também mostraram um comportamento irregular do sistema, fruto de uma operação igualmente irregular, incluindo, por exemplo, a lavagem simultânea de mais de um filtro. Os dados apresentados no artigo não permitem uma análise mais detalhada, mas o comportamento teórico descrito pelo autor é semelhante ao da figura 3.9. Uma observação importante refere-se à não ocorrência de picos de vazão ou de nível nos filtros remanescentes, durante a retirada de uma unidade para ser lavada. Tal fato foi associado à existência de armazenamento a montante dos filtros, pois na instalação estudada a coleta de água decantada era afogada; assim, qualquer variação de nível nos filtros transmitia-se aos decantadores e às câmaras de floculação, sendo, em consequência, minimizada.

A primeira descrição detalhada do comportamento de um SFTD variável (DI BERNARDO & CLEASBY, 1980) foi publicada a partir dos resultados de uma investigação experimental em instalação piloto. Um exemplo típico destes resultados é apresentado na figura 3.10. A principal característica observada foi o fato de as taxas de filtração permanecerem constantes nos intervalos entre as lavagens dos filtros. Além disto, as elevações e quedas do nível d'água na instalação, durante e após as lavagens, aconteciam rapidamente. Este fato, bem como a ocorrência dos picos, refletiam a ausência de armazenamento de água a montante dos filtros pilotos.

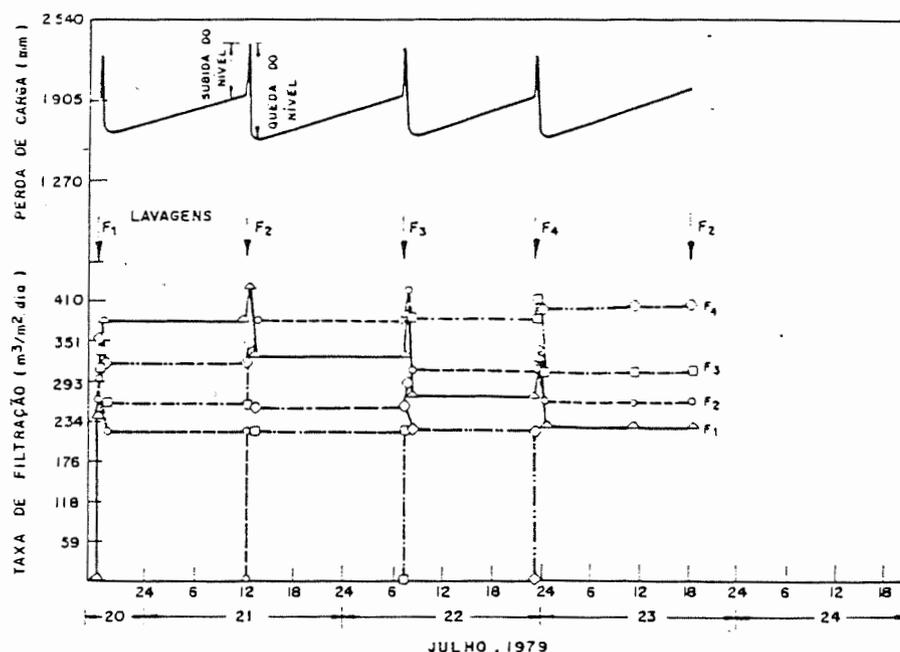


Fig. 3.10. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração, observadas na investigação experimental de DI BERNARDO & CLEASBY (1980).

Os autores observaram ainda que a maior taxa de filtração ocorria na unidade mais limpa que permanecia em operação, durante a lavagem de um dos filtros. Com relação à taxa inicial no filtro recém-lavado, dois procedimentos foram empregados para limitá-la: aumentar as perdas de carga turbulentas nas saídas dos filtros, através de uma válvula parcialmente fechada, ou limitar o nível máximo de operação, com a diminuição da carga hidráulica disponível. A primeira alternativa acarretou uma maior duração das carreiras de filtração, às custas, naturalmente, de níveis de operação mais elevados, correspondentes a filtros mais altos.

Comparando o SFTD piloto com um filtro experimental em que a taxa era mantida constante através de controle na saída, foram obtidas carreiras de filtração menores neste último, operando-se com a mesma taxa de filtração média e com aumentos iguais das perdas de carga. Os autores observaram ainda que as curvas de variação deste parâmetro com o tempo apresentavam, nos dois sistemas, a mesma inclinação, o que foi considerado lógico, uma vez que a taxa média era a mesma. Este paralelismo é, inclusive, a base do critério de projeto descrito no item 3.3 (d), proposto inicialmente por aqueles mesmos autores (CLEASBY & DI BERNARDO, 1980), e sustentado posteriormente pelo primeiro deles (CLEASBY, 1981, 1989).

Em termos de qualidade da água, a principal conclusão do trabalho foi a de que o SFTD produzia um efluente "consistente e substancialmente melhor" que o filtro com taxa constante, além de, ao contrário deste, não tender à ocorrência do traspasse final. As lavagens dos filtros provocavam efeitos negativos sobre a qualidade do efluente, sendo que, no SFTD, ocorriam picos de turbidez minutos após uma unidade recém-lavada voltar à operação. Simulações de lavagem realizadas com o filtro de taxa constante acarretaram

deteriorações mais acentuadas da qualidade do efluente, em virtude das variações mais rápidas das taxas de filtração que ocorriam nestas ocasiões. Os próprios autores reconhecem, entretanto, que a comparação entre os picos de turbidez dos dois sistemas deve ser feita com cautela, pois os valores observados no SFTD referem-se ao efluente total da bateria, enquanto os relativos ao outro filtro correspondem a uma única unidade. No caso de um conjunto de filtros com taxa constante, os picos poderiam ser menores.

Outra investigação experimental relativa a um SFTD variável foi desenvolvida na Inglaterra, ainda na década de 70, por Gregory e Yadav. Embora seus resultados fossem do conhecimento de outros pesquisadores (DI BERNARDO, 1983; DI BERNARDO & CLEASBY, 1980), somente foram publicados, parcialmente, alguns anos após, e por outros autores (ARBOLEDA et alii, 1985). O comportamento observado na instalação piloto seguiu o padrão descrito para aquele tipo de sistema, com a variação das taxas de filtração segundo degraus. As figuras 3.11 e 3.12 mostram as curvas típicas obtidas em duas diferentes condições de operação.

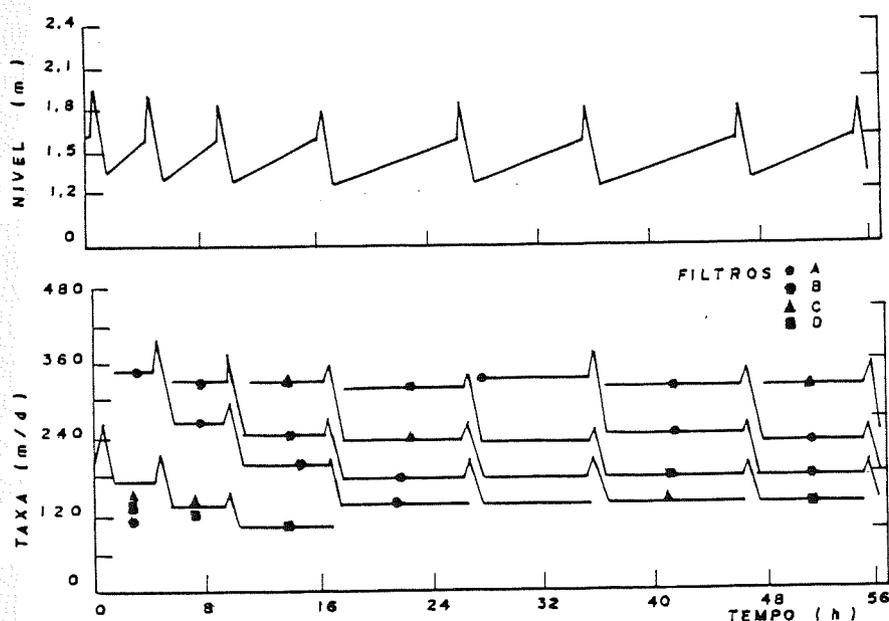


Fig. 3.11. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração obtidas por Gregory e Yadav em Medmenham, segundo ARBOLEDA et alii (1985).

Os dados levantados no Laboratório de Medmenham, exemplificados pelas curvas da figura 3.11, foram bastante semelhantes aos obtidos no trabalho anterior, com as taxas mantendo-se constantes nos intervalos entre duas lavagens consecutivas. Pode-se observar claramente que as variações das taxas não são constantes ao longo das carreiras de filtração, com os "degraus" diminuindo a cada ciclo, sem que haja uma simetria em relação à taxa média de filtração. ARBOLEDA et alii (1985) observaram também que o nível de equilíbrio atingido pelos filtros no início de cada ciclo nem sempre é o mesmo, embora os dados apresentados não indiquem haver grandes variações.

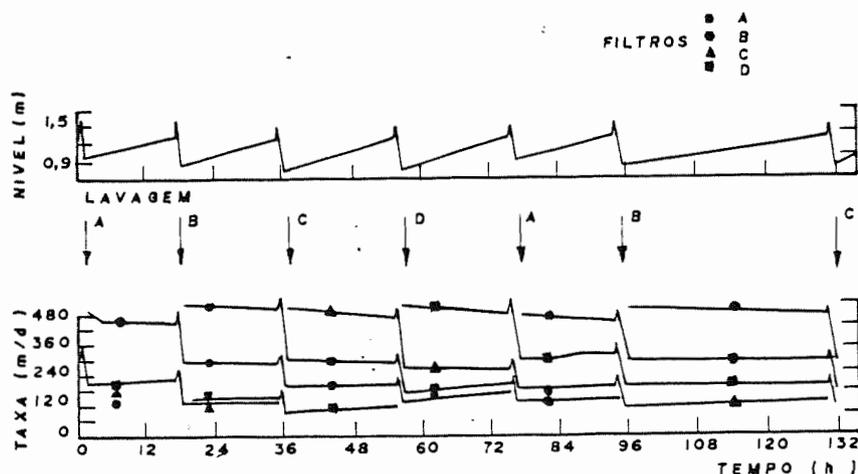


Fig. 3.12. Variações típicas das perdas de carga e das taxas de filtração obtidas por Gregory e Yadav em Burham, segundo ARBOLEDA et alii (1985).

A principal diferença destes resultados para os obtidos na Estação de Tratamento de Água de Burham, conforme pode-se ver na figura 3.12, é o fato de as taxas de filtração terem sofrido pequenas variações durante os ciclos no segundo caso. Assim, a taxa no filtro mais limpo decrescia continuamente, enquanto na unidade mais suja havia um ligeiro acréscimo. Deve-se destacar que o tipo de afluente aos dois sistemas representava a única diferença significativa entre ambos, sendo que em Medmenham era filtrada água decantada que havia sido coagulada com sulfato férrico, enquanto em Burham a água, igualmente decantada, recebia cloro, sulfato de alumínio, polieletrólito e carvão ativado nas etapas anteriores à filtração. De um modo geral, este último afluente era de melhor qualidade, com sua turbidez cerca de 50% inferior à do outro (respectivamente, valores médios de 0,8 e 1,5 UT). Como consequência, as carreiras de filtração em Burham tinham maior duração, bem como a relação entre a taxa máxima e a média era superior à observada na outra instalação.

Resultados comuns aos dois sistemas mostraram que, quando operado em paralelo com um filtro de taxa constante, o SFTD apresentava carreiras de filtração mais longas e um efluente igual ou melhor. Também foram registrados efeitos negativos sobre a qualidade da água filtrada, decorrentes da retirada de uma das unidades para ser lavada. Foi observado ainda que o filtro mais limpo, veiculando a maior taxa de filtração, gerava um efluente com maior turbidez, tanto durante a operação normal, quanto nos momentos de ocorrência de picos. Este fato seria devido a não ter havido uma preocupação em se limitar a taxa máxima de filtração, o que, aliado aos tempos de operação relativamente longos, fazia com que a unidade mais limpa ficasse sobrecarregada em relação às demais.

Uma terceira investigação experimental tratando especificamente da filtração com taxa declinante variável foi conduzida por HILMOE & CLEASBY (1986), procurando comparar este sistema com um de taxa constante, desta vez obtida a partir da variação do nível d'água acima do leito filtrante. Referindo-se ao trabalho realizado por DI BERNARDO & CLEASBY (1980), aqueles au

tores notaram que, além do tipo de controle usado para manter a taxa constante, a principal distinção entre os dois estudos era quanto ao tipo de água a ser filtrada. Enquanto no experimento anterior o afluente aos filtros era a água decantada de uma estação de abrandamento, que utilizava um manancial subterrâneo, o caso em questão apresentava uma filtração direta de uma água superficial, previamente coagulada com sulfato de alumínio ou um polímero catiônico.

Os dados obtidos não indicaram qualquer diferença entre os efluentes dos dois sistemas, em termos de turbidez, contagem de partículas e número de coliformes, ao contrário do obtido no mesmo trabalho já citado, onde o SFTD apresentou melhor desempenho. Três explicações poderiam justificar esta aparente contradição. A primeira é a de que, no estudo anterior, foi observada uma tendência à ocorrência do traspasse no filtro com taxa constante, o que favorece o SFTD, uma vez que a redução da taxa de filtração reduz ou elimina esta tendência. A mesma não se evidenciou no trabalho posterior, mesmo para o filtro com taxa constante, diminuindo uma vantagem do SFTD. As outras explicações seriam o próprio método de controle da vazão, que poderia provocar pulsações, ou a simulação de operações de lavagem, fatores que teriam contribuído para que a turbidez do efluente do filtro com taxa constante tivesse seus valores aumentados na primeira pesquisa.

Também com relação à maior taxa de filtração observada, houve uma divergência entre os dois trabalhos. Enquanto no primeiro a taxa máxima ocorria no filtro mais limpo que permanecia em operação durante a lavagem de outro, no segundo o maior valor correspondia ao filtro recém-lavado recolocado em operação. Embora não sejam apresentadas curvas mostrando o comportamento das taxas de filtração ao longo de toda a carreira de filtração, as mesmas mantinham-se constantes nos valores que eram atingidos aproximadamente 60 minutos após o término da lavagem de um filtro. Por fim, as variações das perdas de carga com o tempo registradas por Hilmo e Cleasby no SFTD foram consideradas iguais às do filtro com a mesma taxa média, mantida constante, operado em paralelo. Tal observação, feita também por Di Bernardo e Cleasby, indica que o sistema com taxa declinante variável necessita de uma carga hidráulica menor para tratar um mesmo volume de água.

Alguns exemplos de estações de tratamento de água trabalhando com taxa declinante variável também foram publicados. No artigo de CORNWELL et alii (1984) são descritos vários sistemas projetados ou adaptados para operar com taxa declinante, nos EUA. São apresentados dados um pouco mais detalhados referentes à ETA da cidade de Chesapeake, naquele país; a figura 3.13 reproduz algumas curvas mostrando a variação das taxas de filtração ao longo do tempo, em cada um dos seis filtros da estação. A principal característica observada é que a redução das taxas na forma de degraus não é evidenciada, o mesmo acontecendo com relação à ocorrência de picos por ocasião da lavagem de uma unidade. Vários fatores estariam contribuindo para determinar tal comportamento. Um deles seria a própria disposição construtiva do sistema de filtração, que permitia variações do nível d'água tanto a montante, quanto a jusante dos filtros, as últimas ocorrendo no reservatório de dis-

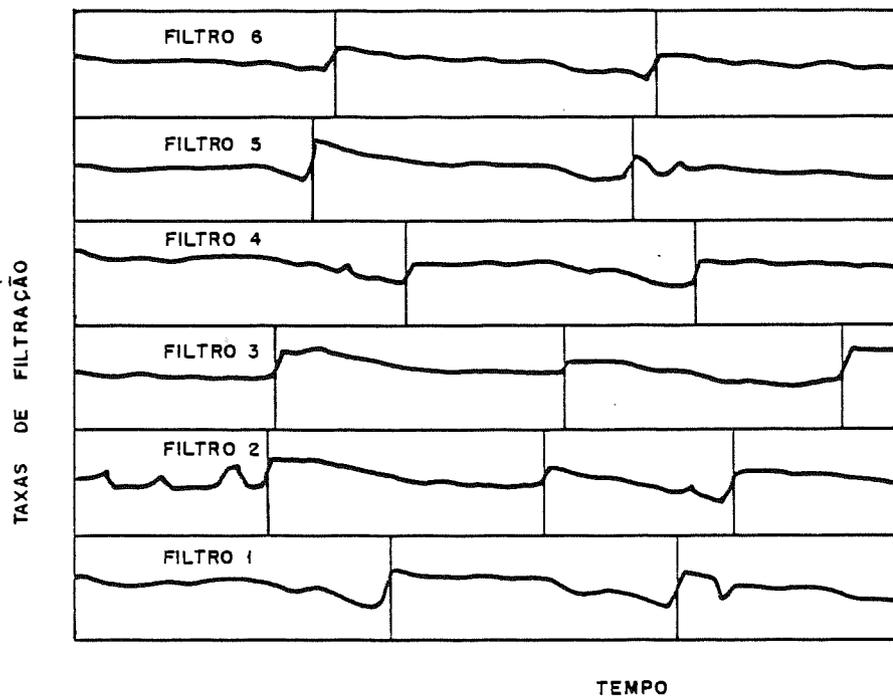


Fig. 3.13. Variação das taxas de filtração com o tempo, na ETA "Northwest River", em Chesapeake, EUA; as linhas verticais indicam o momento da lavagem do respectivo filtro (CORNWELL et alii, 1984).

tribuição. Assim, as perdas de carga seriam condicionadas não só pelo estado de colmatação dos filtros, mas também pelo consumo de água verificado no sistema de distribuição. Além disto, a lavagem das unidades era determinada sobretudo pelo aumento da turbidez do efluente ou pelo tempo de operação dos filtros, e raramente por um critério de perda de carga máxima atingida. Como resultado, as variações de perda de carga eram pequenas, assim como as diferenças entre as taxas dos diversos filtros. De qualquer maneira, os aumentos de vazão são bem claros após as operações de lavagem, assim como podem ser detectadas reduções nas demais unidades, após duas delas terem sido lavadas em intervalos curtos.

Se no exemplo anterior as taxas variavam pouco em relação ao valor médio, o oposto foi registrado na ETA de Cochabamba, Bolívia, conforme descrito no artigo de ARBOLEDA et alii (1985). Nesta estação, também contendo seis filtros, cada um deles era lavado com o efluente dos demais, o que implicava em se ter perdas de carga turbulentas baixas nas saídas dos mesmos. Como consequência, as taxas de filtração máximas atingiam valores elevados no filtro recém-lavado, da ordem de 2,0 a 2,2 vezes a taxa média. As taxas mínimas atingiam, no filtro mais sujo, valores correspondentemente reduzidos, chegando próximos a 1/5 do valor médio. Segundo os autores, tal variabilidade de vazões não acarretava prejuízos à qualidade da água filtrada. Por outro lado, as taxas mantinham-se constantes nos intervalos entre lavagens consecutivas, apesar da pequena variação do nível d'água acima dos filtros (menos de 10 cm), determinada pelo significativo armazenamento de água

nos decantadores, onde a coleta era afogada. O tipo de disposição e de operação do sistema não permitia a ocorrência, durante a lavagem dos filtros, de picos de vazão ou de nível, nem a conseqüente deterioração do efluente.

Outro levantamento de dados foi efetuado numa ETA que possuía quatro filtros operando com taxa declinante variável (DI BERNARDO, 1986b). Na figura 3.14 são reproduzidos alguns dos resultados obtidos. Foi observada a redução das taxas na forma de degraus, com as mesmas mantendo-se constantes durante quase todo o período entre as lavagens, que tinha a duração de aproximadamente doze horas. Nas duas primeiras horas, entretanto, registrava-se uma diminuição gradual das taxas em cada um dos filtros, até que o nível no canal de distribuição de água atingisse uma situação de equilíbrio (correspondente ao ponto C da figura 3.14). Este comportamento foi associado à existência de uma pequena, mas não desprezível, capacidade de armazenamento no referido canal, o que aumentava o tempo necessário para que a vazão total efluente igualasse a afluenta, após o início do funcionamento de um filtro recém-lavado. Tal armazenamento, porém, não era suficiente para eliminar os picos de vazão e nível d'água, que foram observados.

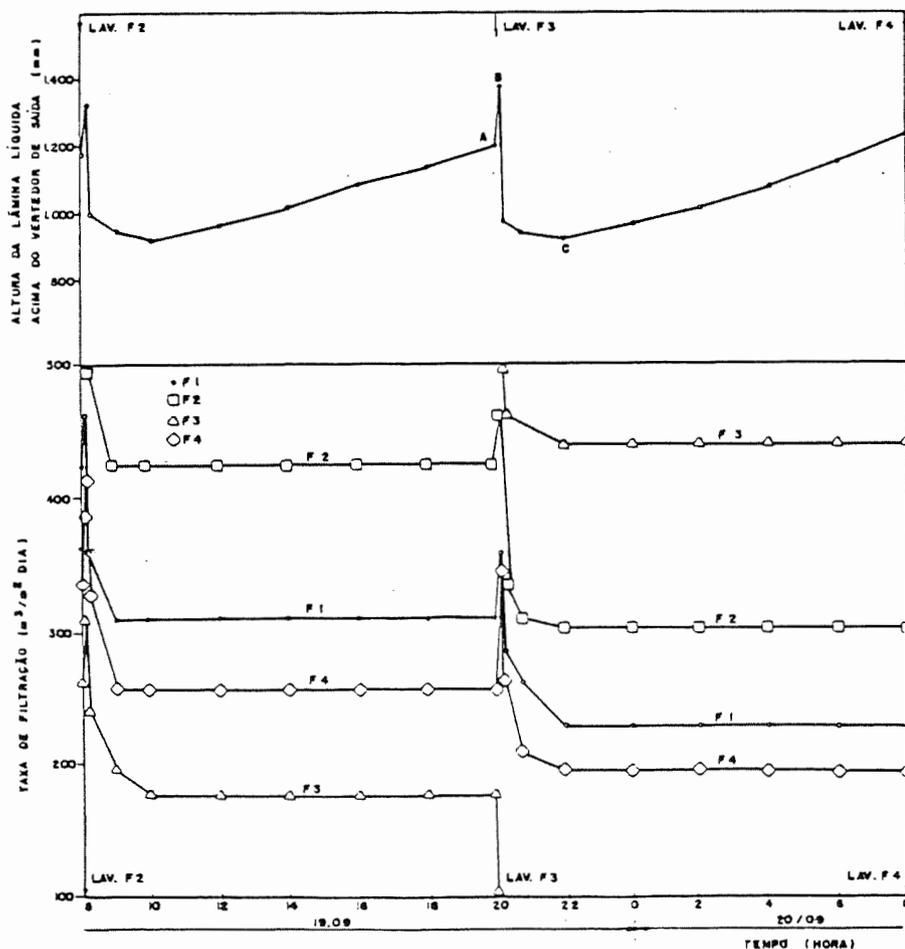


Fig. 3.14. Variações das taxas de filtração e dos níveis no canal comum de distribuição de água, para uma taxa média de $292 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, obtidas numa ETA (DI BERNARDO, 1986b).

No mesmo artigo que traz estes últimos dados, são feitas considerações mais detalhadas sobre a questão do armazenamento a montante dos filtros. O autor apresenta curvas que descreveriam as variações das taxas de filtração e do nível d'água em sistemas nos quais tal armazenamento é significativo. Tais curvas, aqui reproduzidas na figura 3.15, foram concebidas a nível teórico, necessitando de verificação experimental. Suas principais características seriam a variação contínua das taxas nos intervalos entre lavagens, aproximando-se do comportamento idealizado por Cleasby e apresentado na figura 3.9, e a pequena amplitude de variação do nível d'água a montante dos filtros. Com relação à primeira, Di Bernardo sugere a identificação de duas taxas médias de filtração: uma máxima, que ocorreria após uma unidade recém-lavada entrar em operação (q_{m1} na figura 3.15), e outra mínima (q_{m2}), registrada imediatamente antes de outro filtro ser lavado. A cada ciclo, a vazão do SFTD declinaria de um valor para outro, inicialmente devido à diminuição do nível d'água, e, a partir do momento em que as vazões de entrada e de saída se igualassem (ponto A na figura 3.15), pela ocorrência de novo armazenamento. O fato de se ter pequenas variações da lâmina d'água pode representar uma dificuldade operacional, por não permitir a visualização da perda de carga nos filtros, embora tenha como vantagem uma menor altura destes. O principal benefício decorrente da existência do armazenamento, entretanto, parece ser a ausência de picos de turbidez no efluente, quando da retirada de um filtro para a operação de lavagem.

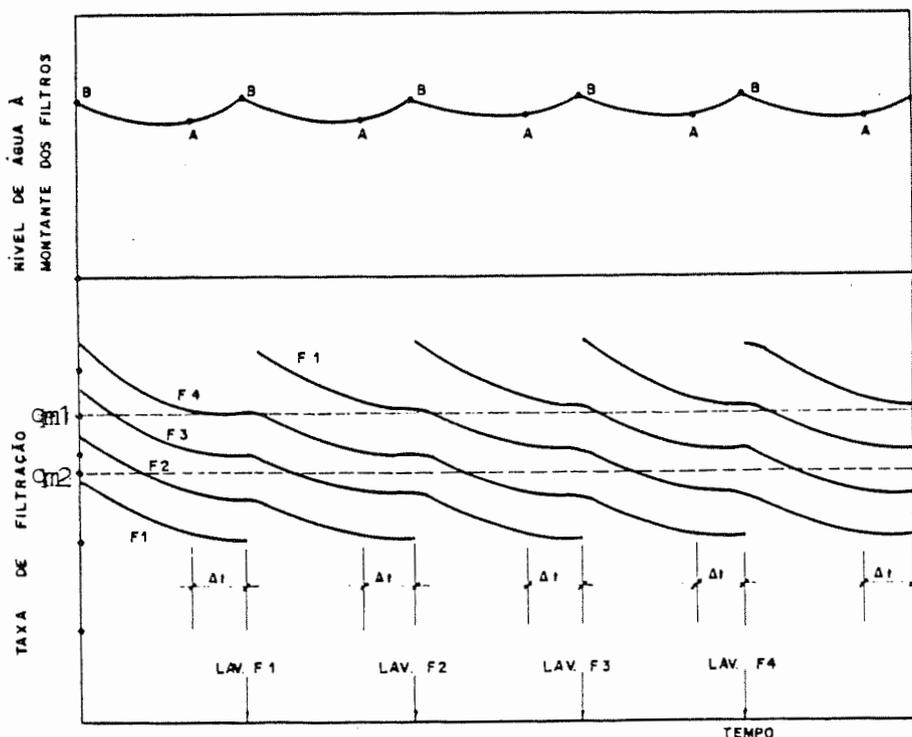


Fig. 3.15. Variações das taxas de filtração e do nível d'água num sistema de filtração com taxa declinante variável em que o armazenamento a montante dos filtros é significativo (DI BERNARDO, 1986b).

Outras curvas teóricas foram apresentadas por CHAUDHRY (1987b) ao mostrar a aplicação de seu modelo matemático a um SFTD variável. Embora sem comprovação experimental, e utilizando às vezes valores um pouco distantes da prática da filtração, as simulações apresentadas por este autor refletem algumas tendências do comportamento deste tipo de sistema. Um resultado interessante é o que mostra que os filtros da bateria já atingem uma situação de estabilidade, caracterizada pela repetição dos ciclos, após a segunda lavagem de cada um deles, o que já havia sido observado, por exemplo, na pesquisa experimental de Gregory e Yadav, conforme as figuras 3.11 e 3.12. Com relação às perdas de carga turbulentas, sua ausência leva à ocorrência de taxas de filtração bastante elevadas no início da operação de um filtro recém lavado, o que já era esperado. Por outro lado, ao comparar o desempenho de um filtro em que tais perdas localizam-se na entrada, com outro em que estas ocorrem na saída, notam-se variações mais graduais dos níveis d'água e das taxas de filtração no primeiro; em ambos, estas últimas declinam durante o primeiro ciclo, mantendo-se praticamente constantes nos demais.

Na figura 3.16 são mostradas as curvas resultantes das simulações feitas para dois diferentes valores de perda de carga turbulenta, observando-se que para o maior deles há uma menor diferença entre a taxa máxima e a mínima. Para as condições simuladas, este último caso apresenta as taxas de filtrando em todos os ciclos. Já para a perda turbulenta menor, chega a haver um aumento das taxas de filtração nos filtros mais sujos, compensando a redução acentuada que é registrada no mais limpo. Este comportamento também havia sido, de certa maneira, observado na pesquisa de Gregory e Yadav (figura 3.12), onde realmente não houve preocupação em se limitar as taxas de filtração através da introdução de perdas de cargas turbulentas no sistema.

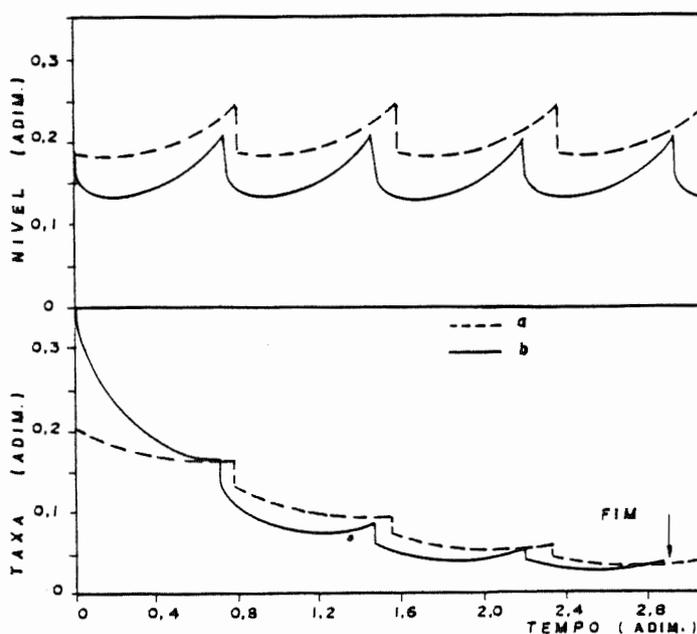


Fig. 3.16. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD, para dois valores de perda de carga turbulenta (a maior que b) (CHAUDHRY, 1987b).

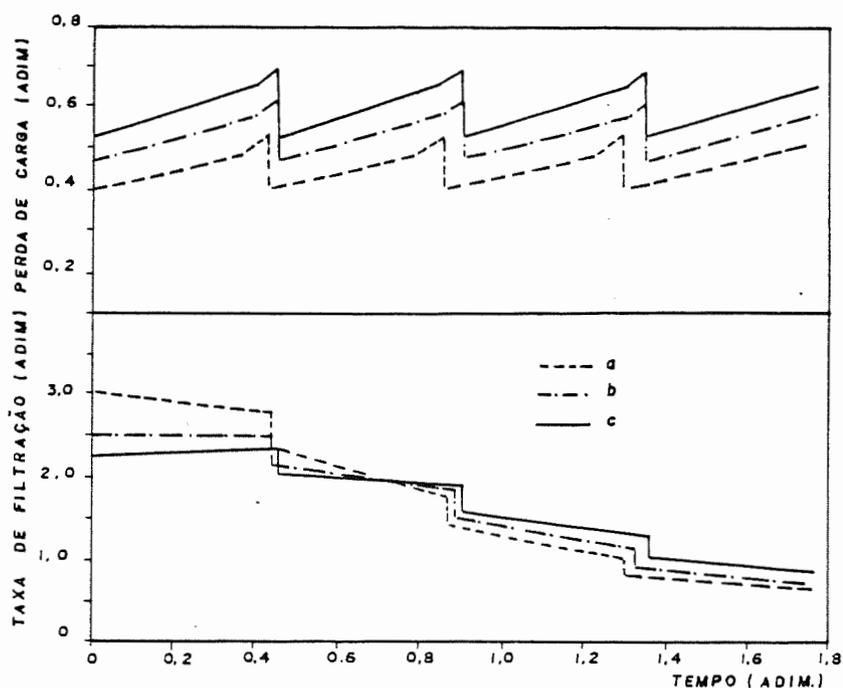


Fig. 3.17. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD, com taxa média alta e três valores de perda de carga turbulenta (crescentes de a para c)(CHAUDHRY, 1987b).

Com o dobro da taxa média de filtração do exemplo anterior, e perdas de carga turbulentas também maiores, foram feitas novas simulações, tendo sido obtidas as curvas da figura 3.17. Pode-se ver que a variação das taxas de filtração deu-se de maneira diferente em cada caso. Naquele correspondente à menor perda turbulenta, as taxas diminuíam em todos os ciclos ao longo da carreira de um filtro. Já para uma perda de carga turbulenta 2,5 vezes maior (curva c), havia um crescimento da taxa no primeiro ciclo, quando o filtro está mais limpo, observando-se um decréscimo no momento em que este encontra-se mais sujo. Quanto à variação dos níveis d'água, equivalente à variação da perda de carga total, a simulação mostrou um comportamento mais linear quando a taxa média é mais elevada, em contraposição a um padrão curvilíneo obtido para a taxa menor. Outros resultados mostraram ainda que o aumento da taxa média implica numa óbvia redução da carreira de filtração. Por fim, o emprego do modelo teórico a um SFTD variável com seis unidades de filtração gerou as curvas mostradas na figura 3.18, simuladas com os demais parâmetros iguais aos da figura 3.16. O aumento do número de filtros da bateria fez com que apenas as variações das taxas dos primeiros ciclos fossem mais significativas, aproximando o comportamento do sistema daquele observado em um filtro com a taxa declinando continuamente. Como era de se esperar, as variações de nível foram menores no sistema com mais unidades em operação.

É importante ressaltar, mais uma vez, que todos estes resultados teóricos, embora úteis ao descreverem diferentes comportamentos de SFTD, necessitariam de uma comprovação prática. Apesar do autor trabalhar com parâmetros adimensionais, pode-se inferir, a partir de informações contidas num

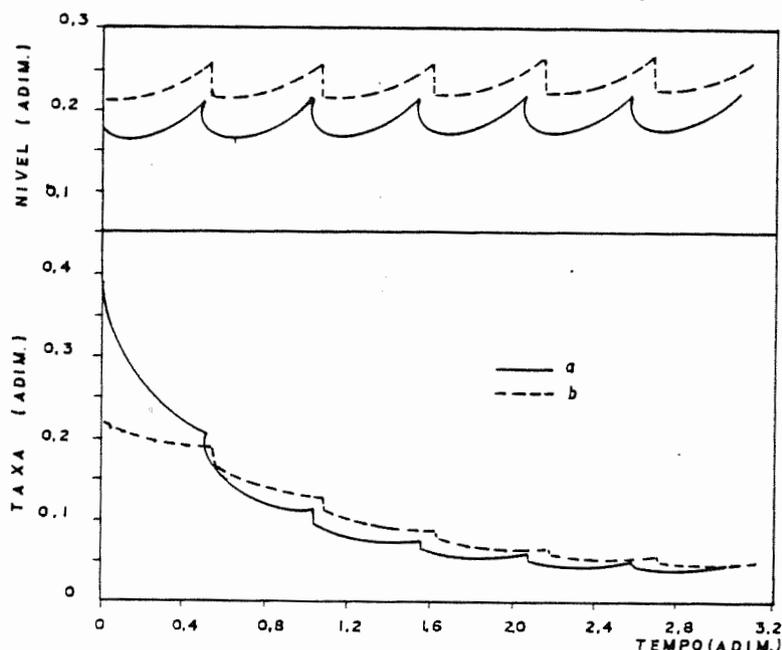


Fig. 3.18. Variações dos níveis d'água e das taxas de filtração com o tempo, num filtro típico de um SFTD com seis unidades, para dois valores de perda de carga turbulenta (a maior que b) (CHAUDHRY, 1987b).

exemplo apresentado em outro artigo (CHAUDHRY, 1987a), que alguns valores obtidos afastam-se de condições reais. Assim, intervalos entre lavagens de apenas 3 horas, ou perdas de carga de até 50 metros, não refletem situações encontradas na prática da filtração, levando a um questionamento acerca da aplicabilidade dos dados teóricos apresentados.

Utilizando parâmetros compatíveis com situações reais, DI BERNARDO (1986a, 1986b) também mostra resultados de simulações realizadas com o modelo por ele proposto. A análise dos valores das taxas de filtração e das variações dos níveis d'água permite a observação de alguns aspectos relacionados ao comportamento de um SFTD variável, tais como:

a. Para uma mesma taxa média de filtração e uma mesma carga hidráulica disponível, um aumento do número de filtros da bateria acarreta um aumento da taxa máxima e uma redução da mínima, diminuindo também a variação de nível entre lavagens sucessivas.

b. Para uma mesma carga hidráulica disponível e mesmo número de unidades no sistema, um aumento da taxa média de filtração provoca um acréscimo nas taxas de todos os filtros, bem como uma diminuição da variação de nível ao longo de cada ciclo.

c. Para um mesmo número de filtros e uma mesma taxa média, um aumento da carga hidráulica disponível faz com que a taxa máxima aumente e a mínima diminua, devendo haver também um aumento na duração da carreira de filtração.

d. Para uma mesma taxa média e uma mesma carga hidráulica disponível, o aumento de nível durante a lavagem de um filtro da bateria é menor,

quanto maior for o número de unidades no sistema.

O modelo de Di Bernardo, conforme já mencionado, não considera variações das taxas de filtração no intervalo entre lavagens sucessivas, assumindo que as mesmas permanecem constantes neste período, e atribuindo a elas um valor único para cada filtro, no referido intervalo.

Os diversos comportamentos de SFTD variáveis descritos neste item, seja em instalações pilotos, em estações de tratamento ou a nível teórico, mostram que este tipo de operação de filtros por gravidade pode apresentar certas diferenças relativas a alguns de seus principais parâmetros, notadamente a variação das taxas de filtração e dos níveis d'água com o tempo. Pode-se observar, também, que esta diferenciação é condicionada por fatores como o número de filtros na bateria, a taxa média de filtração, a carga hidráulica disponível, o valor e a localização das perdas de carga turbulentas, a existência de armazenamento de água no sistema, além de características do meio filtrante e do afluente. Assim, uma referência correta a determinado SFTD deve procurar especificar tais fatores, de modo que o comportamento esperado ou observado no mesmo possa ser melhor avaliado.

Por outro lado, a maioria dos dados apresentados, sobretudo os obtidos em instalações reais, mostrou, com relação às taxas de filtração nos intervalos entre lavagens, uma tendência a que as mesmas se mantenham constantes. Os principais desvios notados foram ligeiros aumentos ou diminuições durante os ciclos, em geral dos valores extremos (taxas máxima e mínima), ou ainda a necessidade de que um certo tempo decorra, antes de se atingir uma condição de equilíbrio. A partir dos resultados aqui analisados, os fatores que contribuem para acentuar tais desvios são, sobretudo, a existência de armazenamento de água, as perdas de carga turbulentas e o valor da taxa média de filtração, embora não se possa concluir com certeza sobre quais os efeitos reais de todos os parâmetros envolvidos. Não há dúvida de que muitas situações possíveis num SFTD não foram devidamente investigadas, carecendo-se de maiores subsídios para o seu melhor conhecimento.

A observação a respeito das taxas de filtração justifica, portanto, o fato de que, numa descrição genérica de um SFTD variável, sejam elas consideradas como "aproximadamente constantes no intervalo entre lavagens". Da mesma forma, justifica-se o emprego do modelo proposto por Di Bernardo a um grande número de situações operando com taxa declinante variável, para os quais aquela condição possa ser caracterizada. É importante, entretanto, uma correta aplicação do modelo, identificando-se os casos em que o comportamento do sistema apresenta desvios acentuados. Neste sentido, a realização de investigações experimentais ainda representa a melhor maneira de se obter informações mais confiáveis sobre tais sistemas.

4. METODOLOGIA

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

4.1.1. Características do Método Proposto

A obtenção de dados que permitam o projeto e a operação de sistemas de filtração com taxa declinante pode ser feita diretamente a partir de uma instalação piloto que reproduza este tipo de controle. Neste caso, não há necessidade de qualquer modelação teórica, uma vez que os parâmetros que caracterizam o comportamento do sistema são medidos na prática, descrevendo uma situação real observada. Assim, as taxas de filtração em cada uma das unidades, os níveis operacionais, a duração das carreiras, entre outros, podem ser determinados e adotados no projeto final.

Entretanto, uma instalação piloto como esta pode ser, conforme já referido, bastante complexa ou mesmo inviável, tanto em sua execução quanto no seu funcionamento. Em vista disto, uma das características do método investigado na presente pesquisa é a de fazer o levantamento de dados em uma instalação mais simples, constituída por um filtro piloto operando com taxa constante. Tal filtro substitui toda uma bateria trabalhando com taxa declinante, e os dados assim gerados podem ser usados, em conjunto com as informações obtidas através do modelo de Di Bernardo, para a definição dos parâmetros de operação e projeto de um SFTD.

Naturalmente, o comportamento de um filtro com taxa constante difere do comportamento de outro com taxa declinante. No caso da taxa declinante variável, entretanto, há uma certa semelhança, uma vez que, conforme já foi visto, as taxas permanecem aproximadamente constantes no intervalo entre duas lavagens, declinando na forma de degraus. Mesmo assim, para que os dados de um sistema possam ser aplicáveis ao outro, é preciso o estabelecimento de critérios, dando origem ao método aqui discutido.

Uma proposta básica para tal método pode ser descrita em termos da seguinte sequência de passos:

- a. Inicialmente, monta-se uma instalação experimental, que pode

ser constituída de um único filtro piloto, o qual deve ter as mesmas características de cada uma das unidades do SFTD a ser projetado, sobretudo em relação ao meio filtrante, que deve ser idêntico. Tal instalação deve permitir a operação com taxa constante e nível d'água variável, como num sistema com distribuição equitativa de vazões, pois, além de evitar a colocação de dispositivos controladores, tal método de operação é o que mais se aproxima da taxa declinante variável.

b. Em seguida, executam-se diversas carreiras de filtração, adotando-se, em cada uma delas, uma determinada taxa, fixada arbitrariamente de modo que toda a faixa de variação esperada para as taxas do SFTD (entre 0,5 e 1,5 vezes a taxa média) seja coberta. Os principais parâmetros monitorados serão as perdas de carga (ou o nível d'água acima do leito filtrante) e a qualidade do afluente e do efluente (em termos, por exemplo, de turbidez), ao longo do tempo.

c. Pode-se, assim, traçar as curvas de variação das perdas de carga com o tempo, para as diversas taxas ensaiadas, obtendo-se uma família daquelas, conforme exemplificado na figura 4.1. Se as variações observadas forem tipicamente lineares, como acontece nos filtros com ação de profundidade, pode-se determinar as inclinações das retas resultantes, que, devidamente corrigidas quanto à taxa de operação e à qualidade da água, poderão definir um único coeficiente de variação da perda de carga com o tempo, característico do filtro em estudo.

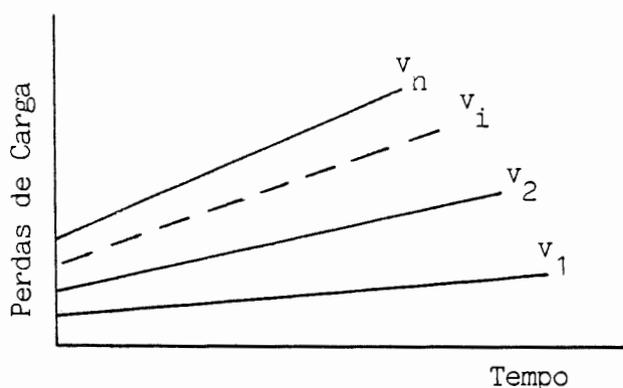


Fig. 4.1. Curvas típicas de variação das perdas de carga totais com o tempo, para diferentes taxas de filtração (v).

d. Em paralelo com o levantamento de dados na instalação piloto, faz-se a aplicação do modelo matemático de Di Bernardo ao SFTD em questão, a partir do conhecimento da taxa média de filtração, do número de filtros, da carga hidráulica máxima disponível e das equações de perda de carga para o filtro limpo. Estas últimas implicam na determinação dos coeficientes K' e K_t , da equação (3.5), os quais podem ser calculados teoricamente, mas também podem ser obtidos no filtro piloto. Os principais resultados decorrentes da aplicação do modelo serão as variações de nível e as taxas de filtra

ção em cada uma das unidades do SFTD.

e. A partir destes valores, determina-se, empregando-se o coeficiente de variação da perda de carga calculado em (c), o tempo necessário para que o filtro com a taxa máxima apresente a correspondente variação de nível no intervalo entre duas lavagens sucessivas. Obtida assim a duração de um ciclo, basta multiplicá-la pelo número de unidades da bateria, determinando-se a duração da carreira de filtração. O raciocínio expresso neste item assume que o aumento da perda de carga num SFTD é o mesmo do observado num filtro isolado trabalhando com uma taxa constante igual à taxa máxima daquele sistema, permitindo que o comportamento de um seja deduzido em função do outro. Essa é a premissa básica na qual se baseia o método aqui proposto, o qual possibilita a obtenção dos parâmetros referentes a um SFTD utilizando um modelo matemático e uma instalação piloto simples.

4.1.2. Etapas de Desenvolvimento da Pesquisa

A verificação do método de levantamento de dados, proposto inicialmente conforme descrito no item anterior, consistiu, basicamente, em comparar-se uma aplicação do mesmo com os resultados da operação de um SFTD experimental, avaliando-se a possibilidade de deduzir-se o comportamento deste último a partir do primeiro.

Para atingir este objetivo principal, a pesquisa foi conduzida em três etapas, duas delas com investigações experimentais, a saber:

a. Primeira Etapa: correspondeu à execução, através da operação de uma instalação piloto com taxa constante, dos passos (a), (b) e (c) descritos em 4.1.1. Foram obtidas, para as diversas taxas de filtração ensaiadas, as variações das perdas de carga com o tempo e ao longo do meio filtrante, bem como os valores de turbidez do afluente e do efluente.

b. Segunda Etapa: complementou-se a aplicação do método proposto, executando-se os passos (d) e (e) do item 4.1.1, com destaque para a simulação do comportamento de um SFTD para diversas taxas médias e cargas disponíveis para filtração, utilizando-se o modelo matemático de Di Bernardo. Ao fim desta etapa, podiam ser determinados, para cada situação correspondente a um par daqueles valores (taxa média e carga disponível), os demais parâmetros relativos a um SFTD, incluindo a duração da carreira dos filtros.

c. Terceira Etapa: consistiu na operação de um SFTD piloto, comparando-se o seu comportamento com o previsto a partir da aplicação do método investigado, nas etapas anteriores. Foram testados diferentes valores para taxa média e carga disponível, sendo registradas as variações de perdas de carga com o tempo e ao longo dos meios filtrantes, bem como as taxas de filtração em cada um dos filtros e os valores de turbidez do afluente e dos efluentes. Além disto, um filtro semelhante ao utilizado na primeira etapa foi também operado nesta terceira fase, acompanhando o comportamento de uma das unidades do SFTD, em paralelo. Assim, o método de levantamento de dados de operação e projeto de SFTD pôde ser melhor avaliado e aprimorado, a partir de sua verificação experimental.

4.2. PRIMEIRA ETAPA : OPERAÇÃO COM TAXA CONSTANTE

4.2.1. Instalação Piloto

Na primeira etapa da pesquisa, foi montada e operada, nas dependências da Estação de Tratamento de Água de São Carlos (ETASC), uma instalação piloto, apresentada esquematicamente na figura 4.2 e constituída pelos seguintes componentes:

a. Filtros pilotos de seção circular, com diâmetro interno de 91 mm e altura total de cerca de 3,6 m, construídos em acrílico transparente e divididos em módulos tubulares presos entre si por meio de flanges com parafusos. Os filtros eram abertos na extremidade superior e fechados na inferior. A 0,10 m acima do fundo havia uma placa perfurada e, sobre esta, uma tela de aço inoxidável, constituindo um "fundo falso". Na câmara abaixo deste, havia entradas para água (tubulação de PVC de 25 mm) e para ar (tubulação de cobre de 6 mm). Uma outra abertura, destinada à saída de água de lavagem, e também de 25 mm, situava-se a cerca de 2,6 m acima da placa perfurada, havendo ainda a possibilidade de serem utilizadas outras aberturas, em níveis intermediários. Os filtros eram mantidos na posição vertical com auxílio de uma estrutura de aço e madeira, especialmente executada para tal fim, possuindo ainda varões de aço entre os diversos flanges, o que garantia a rigidez do conjunto. Durante esta etapa, foram utilizados quatro filtros com as características descritas, visando tão somente acelerar a investigação experimental, já que bastaria uma única unidade para se obter os dados desejados.

b. Sistema de alimentação dos filtros, com a parte inicial trabalhando por recalque e o restante por gravidade. A primeira era composta por um conjunto moto-bomba, com potência de 1 cv, e tubulações de sucção e recalque de PVC, com 25 mm de diâmetro. A linha de recalque, contendo uma válvula de gaveta e uma derivação para descarte do excesso de vazão, levava a água decantada da ETASC até uma caixa de aço, com volume aproximado de 20 l, situada dois andares acima da galeria onde localizavam-se os filtros pilotos. Desta caixa, cujo nível d'água era mantido constante por meio de um extravasor, a água descia por gravidade através de um tubo de PVC de 25 mm e por uma tubulação flexível de 40 mm, que chegava verticalmente até a altura média dos filtros. Neste ponto, havia uma redução para uma tubulação horizontal de 32 mm, de onde partiam as derivações para cada uma das unidades filtrantes. Tais derivações eram constituídas por tubos de PVC de 20 mm, dispostos verticalmente, nos quais estavam instalados os medidores de vazão, além de válvulas de esfera acionadas por meio de alavancas, permitindo o controle da quantidade de água chegando em cada filtro. A entrada da mesma dava-se em queda livre, a partir da extremidade superior aberta, saindo diretamente das tubulações de 20 mm. Nestas, assim como na tubulação horizontal de 32 mm, havia derivações com válvulas de gaveta, para a execução de eventuais descargas; desta última, além disto, partia outra derivação, que encaminhava parte da vazão afluyente a um dos turbidímetros de escoamento contínuo.

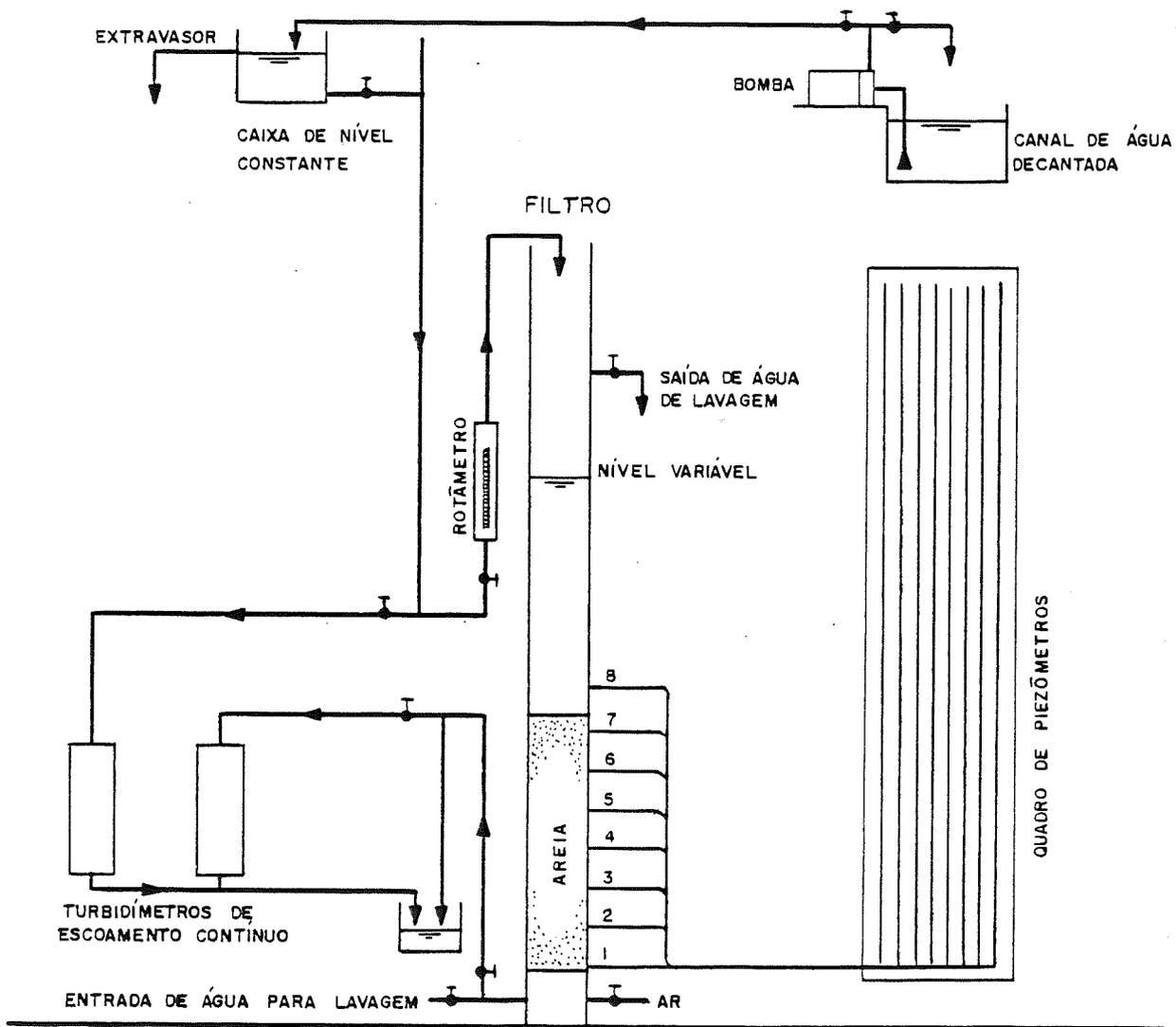


Fig. 4.2. Esquema da instalação piloto utilizada na primeira etapa da pesquisa, mostrando apenas um dos quatro filtros empregados.



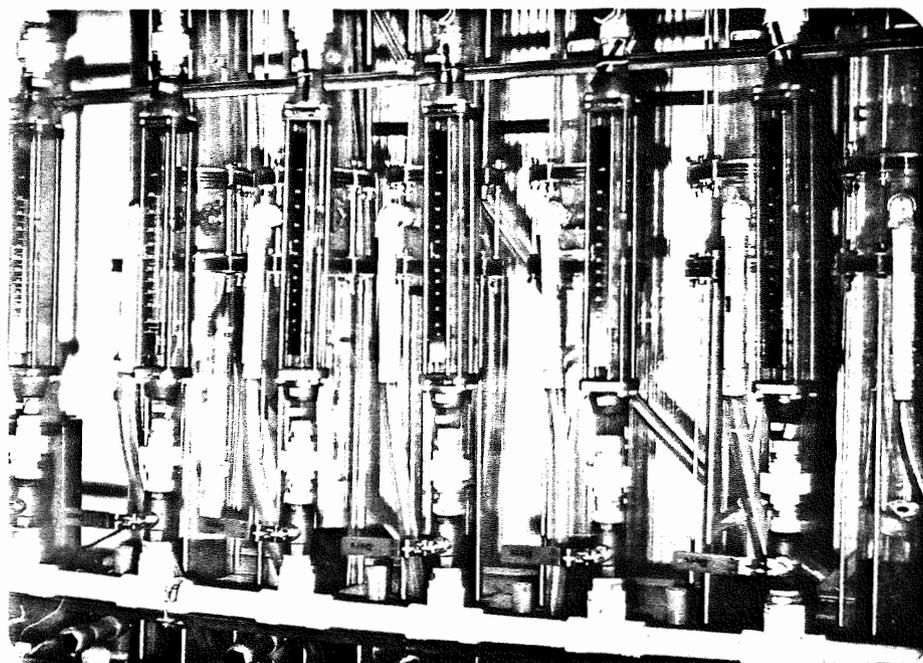


Fig. 4.3. Detalhe do sistema de alimentação dos filtros pilotos, mostrando os rotômetros e as válvulas para ajuste da vazão afluenta a cada unidade.

c. Sistema de medição de vazão, constituído por rotômetros (OMEL, São Paulo, Brasil), com escalas de 0 a 200 l/h, instalados verticalmente em cada uma das tubulações de 20 mm descritas no ítem anterior, com o escoamento no sentido ascendente. A figura 4.3 apresenta uma vista destes aparelhos.

d. Sistema de coleta de água filtrada, composto por tubulações de PVC de 25 mm, partindo das câmaras inferiores dos filtros e subindo até uma altura coincidente com o topo da camada filtrante, a partir de onde a água vertia através de tubos flexíveis para uma canaleta, indo para o esgotamento da ETASC. No ponto mais alto das tubulações havia derivações, providas de válvulas de esfera, visando encaminhar parte da vazão efluente de cada filtro ao correspondente turbidímetro.

e. Sistema para lavagem dos filtros pilotos com água, com a entrada em cada uma das unidades dando-se pela mesma tubulação de saída de água filtrada, a partir de uma derivação com válvula de gaveta. A água para lavagem era proveniente das instalações da ETASC, chegando aos filtros por gravidade, bastando-se acoplar uma mangueira plástica na referida entrada.

f. Sistema para lavagem auxiliar com ar comprimido, que era obtido num compressor elétrico da própria ETASC, e encaminhado aos filtros através de um tubo plástico flexível, com derivações livres para a saída do excesso. O ar era introduzido nos filtros acoplando-se o referido tubo na entrada mencionada no ítem (a), e abrindo-se uma válvula própria para gases aí existente.

g. Sistema de coleta de água de lavagem, composto por tubulações de PVC e de plástico flexível, ambas de 25 mm, partindo da abertura locali-

zada a cerca de 1,35 m acima do topo da camada filtrante, e encaminhando a água para o esgotamento da ETASC. Tais tubulações possuíam válvulas de gaveta, que permitiam mantê-las fechadas durante a operação normal dos filtros. Este sistema também era empregado para a medição volumétrica das vazões afluentes a cada uma das unidades, antes do início do funcionamento das mesmas. Para tanto, bastava que a saída de água filtrada permanecesse fechada, desviando-se toda a vazão que entrava no filtro para a saída de água de lavagem, fazendo-se sua medição e procedendo-se aos ajustes necessários com a unidade fora de operação.

h. Sistema para medição de perda de carga, constituído por tubos piezométricos de plástico flexível e transparente, com diâmetro de 6 mm, instalados ao longo dos filtros a cada 0,20 m a partir do fundo falso. Para cada filtro havia oito piezômetros, numerados de 1 a 8 de baixo para cima, com o primeiro junto à placa perfurada e o último acima do topo do leito filtrante. Deste modo, a leitura no piezômetro nº1 fornecia a perda de carga na saída da unidade, enquanto o nº 8 mostrava a perda de carga total no filtro; a diferença destes dois valores equivalia à perda no meio filtrante. A leitura dos níveis piezométricos era feita através de uma escala com subdivisões em milímetros, tendo o zero coincidindo com o fundo falso.

i. Meio filtrante, composto unicamente por areia quartzosa, apresentando as seguintes características:

- . Tamanho do menor grão: 0,70 mm
- . Tamanho do maior grão: 2,00 mm
- . Tamanho efetivo (d_{10}): 0,90 mm
- . Coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}): 1,33
- . Altura da camada filtrante: 1,25 m

Devido à tela de aço colocada sobre a placa perfurada, a areia pôde ser disposta diretamente sobre o fundo falso, não havendo necessidade da camada suporte para se evitar perda de material. A areia, previamente lavada, foi colocada simultaneamente nos quatro filtros pilotos, garantindo-se a igualdade dos meios filtrantes. A altura final de 1,25 m foi atingida após uma compactação da areia, por meio de pancadas leves nas paredes das unidades.

j. Sistema para medição de turbidez, constituído por um turbidímetro nefelométrico de bancada (HACH, mod. 2100A, Ames, EUA) e cinco turbidímetros nefelométricos de escoamento contínuo (HACH, mod. 1720C, Ames, EUA), estes últimos acoplados a registradores gráficos (RUSTRAK, mod. 288, EUA). O aparelho de bancada foi utilizado nos primeiros 21 ensaios, enquanto os outros não haviam sido ainda instalados. Destes últimos, um era responsável pela medição da turbidez do afluente e os demais mediam a turbidez dos efluentes de cada um dos quatro filtros. A água era encaminhada aos aparelhos por meio de tubos plásticos flexíveis, com 6 mm de diâmetro, providos de válvulas de esfera que permitiam manter-se a vazão dentro dos limites especificados pelo fabricante. Antes do início de seu funcionamento, os turbidímetros foram calibrados segundo as instruções contidas no manual de operação, uti-

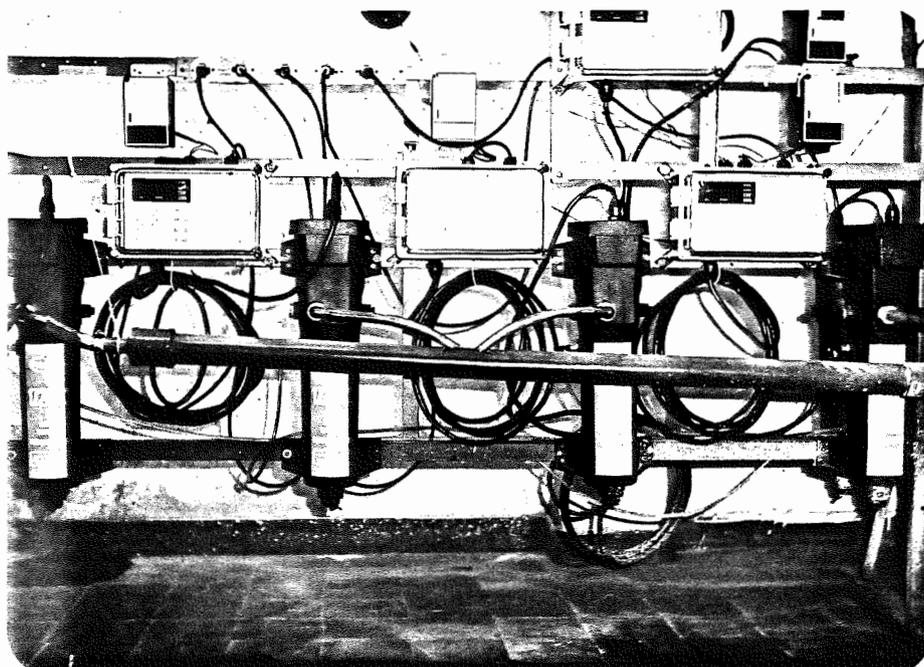


Fig. 4.4. Vista dos turbidímetros de escoamento contínuo.

lizando-se um padrão de formazina. Não foi possível fazer-se comparações de talhadas entre as medidas de turbidez obtidas no aparelho de bancada e as registradas pelos outros equipamentos, pois o primeiro foi retirado para reparos quando os demais passaram a ser empregados. Não obstante, notou-se que os valores apresentados por estes últimos eram relativamente menores que os mostrados pelo primeiro.

Os turbidímetros de escoamento contínuo foram instalados numa estrutura metálica localizada próxima aos filtros pilotos, podendo ser vistos na figura 4.4, juntamente com os respectivos registradores e com os tubos que encaminhavam para o esgotamento a água que passava pelos aparelhos.

4.2.2. Metodologia dos Ensaios

Durante a primeira etapa da pesquisa, os filtros da instalação piloto foram operados com taxa constante de filtração, segundo o princípio em que o nível d'água acima do leito filtrante vai elevando-se à medida em que aumenta a perda de carga devida à retenção de impurezas. Este comportamento é o que se observa tanto num sistema com distribuição equitativa de vazões quanto num sistema com taxa declinante variável.

Cada ensaio desta etapa correspondeu a uma carreira de filtração, definida por uma taxa de operação, que se mantinha constante ao longo do tempo. As principais considerações a respeito destes ensaios são:

a. Afluente aos filtros: foi utilizada água decantada da ETASC, captada junto à saída de um de seus decantadores. A ETASC recebe água bruta de três mananciais superficiais distintos, cujas contribuições são reunidas

na entrada do sistema. O tratamento é do tipo convencional, empregando mistura rápida hidráulica, floculação mecanizada com paletas de eixo vertical, sedimentação, filtração rápida por gravidade em leito simples de areia, de sinfecção através de pós-cloração e fluoretação. Os produtos químicos aplicados antes da sedimentação são o sulfato de alumínio e a cal, além de um polímero natural, que, durante o período de realização da pesquisa, era o amido de batata ou de araruta. Em condições normais de operação, a água decantada da ETASC apresenta turbidez entre 1 e 3 UT, valores estes, entretanto, sensíveis a alterações na coagulação, decorrentes de mudanças na qualidade da água bruta ou de falhas na operação, com a dosagem incorreta dos produtos químicos.

b. Taxas de filtração: foram ensaiadas carreiras de filtração cujas taxas foram fixadas nos valores de 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 600 m³/m².d. Considerando-se que, num SFTD variável, as taxas máximas e mínimas ficam compreendidas, em geral, no intervalo de 0,5 a 1,5 vezes a taxa média, e que os valores adotados para esta ficam, normalmente, entre 200 e 400 m³/m².d, os ensaios cobriram toda a faixa de interesse. Foram realizadas pelo menos duas carreiras com cada uma das taxas mencionadas, sendo que a sequência dos valores era definida de maneira aleatória. Como havia quatro filtros pilotos disponíveis, em alguns casos a mesma taxa era adotada em duas unidades diferentes, procurando testar-se a reprodutibilidade dos resultados.

c. Controle e medição das vazões: para as taxas de filtração referidas, as vazões nos filtros variavam entre 54,2 e 162,5 l/h (1 l/h correspondendo a 3,7 m³/m².d). Embora os rotâmetros instalados apresentassem escala com subdivisões a cada 2 l/h, a medição volumétrica das vazões foi adotada como principal referência para este parâmetro, devido à precisão e à sensibilidade maiores, e sem acarretar muitas dificuldades de execução. Os rotâmetros, por sua vez, eram úteis para uma determinação aproximada da vazão, antes do ajuste fino realizado volumetricamente, bem como para indicar eventuais alterações da mesma, ao longo da operação. As medidas volumétricas, feitas utilizando-se uma proveta plástica de 500 ml e um cronômetro digital, eram obtidas a partir de dois pontos, conforme a situação. Antes do início da carreira de filtração, seguia-se o procedimento descrito no item 4.2.1 (g), desviando-se o afluente para a saída de água de lavagem e evitando-se, com isto, o escoamento através do meio filtrante limpo, enquanto não era obtida a vazão desejada. Após iniciado o ensaio, as medidas volumétricas eram feitas coletando-se a água filtrada junto à saída da mesma. Eventuais correções eram feitas acionando-se as válvulas de esfera instaladas nas tubulações de alimentação de cada um dos filtros.

d. Procedimentos para início e término dos ensaios: a instalação experimental permitia a realização de até quatro ensaios simultâneos, cujo início dava-se num mesmo instante, correspondendo ao início das carreiras de filtração. Com os filtros devidamente lavados, acionava-se o sistema de alimentação dos mesmos, abrindo-se, uma a uma, as entradas das unidades e procedendo-se ao ajuste inicial das vazões, com auxílio dos rotâmetros. Em seguida, era feito o ajuste fino, já descrito, através do sistema de cole-

ta de água de lavagem. Obtida a vazão desejada em cada filtro, as saídas de água filtrada eram abertas, fechando-se as de água de lavagem e iniciando-se as carreiras. O nível d'água no interior de cada filtro assumia a posição inicial, correspondente ao filtro limpo, elevando-se com o tempo, à medida em que a perda de carga devida à retenção de impurezas ia aumentando. A condição para o término do ensaio era tal nível atingir valores maiores que 1,60 m (de preferência próximos a 2,0 m), medidos a partir do topo da camada de areia, e que representavam as perdas de carga totais no filtro. Neste momento, a saída de água filtrada era fechada e a de água de lavagem novamente aberta, aguardando-se que todos os filtros em operação tivessem as suas carreiras encerradas, para que se pudesse lavá-los.

e. Lavagem dos filtros: encerrado um conjunto de ensaios simultâneos, os filtros que haviam sido operados eram lavados, através da seguinte sequência de passos:

1º) Conexão da tubulação de admissão de água para lavagem na respectiva entrada, com a abertura da válvula correspondente ao filtro a ser lavado.

2º) Abertura da válvula da ETASC, permitindo o acesso da água para lavagem à instalação experimental, numa vazão tal que a expansão da areia fosse da ordem de 0,10 m.

3º) Conexão da tubulação de admissão de ar na respectiva entrada, com o acionamento do compressor e a abertura da válvula correspondente.

4º) Após 2 a 3 minutos com o ar sendo insuflado através do meio filtrante, fechamento da entrada do mesmo e aumento da vazão de água, de modo a provocar uma expansão de até 60% na camada de areia.

5º) Fechamento da entrada de água e nova admissão de ar, agora durante cerca de 1 minuto, repetindo-se a seguir a admissão de água do passo anterior.

6º) Após alguns minutos, suficientes para que todo o ar eventualmente presente no interior do meio filtrante fosse removido, fim da entrada de água, com o fechamento das respectivas válvulas.

7º) Compactação da camada de areia, através de pancadas leves dadas, inicialmente, na parte inferior e, em seguida, mais acima, na parede do filtro, até que a altura anterior do leito filtrante fosse atingida.

f. Coleta e apresentação dos dados: os principais parâmetros levantados durante a realização dos ensaios da primeira etapa foram as perdas de carga, com destaque para as perdas de carga totais. Seus valores eram obtidos a partir da leitura dos níveis piezométricos, conforme descrito no item 4.2.1 (h), verificando-se antes se as vazões nos filtros estavam corretas. O outro parâmetro de interesse era a qualidade da água, tanto afluente quanto efluente, avaliada em termos de turbidez, conforme referido em 4.2.1 (j). O número total de dados coletados, bem como sua frequência, variou entre os ensaios, dependendo da duração dos mesmos. De um modo geral, partia-se de uma frequência horária no início das carreiras, até intervalos de 4 a 8 horas durante seu desenvolvimento, valores estes considerados suficientes para descrever a evolução das perdas de carga nos filtros. Os dados obtidos eram registrados numa planilha especialmente confeccionada para tal fim.

4.3. SEGUNDA ETAPA: SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO COM TAXA DECLINANTE

Esta fase da pesquisa compreendeu a aplicação do modelo matemático desenvolvido por DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b), a fim de se obter alguns parâmetros característicos de um sistema de filtração com taxa declinante variável, simulando-se o comportamento de uma instalação deste tipo. Tal simulação foi feita num microcomputador, empregando-se um programa desenvolvido para o referido modelo. Os principais parâmetros determinados foram as taxas de filtração que ocorrem em cada uma das unidades de um SFTD, no intervalo entre duas lavagens e durante a realização das mesmas, bem como a variação do nível d'água nestas ocasiões.

Para a aplicação do modelo, devem ser definidos, a princípio: o número de filtros da bateria (N), a taxa média de filtração ($v_{med.}$), a carga hidráulica disponível (caracterizada pelo nível máximo de operação, N_2), além das curvas de perda de carga laminar e turbulenta (representadas na figura 3.8 e expressas na forma da equação 3.5).

No presente caso, o valor de N foi mantido em todas as simulações como sendo 4, uma vez que este seria o número de unidades da instalação piloto da terceira etapa da pesquisa. Já as curvas de perda de carga foram obtidas diretamente a partir de dados dos filtros experimentais, bastando para isto medir-se a perda no meio filtrante limpo (laminar) e nas saídas dos filtros (turbulentas), para diversas taxas de filtração. Através do método dos mínimos quadrados, foram obtidas as equações que melhor se ajustaram às referidas curvas, sendo as mesmas decorrentes de características do leito filtrante e da disposição hidráulica da instalação.

Definidos aqueles parâmetros, foi feita a simulação do comportamento de um SFTD para diferentes valores de $v_{med.}$ e N_2 . Para a primeira, foram adotadas taxas de 200, 250, 300, 350 e 400 $m^3/m^2.d$, enquanto as cargas hidráulicas testadas variaram entre 0,8 e 2,0 m (alturas relativas ao nível correspondente ao topo da camada de areia e ao ponto em que a água filtrada passava a verter sob pressão atmosférica).

Os resultados gerados nas simulações realizadas nesta etapa tiveram como propósito principal a complementação da aplicação do método de levantamento de dados aqui investigado. Deste modo, pôde-se fazer a previsão da duração das carreiras de filtração de um SFTD, a partir dos dados registrados na primeira etapa e das conclusões teóricas desta segunda fase. Por outro lado, tais resultados forneceram informações que permitiram a escolha adequada das taxas e cargas hidráulicas a serem empregadas na investigação experimental da última etapa, de modo que as características de operação ficassem próximas das de uma instalação real, atendendo, ao mesmo tempo, às limitações físicas da bateria de filtros pilotos.

Deve-se ressaltar que, embora incluída aqui numa etapa isolada, a simulação da operação com taxa declinante por meio de computador pode ser aplicada a qualquer tempo, a partir do momento em que são definidos os parâmetros de entrada do modelo.

4.4. TERCEIRA ETAPA: OPERAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL

4.4.1. Instalação Piloto

Nesta terceira etapa, foram operados uma instalação piloto trabalhando com taxa declinante variável e um filtro independente funcionando de maneira igual aos da primeira etapa. Para tanto, a instalação experimental descrita no ítem 4.2.1 sofreu algumas modificações, passando a constituir uma bateria de quatro unidades de um SFTD. Além disto, um quinto filtro foi posto em funcionamento, podendo ser operado em paralelo com tal sistema.

Alguns dos componentes da instalação piloto da primeira etapa não sofreram quaisquer alterações para se obter o SFTD, tais como os filtros em si, os sistemas de lavagem com ar e água, a coleta de água de lavagem e os tubos piezométricos. A instalação resultante, que pode ser vista esquematicamente na figura 4.5, foi obtida a partir das seguintes modificações:

a. Sistema de alimentação dos filtros: o trecho funcionando por recalque não foi alterado. A linha que alimentava os filtros da primeira etapa por gravidade também foi mantida, passando a atender o filtro independente (identificado como F5). Uma outra linha foi instalada em paralelo, encaminhando a água decantada para os filtros do SFTD (identificados como F1, F2, F3 e F4), a partir da caixa de nível constante. Partindo-se desta, havia um trecho descendente, seguido de outro ascendente, no qual foi colocado um rotâmetro, conforme mostrado na figura 4.6. Uma válvula de esfera imediatamente anterior ao aparelho permitia o ajuste da vazão total encaminhada ao SFTD. Em seguida, a água seguia por uma tubulação de plástico flexível de 25 mm, e depois por outra de 50 mm, no interior da qual havia pressão atmosférica. Deste modo, o nível d'água na mesma podia variar, acompanhando o nível no interior dos filtros. Para que isto ocorresse, as entradas nos mesmos passaram a situar-se cerca de 0,20 m acima do topo da camada filtrante, ficando, assim, abaixo dos níveis mínimos de operação, de maneira que os filtros e a tubulação de alimentação funcionassem como vasos comunicantes. O acesso ao SFTD foi concebido de modo que a água percorresse caminhos semelhantes para atingir qualquer uma das unidades, conforme pode-se ver na figura 4.7. Cada um dos filtros podia ser isolado dos demais, através do fechamento de uma válvula de esfera instalada junto à sua respectiva entrada, permitindo sua lavagem com os outros em operação. A tubulação de alimentação do sistema possuía ainda uma derivação para um piezômetro, para que o nível d'água em seu interior pudesse ser visualizado, além de um dreno, provido de válvula de gaveta.

b. Sistema de coleta de água filtrada: duas modificações foram realizadas em relação à primeira etapa. Uma foi a instalação, nos trechos ascendentes das tubulações de água filtrada, dos rotômetros que antes estavam nas tubulações de entrada dos filtros. A outra foi a colocação, naqueles mesmos trechos, de válvulas de esfera, além das válvulas de gaveta já existentes ali. Enquanto estas ficaram responsáveis pela abertura ou fechamento das respectivas tubulações, aquelas foram posicionadas parcialmente fechadas, a

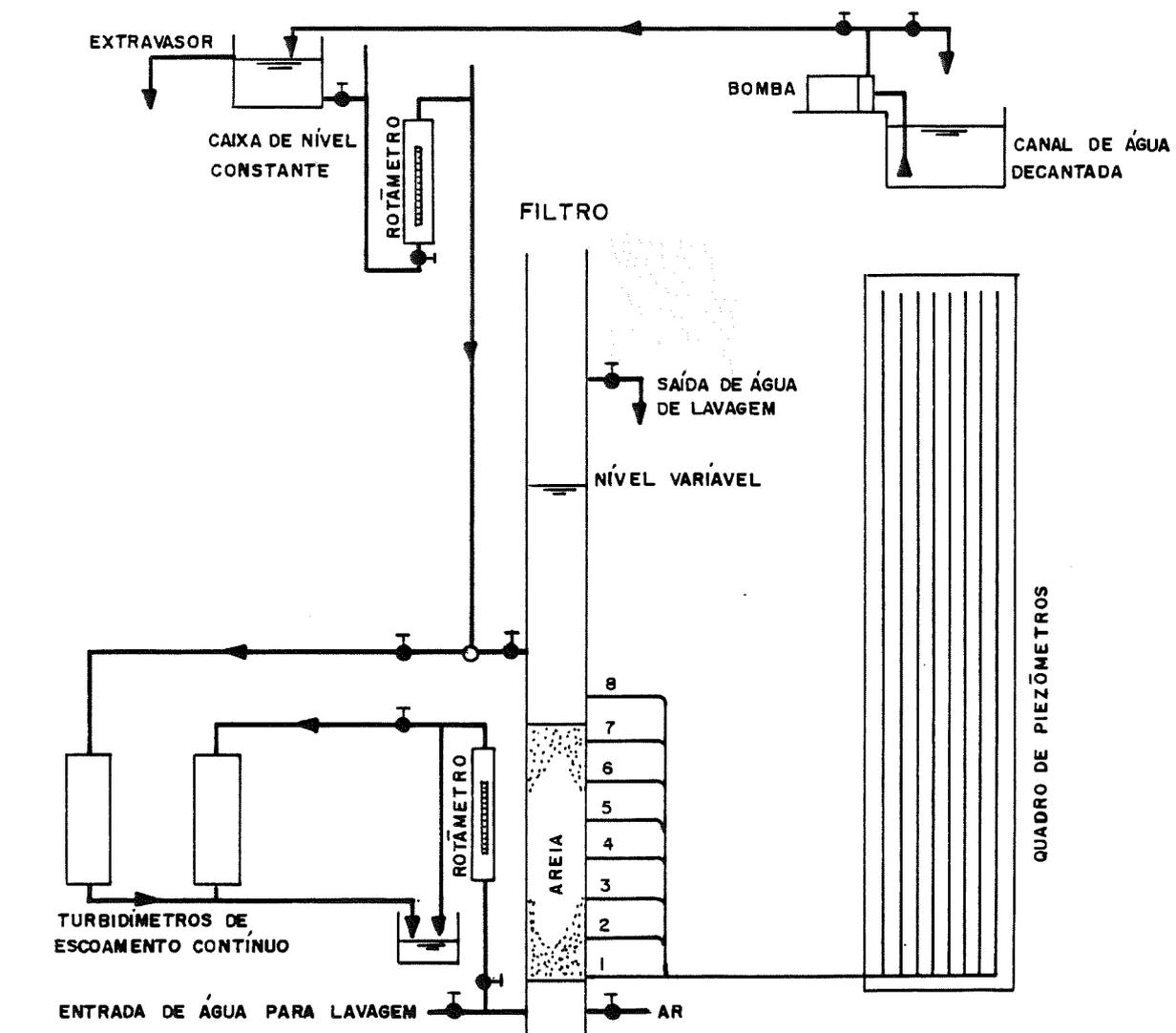


Fig. 4.5. Esquema do SFTD experimental utilizado na terceira etapa da pesquisa, mostrando apenas um dos quatro filtros da bateria.

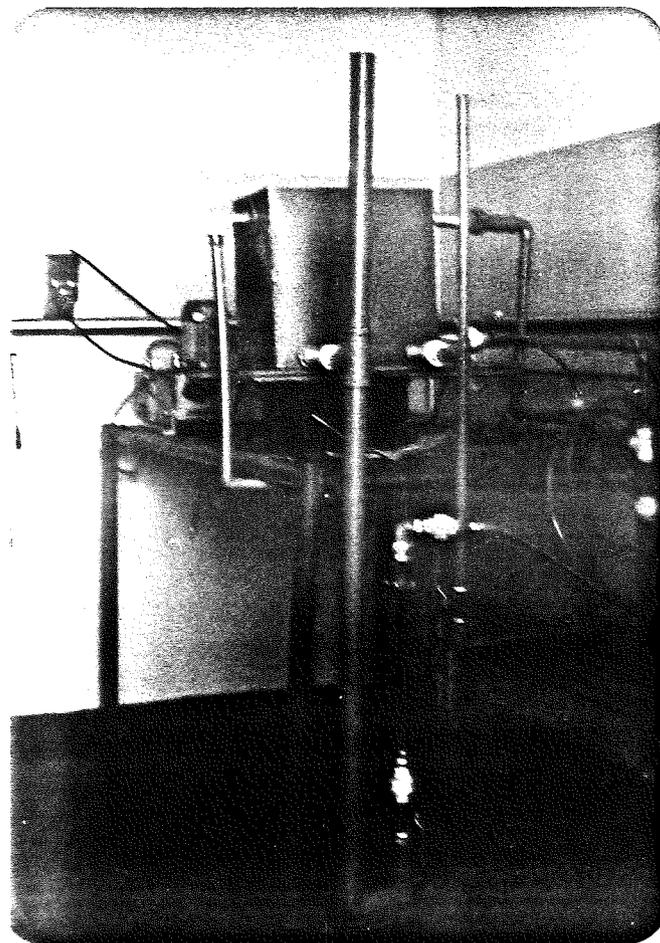


Fig. 4.6. Vista da caixa de nível constante e dos trechos iniciais das tubulações de alimentação dos filtros da instalação experimental da terceira etapa.

fim de aumentar as perdas de carga turbulentas nas saídas das unidades. Estas alterações foram executadas tanto no SFTD quanto no filtro F5, de modo que todos passaram a ter a mesma configuração hidráulica na saída.

c. Medição de vazão: na linha de alimentação do SFTD, foi instalado um rotâmetro (OMEL, São Paulo, Brasil) com escala até 600 l/h. Os aparelhos colocados nas tubulações de água filtrada foram os mesmos utilizados na primeira etapa, apenas mudando de posição. O filtro F5 possuía tais medidores de vazão tanto na entrada quanto na saída. Por outro lado, a medição volumétrica continuou podendo ser feita, ou junto à coleta de água filtrada, ou na tubulação de descarga de água de lavagem. Da mesma forma, a vazão total afluente ao SFTD piloto podia ser medida volumetricamente, desviando-se a mesma a partir da tubulação de alimentação dos filtros, no ponto em que o corria a transição entre os diâmetros de 25 e 50 mm, referidos no item (a).

d. Sistema para medição de turbidez: nesta etapa foram utilizados apenas os turbidímetros de escoamento contínuo, alterando-se alguns pontos

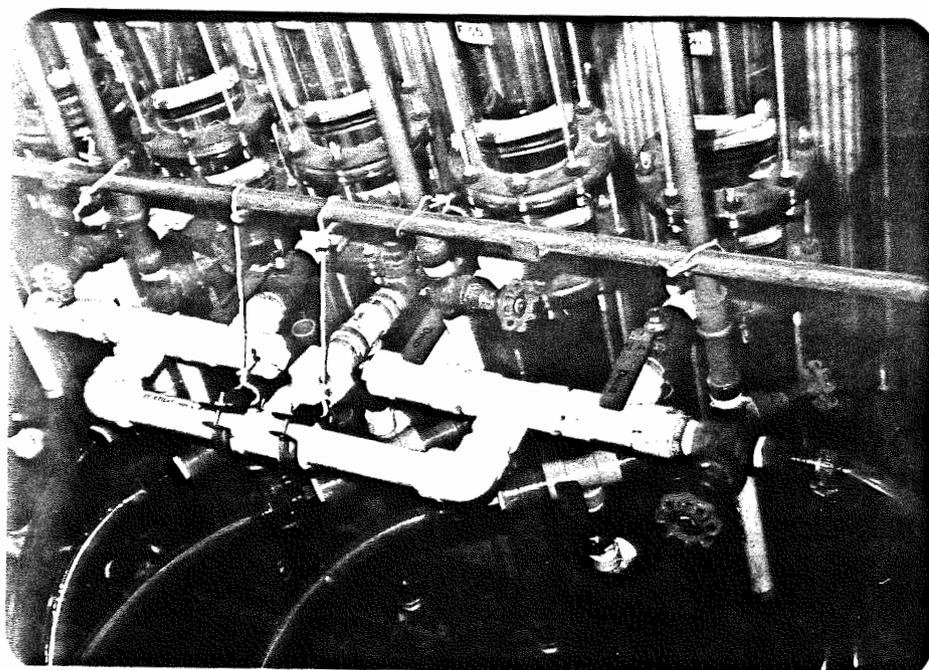
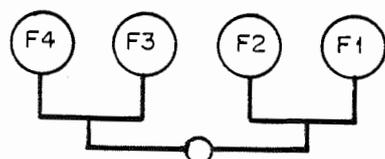


Fig. 4.7. Disposição das tubulações de entrada do SFTD experimental da terceira etapa.

de tomada de amostra. A turbidez do afluente à instalação experimental era medida a partir de uma derivação na linha de alimentação do filtro F5. O efluente deste, bem como o de um dos filtros do SFTD (F1), eram monitorados por meio de derivações nas tubulações de saída, idênticas às da primeira etapa. Por fim, para se obter a turbidez do efluente total do SFTD, foi preciso reunir-se as quatro tubulações plásticas de 25 mm das saídas dos filtros, no interior de uma única de 50 mm, a partir da qual havia uma derivação para o respectivo turbidímetro. Esta disposição pode ser vista na figura 4.8.

e. Meio filtrante: a areia empregada na investigação experimental da terceira etapa apresentou características idênticas às da primeira fase da pesquisa. No decorrer desta, entretanto, notou-se um aumento da perda de carga no meio filtrante limpo, cuja causa não pôde ser determinada, podendo relacionar-se com deficiências nas operações de lavagem ou com mudanças nas características dos grãos da areia. De qualquer maneira, antes do início da última etapa, os meios filtrantes foram retirados das quatro unidades que vinham sendo operadas, e reunidos num recipiente, sendo-lhes acrescentado um volume correspondente ao quinto filtro que seria posto em funcionamento. Após uma vigorosa lavagem, os cinco filtros foram enchidos de for-

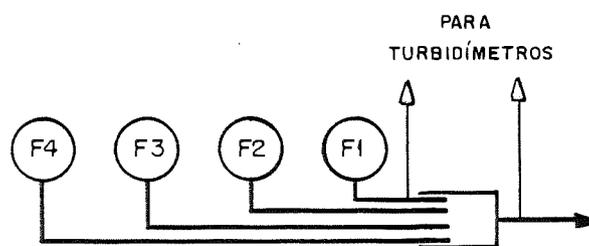


Fig. 4.8. Esquema da disposição das tubulações de saída do SFTD experimental.

ma simultânea, a fim de se minimizar diferenças entre os leitos filtrantes. A espessura final de 1,25 m foi atingida compactando-se a areia por meio de pancadas leves nas paredes dos filtros, aplicadas da maneira o mais uniforme possível entre as cinco unidades.

A figura 4.9 apresenta uma vista geral dos filtros pilotos utilizados na terceira etapa da presente pesquisa.

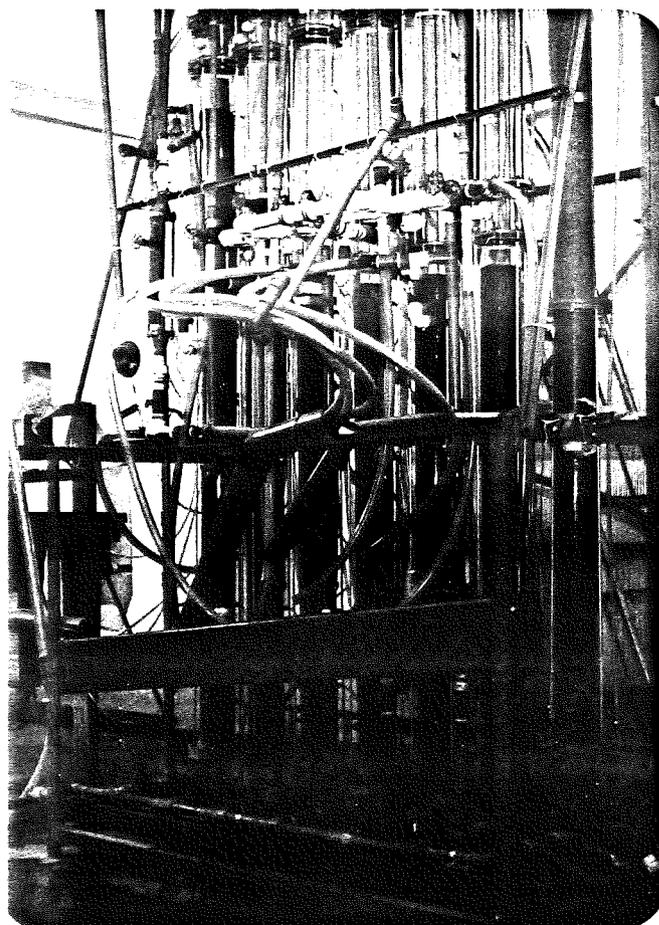


Fig. 4.9. Filtros pilotos utilizados na terceira etapa da pesquisa.

4.4.2. Metodologia dos Ensaio

A operação de um sistema com taxa declinante variável caracteriza-se por um comportamento repetitivo, com os ciclos se sucedendo à medida em que as unidades vão sendo lavadas. Assim, cada vez que a carga hidráulica disponível é atingida, o filtro mais sujo é lavado, iniciando-se um novo ciclo. Mantidas algumas condições a que está submetido o SFTD (vazão total, qualidade do afluente, dosagem de produtos químicos, eficiência das lavagens), os ciclos devem repetir-se de maneira aproximada. Desta forma, a operação desses sistemas pode ser prolongada indefinidamente, sem que haja uma limitação física que imponha o seu término. Esta característica diferenciou os ensaios desta terceira etapa daqueles da primeira fase, onde cada carreira de filtração apresentava uma condição de encerramento definida.

Assim, cada ensaio do SFTD experimental, durante o qual trabalhava-se com uma taxa média de filtração e uma carga hidráulica máxima, tinha como condição para seu término a ocorrência de uma situação estável, com a repetição dos ciclos por um número de vezes suficiente para serem caracterizados valores típicos para as taxas de filtração e a duração das carreiras. As principais considerações a respeito destes ensaios são:

a. Afluente aos filtros: do mesmo modo que na primeira etapa, os filtros pilotos recebiam água decantada da ETASC, coletada a partir do mesmo ponto. Não houve alterações na operação da estação no período entre a execução das duas etapas, mantendo-se os procedimentos e os produtos químicos utilizados. Além disto, ambas as etapas foram realizadas entre os mesmos meses, janeiro e agosto, de anos subsequentes.

b. Taxas de filtração e cargas hidráulicas: foram executados três ensaios com o SFTD experimental, empregando-se taxas médias de filtração de 250, 300 e 350 $m^3/m^2.d$, para cargas hidráulicas máximas de, respectivamente, 1,2, 1,6 e 1,6 m. Estes valores foram definidos a partir dos resultados das simulações da segunda etapa, considerando-se dois fatores: relação entre as taxas máximas e médias variando entre 1,2 e 1,5, e níveis máximos durante as lavagens compatíveis com as dimensões dos filtros pilotos.

c. Controle e medição das vazões: foram seguidos, basicamente, os mesmos procedimentos adotados na primeira etapa, utilizando-se a medição volumétrica como principal referência no acompanhamento das vazões. Deve ser notado que este parâmetro era bem mais significativo na terceira etapa, na qual a variação das taxas devia ser monitorada, do que na primeira, quando tratava-se apenas de garantir a manutenção de uma taxa fixada inicialmente. Os pontos de medição eram: para o afluente total ao SFTD, a transição de diâmetros mencionada em 4.4.1 (c), possível somente nos momentos em que os filtros estivessem fora de operação; para a vazão em cada uma das unidades, as linhas de saída das mesmas, observando-se que parte do efluente de F1 era desviada para o turbidímetro, devendo ser também computada na medição da vazão. Deve-se acrescentar, ainda, que, nos momentos em que ocorriam variações relativamente rápidas de vazão, como durante a lavagem de um filtro ou imediatamente após seu retorno à operação, a medição volumétrica tornava-se impraticável, recorrendo-se aos rotâmetros para a determinação das vazões.

d. Início dos ensaios: definidas a taxa média de filtração e a carga hidráulica disponível a serem adotadas no ensaio, iniciava-se o mesmo acionando-se a bomba de água decantada. Com os quatro filtros do SFTD previamente lavados e tendo suas entradas fechadas, fixava-se, através de medição volumétrica e com auxílio do rotâmetro, a vazão a ser encaminhada à instalação piloto. Manobrando-se a válvula de esfera instalada junto àquele aparelho, obtinha-se tal vazão, cujo valor devia ser igual a quatro vezes a vazão correspondente à taxa média. Abrindo-se as entradas dos filtros e permitindo-se o escoamento pelas saídas de água de lavagem, a vazão em cada unidade era verificada, também volumetricamente, devendo corresponder à taxa média. Comprovada esta condição, as saídas dos filtros eram abertas, iniciando-se a operação normal dos mesmos. Neste momento, o nível d'água no SFTD atingia o seu menor valor, determinado pelas perdas de carga turbulentas e no meio filtrante limpo, para a taxa média de filtração.

e. Ciclos iniciais: nos primeiros ciclos de um ensaio, os filtros iam sendo sucessivamente lavados, à medida em que as perdas de carga devidas à retenção de impurezas acarretavam uma elevação do nível d'água no sistema. A duração destes primeiros ciclos era arbitrária, servindo para introduzir a sequência de lavagem das unidades, cujas taxas de filtração passavam a diferenciar-se de acordo com o grau de colmatação do respectivo leito filtrante. Tais ciclos eram considerados encerrados quando a carga hidráulica disponível fixada para o ensaio era atingida, passando a condicionar a duração dos ciclos posteriores, que apresentavam um comportamento repetitivo.

f. Término de um ciclo: encerrados os ciclos iniciais, o término dos demais ocorria sempre que a perda de carga total, e, conseqüentemente, o nível d'água no SFTD, igualavam o valor adotado para a carga hidráulica disponível. Neste momento, o filtro mais sujo da bateria era retirado de operação, fechando-se a entrada e a saída do mesmo, e procedendo-se à sua lavagem.

g. Lavagem dos filtros: a operação de lavagem das unidades integrantes do SFTD era semelhante à empregada na primeira etapa, e descrita no item 4.2.2 (e). Normalmente, cada filtro permanecia fora de operação por 15 minutos para ser lavado, embora, em alguns casos, este tempo tenha sido dilatado para 30 minutos, a fim de se investigar o comportamento das unidades que permaneciam em funcionamento.

h. Início de um novo ciclo: ocorria com o retorno de um filtro recém-lavado para a operação normal, abrindo-se a entrada e a saída do mesmo. Após algum tempo, o nível d'água, que havia atingido seu valor máximo nas unidades remanescentes durante a lavagem, descia até um valor mínimo, e retomando a seguir a sua subida gradual, até que a carga máxima fosse novamente alcançada e o novo ciclo encerrado.

i. Operação contínua e com interrupção: em decorrência das características de funcionamento do SFTD, cujos ensaios podiam ser prolongados até que os dados obtidos fossem satisfatórios, a operação da instalação piloto de maneira contínua acarretava alguns inconvenientes, como dificuldades

para um acompanhamento constante e uma maior vulnerabilidade à ocorrência de problemas operacionais na ETASC. A probabilidade destes últimos acontecerem era maior à noite, quando havia apenas um operador presente e as variações na vazão tratada pela estação eram mais significativas, provocando incorreções nas dosagens de produtos químicos. Deste modo, durante grande parte da investigação experimental, o SFTD foi operado de forma intermitente, concentrando-se o seu funcionamento no período diurno. Embora a operação de tais sistemas seja normalmente contínua, a alternativa adotada não apresentou diferenças com relação à mesma, já tendo sido utilizada, por exemplo, na investigação conduzida por Gregory e Yadav (citados em ARBOLEDA, GIRALDO & SNEL, 1985). Assim, optou-se por interromper os ensaios sempre que se pudesse retomá-los em condições mais favoráveis. A fim de minimizar qualquer distorção e padronizar tal procedimento, as interrupções somente eram permitidas no momento do encerramento de um ciclo, quando um dos filtros era retirado de operação. Neste instante, as outras três unidades também tinham as entradas e saídas fechadas simultaneamente, de modo a se manter o nível d'água em seu interior praticamente inalterado. A vazão total afluyente ao sistema era desviada diretamente para o esgotamento, através do dreno existente na linha de alimentação dos filtros. Antes do reinício do ensaio, tal vazão era conferida volumetricamente, fazendo-se as correções necessárias. Em seguida, retomava-se a operação no mesmo ponto em fora interrompida, abrindo-se as entradas e saídas de três unidades e procedendo-se à lavagem daquela que havia sido primeiramente paralisada. Ao longo de todo o experimento com o SFTD, o procedimento descrito alternou-se com a operação contínua do sistema, tendo havido um predomínio do primeiro. Como consequência, ensaios de longa duração puderam ser realizados.

j. Coleta e apresentação dos dados: na terceira etapa, os parâmetros monitorados foram as perdas de carga (totais e ao longo do leito filtrante), a turbidez da água (a partir dos pontos referidos em 4.4.1 (d)) e as taxas de filtração nas diversas unidades do sistema. Os critérios de obtenção dos mesmos já foram descritos em itens anteriores, alguns na apresentação da primeira etapa. Quanto à frequência dos levantamentos, houve variações decorrentes da duração dos ciclos. Independentemente disto, os dados eram sempre registrados nas seguintes circunstâncias: imediatamente antes e após uma operação de lavagem, quando o nível mínimo nos filtros era atingido e no caso de ocorrências especiais. Também durante o desenvolvimento de um ciclo eram coletados dados intermediários, embora o maior número deles fosse obtido no início e no fim do mesmo. A anotação dos resultados experimentais era feita em planilhas semelhantes às empregadas na primeira etapa.

A operação do filtro independente, F5, era feita em paralelo com a do SFTD, durante certos períodos dos ensaios. Uma condição essencial para tanto era a ocorrência da repetição de ciclos no segundo, caracterizando uma situação de estabilidade do sistema que permitisse a comparação do comportamento de uma das unidades da bateria com o filtro isolado. Para tanto, este era posto em funcionamento no mesmo instante em que um filtro do SFTD retornava à operação, após ter sido lavado. A taxa adotada para F5 tinha o mesmo valor da que era observada no outro filtro, sendo fixada acionando-se

a válvula de esfera existente na tubulação de entrada. A vazão era medida a través dos rotômetros, instalados tanto na entrada quanto na saída da unidade, ou ainda volumetricamente na saída de água de lavagem, conforme já descrito anteriormente. No decorrer do ciclo do SFTD, a taxa de filtração mantida em F5 procurava reproduzir a que era registrada simultaneamente no filtro recentemente lavado. Nos ciclos subseqüentes, quando a taxa deste último declinava na forma de degraus, o filtro F5 tinha a sua igualmente reduzida, fechando-se a válvula de entrada referida. Com isto, podia-se comparar o comportamento de um filtro que tinha sua taxa condicionada externamente, com o de um integrante de um SFTD. Na maior parte dos casos, a operação de F5 acompanhou a do filtro F1, pois este tinha a turbidez de seu efluente monitorada individualmente.

Além deste procedimento, no qual F5 acompanhava a operação de um dos filtros do SFTD durante toda uma carreira, sendo lavado apenas quando o outro também o era, procurou-se destacar o comportamento observado somente no ciclo inicial, com ambos começando a operar limpos. Nestes casos, F5 era lavado ao fim de cada ciclo do SFTD, passando a acompanhar o funcionamento das unidades que iam sendo sucessivamente lavadas e postas em operação.

Os dados obtidos no filtro F5 foram do mesmo tipo daqueles levantados no sistema com taxa declinante, consistindo na medida de perdas de carga, turbidez e taxas de filtração. A frequência das coletas era a mesma, procurando-se realizá-las em tempos iguais ou muito próximos, a fim de possibilitar uma melhor comparação entre os dois modos de operação.

Em algumas ocasiões, ao se passar de um ciclo para o outro, a vazão através de F5 era aumentada, enquanto um dos filtros do SFTD era lavado, de modo a simular uma lavagem numa unidade hipotética à qual o primeiro estaria conectado. Tal aumento era da mesma ordem de grandeza do registrado simultaneamente no filtro operado em paralelo, permitindo assim que, no ciclo seguinte, os efeitos da operação de lavagem se refletissem de maneira a proximadamente igual em ambos.

5. RESULTADOS

5.1. PRIMEIRA ETAPA

5.1.1. Determinação Inicial das Curvas de Perda de Carga

Antes do início dos ensaios da primeira etapa, foram obtidos, na instalação experimental, alguns dados relativos às perdas de carga nas saídas das unidades e nos meios filtrantes limpos, visando determinar as curvas que relacionam estes parâmetros com as taxas de filtração.

Através da leitura nos piezômetros de nº 1 de cada um dos filtros pilotos, foram fixados valores para as perdas de carga nas saídas dos mesmos, medindo-se as taxas de filtração correspondentes. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.1. Considera-se aqui como saída de um filtro, além da tubulação, a placa perfurada e a tela abaixo da areia.

Quadro 5.1. Valores das perdas de carga nas saídas dos filtros pilotos e respectivas taxas de filtração, determinados experimentalmente antes do início dos ensaios da primeira etapa.

PERDAS DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)			
	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3	FILTRO 4
0,5	-	-	116	125
1,0	121	126	-	-
1,5	280	283	-	419
2,0	450	450	512	488
2,5	518	532	605	-
3,0	640	645	-	-

Da mesma forma, as perdas de carga nos meios filtrantes limpos, dadas pela diferença entre as leituras nos piezômetros 1 e 8, foram determinadas inicialmente, passando-se água tratada da ETASC através da camada de areia de cada uma das unidades da instalação piloto. Para diferentes valores de taxa de filtração, foram obtidas as perdas de carga relacionadas no quadro 5.2.

Quadro 5.2. Perdas de carga nos meios filtrantes limpos e respectivas taxas de filtração, antes do início dos ensaios da 1ª etapa.

FILTROS	PERDAS DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)
1	13,0	133
	24,0	242
	32,0	319
	46,0	459
	52,5	524
2	12,0	129
	25,0	250
	37,0	372
	45,0	442
	55,0	540
3	18,5	202
	32,0	342
	44,5	460
	49,0	500
4	20,0	210
	37,0	390
	45,5	460

Deve-se destacar que os dados de perdas de carga levantados nestes pré-ensaios tiveram como objetivos avaliar-se a ordem de grandeza apresentada por tais parâmetros na instalação experimental e verificar a igualdade entre o comportamento dos quatro filtros pilotos. Os mesmos tipos de dados foram registrados posteriormente, quando da realização dos próprios ensaios, seja apenas no início de cada um (perdas no meio filtrante limpo), seja durante todo o seu desenvolvimento (perdas na saída).

Os dados obtidos deram origem a duas curvas relacionando as perdas de carga nos filtros com as taxas de filtração, que são apresentadas na figura 5.1. Nesta mesma figura, aparecem as perdas de carga no meio filtrante limpo para os diversos ensaios da primeira etapa, os quais serão comentados num item posterior.

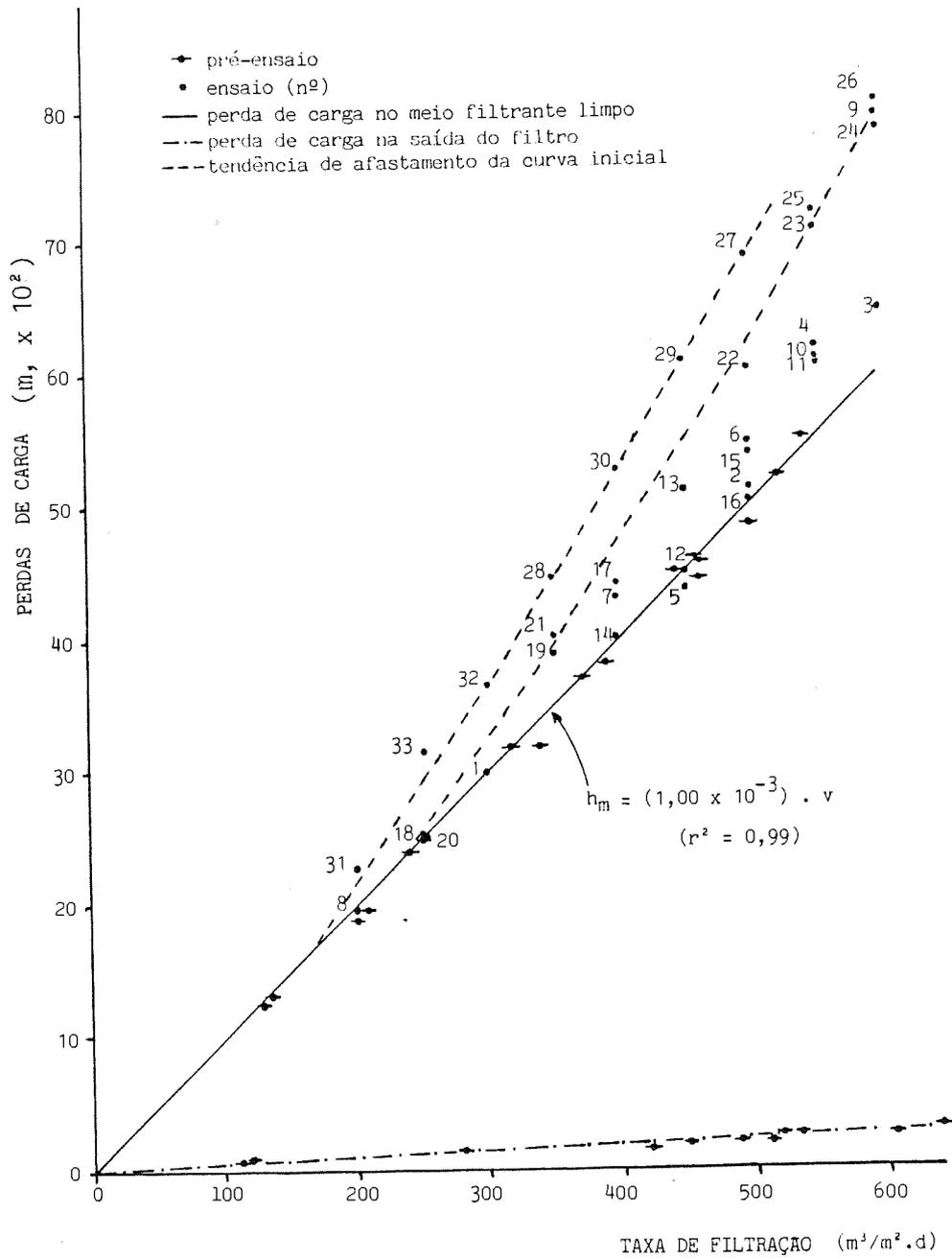


Fig. 5.1. Valores de perdas de carga no meio filtrante limpo e nas saídas dos filtros, para diversas taxas de filtração, na primeira etapa da pesquisa.

5.1.2. Operação com Taxas de Filtração Constantes

Conforme relatado nos itens referentes à metodologia da pesquisa, os ensaios da primeira etapa constaram da operação dos filtros pilotos com taxas de filtração constantes. No total, foram executados 33 ensaios, cada um deles correspondendo a uma carreira de filtração com determinada taxa.

A maior parte dos resultados obtidos nesta etapa está sendo apresentada em apêndices, devido ao seu grande número. Os principais parâmetros de interesse, já referidos na metodologia, foram as perdas de carga nos filtros e a turbidez da água na entrada e saída das unidades.

No Apêndice "A", nos quadros A.1 a A.31, tais dados são apresentados. Dos 33 ensaios citados, os de nº 9 e 28 não puderam ser conduzidos de maneira satisfatória, sendo os seus resultados desconsiderados. Dos ensaios restantes, resultaram mais de 2200 leituras nos piezômetros e cerca de 150 valores de turbidez.

Nos quadros mencionados, os dados relativos às perdas de carga encontram-se na forma de níveis piezométricos, traduzindo as leituras diretas obtidas nas escalas junto aos piezômetros. A diferença dos valores relativos a dois piezômetros quaisquer, entre os oito possíveis, representa a perda de carga existente entre as alturas correspondentes no filtro. De acordo com a descrição da instalação piloto, tais alturas diferiam entre si cerca de 20 cm, sendo esta a espessura de areia existente entre cada um dos piezômetros de 1 a 7; já a diferença entre os níveis do 7º e 8º representa a perda de carga nos primeiros 5 cm da camada filtrante, uma vez que sua espessura total era de 125 cm.

Os níveis piezométricos mais significativos são os que indicam as perdas de carga totais e nas saídas dos filtros, obtidas a partir das leituras nos piezômetros 1 e 8, bastando subtrair o valor de 125 cm das mesmas. As perdas nas saídas mantinham-se constantes ao longo das carreiras de filtração, correspondendo às perdas turbulentas do sistema. Já as perdas totais, que incluem as no meio filtrante, cresciam progressivamente com o tempo.

Quanto aos valores de turbidez, deve-se destacar o fato, já referido anteriormente na metodologia da pesquisa, de que, até o 21º ensaio, foi utilizado o turbidímetro de bancada, com as amostras sendo coletadas em pequenos frascos plásticos e transportadas até ele. Assim, os valores apresentados no Apêndice "A" constituem a totalidade dos dados obtidos, representando pontos isolados ao longo do tempo. As médias de cada carreira de filtração foram calculadas assumindo-se uma variação linear entre tais pontos. A partir do 22º ensaio, passaram a ser empregados os aparelhos com escoamento contínuo e registradores automáticos. Embora nos quadros A.21 a A.31 continuem a aparecer valores correspondentes à turbidez em diversos tempos, as respectivas médias foram obtidas integrando-se as áreas abaixo das curvas contínuas de variação daquele parâmetro, gerando resultados com um grau de confiabilidade maior.

Por outro lado, o número de casas decimais dos dados de turbidez foi condicionado pelas leituras no instrumento de bancada, quando os valores do afluente eram obtidos numa escala de 0 a 10 UT, enquanto os dos efluentes eram registrados na faixa de 0 a 1,0 UT. Apesar dos turbidímetros de escoamento contínuo apresentarem medidas com três casas decimais, os resultados foram expressos de maneira uniforme em todos os ensaios, sem prejuízo da precisão requerida.

No Apêndice "B" são mostradas, através das figuras B.1 a B.10, as curvas de variação das perdas de carga totais e dos valores de turbidez do afluente e dos efluentes, ao longo do tempo. Cada figura corresponde a um grupo de 2 a 4 ensaios realizados simultaneamente. Deste modo, a curva relativa à turbidez do afluente é única em cada figura, havendo mais de uma para as perdas de carga e a turbidez dos efluentes. Os valores das perdas de carga totais provêm dos níveis observados no piezômetro nº 8, tendo já devidamente descontada a altura de 125 cm, referente à elevação da tubulação de saída dos filtros. Foi adotada uma escala de tempo comum para as diferentes figuras, a fim de facilitar as comparações entre as mesmas.

Nas figuras do Apêndice "B", as curvas de variação das perdas de carga totais estão representadas apenas pelos seus trechos retos iniciais, correspondentes a períodos de operação entre 8 e 12 horas, para os quais foram feitos ajustes por regressão linear, embora em muitos casos a linearidade se prolongasse por períodos maiores. Com relação às curvas de variação da turbidez com o tempo, deve-se notar que, conforme as considerações feitas acerca dos aparelhos de medição, apenas as figuras B.7 a B.10 (a partir do ensaio 22) refletem com exatidão os valores ocorridos durante o experimento. Nas demais, as curvas foram interpoladas linearmente entre as medidas pontuais obtidas.

Quanto aos valores das perdas de carga ao longo dos meios filtrantes, suas variações com o tempo podem ser vistas nas figuras C.1 a C.9, incluídas no Apêndice "C". As curvas aí apresentadas indicam a evolução destas perdas durante as carreiras de filtração, para os diversos tempos considerados. As setas nos eixos das abcissas correspondem aos pontos em que os piezômetros encontravam-se instalados, sendo que as escalas representam a profundidade do meio filtrante, medida a partir do topo deste. Embora os dados em questão tenham sido levantados em todos os ensaios, estando registrados nos quadros do Apêndice "A", somente estão sendo apresentadas as curvas referentes a 9 deles, caracterizando cada uma das taxas de filtração empregadas. Devido ao comportamento repetitivo observado, tais curvas são suficientes para descrever as variações ocorridas na investigação experimental.

Um resumo dos principais dados obtidos nesta primeira etapa é mostrado no Quadro 5.3, com os ensaios reunidos de acordo com a sequência de execução dos mesmos. As perdas de carga totais no meio filtrante limpo (para $t = 0$ h.) são as mesmas representadas na figura 5.1, e juntamente com aquelas correspondentes a $t = 8$ h., permitem que se avalie a evolução de tais perdas no período inicial das carreiras de filtração.

Quadro 5.3. Resumo dos principais resultados obtidos na primeira etapa.

ENSAIO	FILTRO	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)	TURBIDEZ DO AFLUENTE (UT)			TURBIDEZ DOS EFLUENTES (UT)			PERDAS DE CARGA (cm)	
			MAX.	MIN.	MED.	MAX.	MIN.	MED.	t=0 h	t=8 h
1	1	300	3,3	1,4	2,25	0,32	0,15	0,19	30	48
2	2	500				0,38	0,19	0,29	52	80
3	1	600	6,0	1,7	2,26	0,54	0,20	0,34	65	90
4	2	550				0,50	0,23	0,35	62	84
5	3	450				0,51	0,30	0,38	44	62
6	1	500	4,4	1,3	2,77	0,34	0,18	0,23	55	87
7	2	400				0,25	0,14	0,20	43	64
8	3	200				0,30	0,15	0,21	19	29
10	1	550	2,5	1,6	2,18	0,55	0,21	0,34	61	87
11	2	550				0,49	0,25	0,33	61	84
12	3	450				0,35	0,22	0,28	45	65
13	4	450				0,35	0,15	0,27	51	72
14	1	400	2,5	1,5	1,94	0,24	0,14	0,21	40	60
15	2	500				0,30	0,17	0,27	54	75
16	3	500				0,31	0,18	0,27	50	73
17	4	400				0,27	0,16	0,25	44	63
18	1	250	4,0	1,5	2,56	0,81	0,23	0,39	27	38
19	2	350				0,81	0,20	0,37	39	55
20	3	250				0,81	0,24	0,38	26	37
21	4	350				0,84	0,24	0,38	40	59
22	1	500	3,8	2,8	3,38	0,49	0,05	0,28	61	100
23	2	550				0,77	0,09	0,42	71	113
24	4	600				0,65	0,06	0,34	79	133
25	1	550	1,9	1,2	1,51	0,54	0,09	0,24	73	104
26	2	600				0,75	0,12	0,30	81	114
27	4	500				0,60	0,05	0,19	69	97
29	2	450	2,2	1,2	1,90	0,93	0,08	0,32	61	87
30	4	400				0,36	0,04	0,15	53	72
31	1	200	1,7	0,80	1,33	0,10	0,03	0,04	23	34
32	2	300				0,09	0,04	0,04	36	51
33	4	250				0,09	0,03	0,04	31	44

5.2. SEGUNDA ETAPA

A atividade característica desta segunda etapa da pesquisa foi, de acordo com a metodologia descrita, a realização de simulações, por meio de computador, do comportamento de um sistema de filtração com taxa declinante variável, utilizando-se de um programa especificamente desenvolvido para o modelo proposto por Di Bernardo.

Para tanto, era preciso dispor-se das curvas relacionando as perdas de carga laminares e turbulentas com as taxas de filtração, do tipo da figura 5.1, bem como as respectivas equações. Embora tais dados tenham sido obtidos na primeira etapa, modificações feitas na instalação experimental obrigaram a determinação de novas curvas e equações, relativas ao SFTD piloto operado na última fase da investigação.

Deste modo, concluídas as alterações, sobretudo nas linhas de saída dos filtros, foram levantados novos dados de perda de carga, a serem apresentados num ítem posterior, que permitiram a obtenção de novas equações relacionando tais parâmetros com as taxas de filtração. A seguir, foram feitas diversas simulações do funcionamento de um SFTD variável, correspondentes a diferentes condições de operação, variando-se as taxas médias de filtração e as cargas hidráulicas de acordo com os valores referidos no ítem 4.3.

Os resultados destas simulações orientaram a escolha dos parâmetros que foram adotados nos ensaios da terceira etapa, de maneira que as situações testadas fossem, ao mesmo tempo, adequadas à operação com taxa declinante variável e compatíveis com as limitações físicas da unidade experimental. O objetivo principal das simulações, entretanto, era o de permitir a aplicação do método de levantamento de dados investigado na presente pesquisa, sendo parte integrante do mesmo.

Para esta última finalidade, porém, novas equações de perda de carga foram desenvolvidas, utilizando os dados registrados em cada um dos ensaios da última etapa. Embora estas equações fossem bastante próximas daquelas obtidas anteriormente, as diferenças exibidas traduziram as modificações observadas no decorrer do experimento, conforme será discutido posteriormente.

Assim, apesar das várias simulações que foram realizadas ao longo da pesquisa, antes e após a terceira etapa, somente estão sendo apresentados os resultados diretamente relacionados com a investigação experimental, ou seja, aqueles correspondentes às taxas médias e às cargas hidráulicas em saídas. Tais resultados encontram-se no Apêndice "D", consistindo na impressão dos dados de entrada e saída do programa computacional.

Para cada uma das três situações investigadas, referentes às taxas médias de 250, 300 e 350 $m^3/m^2.d$ e às cargas hidráulicas de 1,2, 1,6 e 1,6 metros, respectivamente, têm-se naquele apêndice:

a. As equações relacionando as perdas de carga e as taxas de filtração, além dos outros parâmetros de entrada;

b. As taxas de filtração em cada um dos filtros, durante a operação normal e quando da lavagem de um deles ("TAXAS");

c. As perdas de carga devidas à retenção de impurezas, ao fim de cada ciclo, em m ("PERDAS");

d. Os coeficientes de perda de carga devida à retenção de impurezas, em dia⁻¹ ("RESIST");

e. A taxa de filtração correspondente à carga hidráulica disponível, em m³/m².d ("TMAX");

f. A relação entre a taxa no filtro mais limpo e a taxa média de filtração ("Coef F");

g. Os níveis d'água: mínimo e máximo durante a operação ("Niv. 1" e "Niv. 2"), máximo durante a lavagem ("Niv. 3") e suas variações ("N2 - N1" e "N3 - N2"), em metros;

h. A taxa média com um filtro fora de operação ("TMED2").

A representação gráfica destes resultados, através das curvas que relacionam os níveis de operação com as taxas de filtração, é mostrada nas figuras E.1 a E.3 do Apêndice "E".

5.3. TERCEIRA ETAPA

5.3.1. Determinação das Curvas de Perda de Carga

Conforme referido no item anterior, novas curvas e equações relacionando as perdas de carga com as taxas de filtração foram obtidas, antes do início dos ensaios desta etapa, a partir de dados levantados na instalação experimental. Tão logo as alterações nesta foram concluídas, foram medidas as perdas, tanto nas saídas, modificadas em decorrência das alterações e executadas de acordo com o item 4.4.1 (b), como nos meios filtrantes limpos, que passaram por um processo de recuperação descrito em 4.4.1 (e).

A obtenção da curva de perda de carga turbulenta e sua respectiva equação foi procedida antes da colocação da areia novamente nos filtros pilotos. Conforme já mencionado, esta perda de carga turbulenta na saída de água filtrada sofreu um acréscimo, devido à instalação do rotâmetro e de uma válvula de esfera funcionando parcialmente fechada. Assim, o primeiro passo foi garantir-se um fechamento igual das válvulas nas cinco unidades filtrantes, de modo a se obter valores idênticos de perda de carga.

Fixada a posição definitiva de tais válvulas, a qual manteve-se inalterada até o fim do experimento, foram levantadas as perdas de carga resultantes, para diferentes taxas de filtração. Tais resultados são apresentados no Quadro 5.4. Para sua obtenção, passava-se uma vazão qualquer pelos filtros, aguardava-se a estabilização do nível d'água, medindo-se a seguir os valores correspondentes daqueles parâmetros. Tal procedimento foi aplicado do tanto nos filtros do SFTD, quanto na unidade independente, F5.

Quadro 5.4. Valores das perdas de carga nas saídas dos filtros pilotos e respectivas taxas de filtração, determinados experimentalmente antes do início dos ensaios da terceira etapa.

TAXA DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXA DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXA DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)	PERDA DE CARGA (cm)
170	18	360	52	554	111
222	25	368	53,5	570	117
259	31	381	57	590	125
275	34	419	69	602	129
300	39	447	77,5	620	138
320	43	483	88	630	142
336	47	489	91	640	147
350	50	518	99	650	154

Com relação às perdas de carga nos meios filtrantes limpos, foram realizadas poucas medidas nesta fase anterior aos ensaios da terceira etapa, suficientes apenas para confirmar a validade dos dados obtidos na primeira parte da pesquisa. Desta maneira, comprovou-se a igualdade entre os meios filtrantes das duas etapas, o que permite a comparação entre os comportamentos observados em ambas. Os poucos resultados obtidos não estão sendo apresentados, uma vez que, conforme será visto posteriormente, as perdas de carga na areia limpa medidas ao longo dos ensaios é que foram utilizadas para a definição final das curvas e equações relacionando tais parâmetros com as taxas de filtração.

5.3.2. Operação com Taxas de Filtração Declinantes

De acordo com a descrição feita na metodologia da pesquisa, durante a terceira etapa foram conduzidos três ensaios, caracterizados pelas taxas de filtração e cargas hidráulicas referidas no item 4.4.2 (b). No primeiro deles, foram executados 55 ciclos de operação do SFTD, totalizando um pouco mais de 600 horas de funcionamento. Nos outros dois, o número de ciclos foi 20 em cada, com os tempos de experimento ultrapassando 160 e 200 horas, respectivamente.

Os principais resultados destes ensaios são apresentados nos quadros F.1 a F.3 do Apêndice "F". Nestes quadros são indicados, para cada ciclo dos ensaios e em função do tempo, as perdas de carga totais, as taxas de filtração em cada uma das unidades, bem como os valores de turbidez do afluente, do efluente total e do filtro F1. Aparecem ainda a taxa média de filtração efetivamente registrada nos diversos tempos e o filtro a ser lavado ao término de cada ciclo.

A contagem de tempo apresentada nesses quadros inclui os períodos de lavagem na parte inicial de cada ciclo, de modo que os dados relativos a 15 ou 30 minutos correspondem ao encerramento daquela operação. A taxa de filtração na unidade recém-lavada, indicada entre parênteses, é a ocorrida imediatamente após sua reintrodução no sistema, enquanto as dos outros três filtros são as obtidas antes de tal retorno. Quanto à turbidez, os dados referem-se aos maiores valores observados com as quatro unidades já em operação, refletindo eventuais picos posteriores às lavagens. Deve ser lembrado, ainda, que, embora estejam sendo mostrados registros isolados de turbidez, tal parâmetro foi obtido de maneira contínua durante toda esta etapa.

Já os dados relativos aos tempos de 45 minutos ou 1 hora correspondem, aproximadamente, aos momentos em que o nível d'água nos filtros alcançava seus valores mínimos (N1), equivalentes às perdas de carga na areia limpa e na saída da unidade recém-lavada. Por outro lado, os últimos registros de cada ciclo referem-se ao instante em que a carga hidráulica disponível era atingida (nível N2), quando então um dos filtros devia ser retirado de operação. Tal instante coincide, assim, com o tempo zero do ciclo seguinte.

Os dados de perdas de carga totais e de taxas de filtração referidos são apresentados graficamente nas figuras G.1 a G.3 do Apêndice "G", através das quais pode-se ver a evolução dos mesmos ao longo dos ensaios dessa terceira etapa. Diferentemente dos quadros incluídos no apêndice anterior, as figuras em questão mostram uma escala de tempo contínua para cada ensaio, indicando, porém, os respectivos ciclos logo acima. As curvas obtidas são do tipo que tem sido tradicionalmente empregado na descrição do comportamento de sistemas com taxa declinante variável (conforme figuras 3.5, 3.10 e outras). Cada um dos picos de perda de carga (ou das taxas de filtração) corresponde a uma operação de lavagem, marcando o início de um novo ciclo; o filtro lavado neste momento pode ser facilmente deduzido das figuras, bastando observar aquele que trabalha com a maior taxa no período a seguir.

Os resultados apresentados nos apêndices "F" e "G" referiram-se a todos os ciclos de operação do SFTD experimental, indistintamente. No entanto, conforme já mencionado, os dados mais significativos são aqueles levantados em condições de operação consideradas estáveis, com o comportamento aproximadamente repetitivo. Assim, um tratamento mais detalhado dos resultados, e mesmo a apresentação de parte deles, ficará restrita aos ciclos representativos do funcionamento normal de um SFTD, excluindo, por exemplo, aqueles durante o início dos ensaios ou nos quais ocorreram perturbações indesejáveis. Uma primeira seleção foi feita a partir da observação das curvas mostradas no Apêndice "G", juntamente com informações coletadas ao longo dos ensaios, relativas sobretudo à operação da ETASC.

Deste modo, tratando especificamente das taxas de filtração, o Apêndice "H" mostra, nos quadros H.1 a H.3, valores destes parâmetros registrados nos ciclos selecionados em cada ensaio. São apresentadas as quatro taxas de filtração observadas no início e no fim de cada ciclo, bem como um valor médio correspondente. As médias dos valores iniciais, finais e médios são também calculadas, da mesma forma que o valor real da taxa média de fil

tração, permitindo a comparação com o valor nominal do ensaio. A partir da indicação do filtro lavado no início de cada ciclo, pode-se identificar o conjunto de valores correspondentes a cada uma das unidades, lembrando que a ordem de lavagem (F1, F2, F3, F4) era sempre a mesma. Por exemplo, quando o filtro lavado é o F3, a taxa máxima refere-se a ele, enquanto a mínima refere-se ao que seria lavado em seguida (F4), cabendo a F2 e F1 as taxas intermediárias (T2 e T3, respectivamente).

Também restringindo-se aos ciclos selecionados nos três ensaios, são apresentados, nos quadros I.1 a I.3 do Apêndice "I", os valores médios de turbidez do afluente, do efluente total do SFTD e do efluente do filtro F1. Tais valores foram calculados a partir das curvas de variação contínua registradas nos respectivos turbidímetros. Alguns exemplos típicos destas curvas são mostrados no Apêndice "J", nas figuras J.1 a J.5, que refletem o comportamento observado nos ciclos representativos de uma operação estável do SFTD experimental.

Esta última observação aplica-se igualmente às curvas apresentadas nas figuras L.1 a L.3 do Apêndice "L", que mostram a distribuição das perdas de carga ao longo do meio filtrante e sua variação com o tempo. Assim, tais curvas são suficientes para caracterizar o comportamento registrado durante os ensaios desta etapa, optando-se por não se apresentar todos os dados levantados, que, devido ao grande número, ocupariam um espaço considerável, sem o correspondente significado para a pesquisa realizada.

5.3.3. Operação do Filtro Independente

Conforme explicitado na metodologia da pesquisa, os dados obtidos a partir da operação do filtro independente F5, que trabalhava em paralelo, acompanhando uma das unidades do SFTD, foram do mesmo tipo que os levantados neste último. Assim, as perdas de carga totais e distribuídas ao longo da profundidade da camada de areia, os valores de turbidez do afluente e do efluente, bem como as próprias taxas de filtração, constituíram os parâmetros observados durante os ensaios.

Excetuando as perdas de carga ao longo do meio filtrante e a turbidez do afluente, os demais dados são mostrados no Apêndice "M", através dos quadros M.1 a M.3. Nestes, a numeração dos ciclos acompanha, para cada um dos três ensaios, aquela adotada para o SFTD; já a contagem do tempo estabeleceu como $t=0$ o momento em que o nível mínimo era atingido no SFTD, e que, em geral, coincidia com início de operação de F5, exceto quando eram feitas simulações de lavagem neste. Para efeito de comparação, são também apresentadas, nos mesmos quadros, as perdas de carga totais e as taxas de filtração registradas simultaneamente no filtro correspondente do SFTD, entendendo-se como simultâneos dados coletados com uma defasagem de, no máximo, 15 minutos.

Na maior parte dos casos, procurou-se manter em F5 a mesma taxa do filtro F1 do SFTD; apenas no terceiro ensaio houve exceções, devidamente registradas na coluna relativa às observações do Quadro M.3. Nesta mesma coluna, em todos os quadros, aparecem os filtros lavados no início dos

respectivos ciclos, bem como a indicação da realização de simulações de lavagem em F5.

A representação gráfica dos resultados da operação de F5 limitou-se às curvas de variação do nível d'água acima do meio filtrante (equivalente à perda de carga total), que estão sendo apresentadas no Apêndice G, juntamente com as curvas obtidas para o SFTD. Deste modo, pode-se fazer uma comparação direta do comportamento do referido parâmetro nos dois sistemas operados em paralelo, gerando, conforme será discutido posteriormente, informações importantes para a consecução dos objetivos da pesquisa.

6. DISCUSSÃO

6.1. PRIMEIRA ETAPA

6.1.1. Perdas de Carga Iniciais

Antes de se proceder à análise dos resultados obtidos ao longo dos ensaios propriamente ditos, devem ser feitas algumas considerações a respeito dos valores medidos para as perdas de carga iniciais nos filtros, seja na saída dos mesmos (incluindo tela, placa perfurada, tubulações e acessórios), seja no meio filtrante limpo.

Com relação às primeiras, a simples observação da figura 5.1 indica que as mesmas apresentaram valores muito baixos, caracterizando uma instalação com perdas de carga turbulentas muito pequenas, sobretudo se comparadas às perdas laminares (5 % destas, em média). Tal ordem de grandeza, além de acarretar pouca precisão nas medidas das perdas turbulentas, tornou-as pouco significativas em termos dos ensaios da primeira etapa.

Inicialmente, pensou-se em aumentar tais perdas através da introdução, por exemplo, de válvulas parcialmente fechadas nas linhas de saída dos filtros. Constatou-se, entretanto, que tais medidas, além da difícil execução, eram desnecessárias, uma vez que a instalação piloto teria de ser modificada de qualquer forma para a terceira etapa. Para efeito de comparação entre as duas fases da pesquisa, o importante seria a igualdade entre os meios filtrantes, nos quais haveria o desenvolvimento de perdas de carga devidas à retenção de impurezas, ficando as perdas turbulentas como um valor constante a ser adicionado àquelas, para a obtenção das perdas totais. Assim, foi mantida a configuração da instalação experimental, desconsiderando-se as perdas de carga turbulentas observadas durante os ensaios desta etapa.

Quanto às perdas de carga no meio filtrante limpo, as mesmas podem ser analisadas com auxílio do quadro 5.2 e da figura 5.1. Os dados registrados como pré-ensaios serviram para comprovar a igualdade entre os quatro filtros pilotos utilizados no experimento; as pequenas diferenças notadas, sobretudo dos filtros 3 e 4 em relação aos de número 1 e 2, foram consideradas como aceitáveis, ficando abaixo de 5%.

Tais dados permitiram também que se determinasse a curva de variação das perdas de carga na areia limpa em função das taxas de filtração. Fazendo-se uma regressão linear, através do método dos mínimos quadrados, foi obtida a seguinte equação de reta, representada graficamente na figura 5.1 por uma linha contínua:

$$h_m = (1,00 \times 10^{-3}) \cdot v \quad (n = 17, r^2 = 0,99) \quad (6.1)$$

onde: h_m : perda de carga na areia limpa (em m).
 v : taxa de filtração (em $m^3/m^2 \cdot d$).

O valor numérico apresentado na equação corresponde ao coeficiente de perda de carga laminar inicial (K'_0). A relação entre os referidos parâmetros (h_m e v) poderia ser obtida teoricamente a partir da equação de Ergun, que incorpora uma componente de perda de carga turbulenta:

$$h_m = 150 \frac{v}{g} \frac{(1 - \epsilon_0)^2 L}{(\epsilon_0)^3 C_e^2} \Sigma \left(\frac{p_i}{\bar{d}_i^2} \right) v + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_0) L}{g(\epsilon_0)^3 C_e} \Sigma \left(\frac{p_i}{\bar{d}_i} \right) v^2 \quad (6.2)$$

onde: v : coeficiente de viscosidade cinemática (m^2/s).
 g : aceleração da gravidade (m/s^2).
 ϵ_0 : porosidade do meio filtrante limpo.
 L : espessura do leito filtrante (m).
 C_e : coeficiente de esfericidade dos grãos.
 p_i : porcentagem do meio filtrante compreendida entre duas peneiras consecutivas da série granulométrica.
 \bar{d}_i : média geométrica das aberturas de duas peneiras consecutivas da série granulométrica (m).
 v : taxa de filtração (m/s).

Para uma temperatura da água de $20^\circ C$, $v = 1,003 \times 10^{-6} m^2/s$; considerando-se uma porosidade inicial de 0,45 e um coeficiente de esfericidade de aproximadamente 0,8, tem-se, para a areia empregada no experimento, a equação teórica a seguir, expressa nas mesmas unidades da equação (6.1):

$$h_m = (0,96 \times 10^{-3}) \cdot v + (2,02 \times 10^{-7}) \cdot v^2 \quad (6.3)$$

Note-se que, para as condições assumidas, o termo linear obtido através do cálculo teórico é praticamente igual ao valor experimental mostrado na equação (6.1). Por outro lado, deve-se ter em conta que o termo correspondente à perda turbulenta somente torna-se significativo com taxas de filtração mais elevadas, quando o escoamento deixa de ser laminar, entrando na faixa de transição e fazendo com que a relação $h_m \times v$ deixe de ter um desenvolvimento linear.

Conforme mencionado anteriormente, à medida em que os ensaios da primeira etapa foram se sucedendo, novos valores para as perdas de carga no

meio filtrante limpo foram registrados, podendo ser vistos na mesma figura 5.1, identificados com o número do ensaio respectivo. Pode-se notar imediatamente uma certa dispersão dos pontos em relação à reta original, fato que será analisado a seguir.

Observando-se a referida figura, constata-se inicialmente que, na grande maioria dos ensaios, a perda de carga na areia limpa resultou maior que a prevista pela equação (6.1). Nos vinte primeiros ensaios, entretanto, não houve, com algumas exceções, diferenças muito grandes. Além disto, tais desvios foram maiores nos casos em que as taxas de filtração também o eram, justamente quando a equação (6.3) deve ser considerada, com sua componente de perda de carga turbulenta.

Nos ensaios subseqüentes, porém, as diferenças se acentuaram, mesmo para taxas de filtração baixas, mostrando ainda uma tendência à definição de novas curvas, mostradas em linha tracejada na figura 5.1. Esta mudança de comportamento coincidiu com a interrupção do experimento ao fim do ensaio nº 21, para que o equipamento de medição contínua de turbidez pudesse ser instalado. Tal interrupção durou cerca de dois meses.

Entre as possíveis causas do aumento dos valores da perda de carga inicial, cogitou-se, a princípio, em falhas na lavagem dos filtros, com uma remoção ineficiente das partículas previamente retidas. No entanto, a utilização de ar e água, o cuidado na execução da operação e as características finais da água de lavagem afastaram tal hipótese. Outra possibilidade analisada foi a de que o emprego de um polímero natural na ETASC (amido de araruta ou de batata) pudesse estar gerando residuais de perda de carga, alterando as características do meio filtrante. Além de não encontrar suporte na literatura, tal hipótese foi descartada quando, em outro experimento realizado simultaneamente na ETASC, não foi detectada a presença significativa do amido na água decantada.

Quanto às características físicas da camada de areia que têm influência na perda de carga, incluídas na equação (6.2), nada ficou provado. O coeficiente de esfericidade e a própria granulometria podem ter sofrido pequenas alterações, como, por exemplo, a quebra de grãos durante as lavagens dos filtros. Não foi feita uma verificação posterior, mas tais alterações, se ocorreram, não devem ter sido significativas. Quanto à espessura do leito filtrante, foram observadas variações de, no máximo, 1 cm em relação ao valor original. Além do valor muito pequeno, tais variações foram no sentido da redução da camada, o que implicaria na redução das perdas de carga, ainda mais considerando-se que pode ter havido perda do material mais fino. O parâmetro mais suscetível a variações seria a porosidade, condicionada pela compactação efetuada após a lavagem e pelas características da estratificação da areia, ambas podendo variar dentro de certos limites. No entanto, embora possa ter provocado pequenas diferenças entre ensaios, o efeito das alterações da porosidade seria aleatório, não determinando uma tendência, como a que foi observada no experimento.

Assim, a causa mais provável do aumento das perdas de carga iniciais recaiu sobre um parâmetro que, à época, passou relativamente desperce-

bido, qual seja, a viscosidade cinemática da água. Isto porque os primeiros 21 ensaios foram realizados num período mais quente, de janeiro a abril, enquanto os restantes tiveram lugar em pleno inverno. Apesar de não ter havido um monitoramento contínuo da temperatura da água durante a pesquisa, dados de operação da ETASC e medidas eventuais realizadas em dias muito frios indicaram que, no primeiro período, os valores mantiveram-se sempre acima de 20 °C, freqüentemente ultrapassando a marca de 25 °C; por outro lado, a fase executada nos meses de julho e agosto apresentou registros de 16 °C em alguns dos ensaios. Uma vez que a viscosidade é função da temperatura, uma queda de 20 °C para 15 °C causa um aumento de aproximadamente 14 % na primeira. O aumento é de 27 % no intervalo 25-15 °C. Sendo a perda de carga diretamente proporcional à viscosidade cinemática, conforme pode ser visto na equação (6.2), alterações da mesma ordem de grandeza devem ser esperadas, o que coincidiu com os dados registrados, fazendo com que a variação da temperatura possa ser considerada como a principal causa das diferenças observadas.

Infelizmente, esta análise somente foi feita após o término da investigação experimental, de modo que a temperatura da água não foi alvo de um acompanhamento sistemático durante a mesma. De qualquer forma, a influência deste parâmetro será levada em conta nas discussões posteriores.

6.1.2. Ensaios com Taxa Constante

O principal objetivo dos ensaios da primeira etapa da pesquisa foi o de obter-se a variação da perda de carga com o tempo, para diferentes taxas de filtração, mantidas constantes devido à elevação do nível d'água acima do leito filtrante. Os dados assim obtidos puderam ser então comparados com os resultados da terceira etapa, verificando-se o método proposto neste trabalho.

O tratamento inicial dos dados da presente etapa consistiu na elaboração das figuras do Apêndice "B", a partir das tabelas do apêndice anterior, com destaque para a evolução da perda de carga total com o tempo. Esta evolução apresentou um comportamento padrão ao longo dos ensaios, caracterizado por um desenvolvimento nitidamente linear na parte inicial das curvas de filtração (no mínimo, até 12 horas de operação), seguindo-se uma tendência de afastamento da reta inicial.

O crescimento linear da perda de carga é uma característica apresentada pelos filtros que têm uma ação de profundidade, ao contrário daqueles em que predomina a retenção superficial, nos quais acontece um aumento exponencial do mesmo parâmetro. A ação de profundidade pode ser comprovada, no experimento realizado, observando-se as figuras do Apêndice "C", que trazem a variação das perdas de carga em diversas profundidades do leito filtrante, durante vários ensaios. Nota-se que, se por um lado houve uma penetração de partículas na camada de areia, aumentando as perdas de carga no interior desta, por outro lado tal fenômeno restringiu-se aos primeiros 40 a 50 centímetros do leito, indicando que poderia ter sido adotada uma espessura bem menor para o mesmo.

A comprovação da ação de profundidade, embora sem a extensão que poderia ser considerada ideal, é importante, pois o modelo de Di Bernardo é válido para este tipo de filtração, que, aliás, predomina no tratamento de águas para abastecimento.

Para efeito da presente pesquisa, os dados de perda de carga total que interessam mais diretamente foram os registrados justamente quando ocorria o crescimento linear da mesma, correspondendo às primeiras 10 a 12 horas de funcionamento dos filtros. Apesar disto, a maioria dos ensaios prolongou-se bem além deste período, conforme pode-se ver pelos resultados mostrados. Não obstante, somente foram traçados, nas figuras do Apêndice "B", os trechos retos relativos aos períodos iniciais de operação.

A obtenção destas retas e de suas respectivas equações foi feita através de regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados, utilizando apenas os dados de tempo e perda de carga total do período correspondente. As equações resultantes são da forma:

$$H(t) = H_0 + a^* \cdot t \quad (6.4)$$

onde: $H(t)$: perda de carga total no tempo t (L).
 H_0 : perda de carga total inicial (L).
 a^* : coeficiente de variação da perda de carga total (LT^{-1}).

A constante a^* representa a inclinação das retas obtidas, e traduz a velocidade de crescimento da perda de carga com o tempo. Tal velocidade de deverá variar de acordo com a quantidade de partículas retidas no leito filtrante por unidade de tempo. Considerando a saída de partículas desprezível em relação à entrada, o que acontece num filtro em operação normal, pode-se escrever:

$$a^* = a \cdot C_0 \cdot v \quad (6.5)$$

onde: a : coeficiente de variação da perda de carga total, modificado (dimensão inversa à de C_0).
 C_0 : concentração de partículas no afluente ao filtro, podendo ser expressa em termos de turbidez, sólidos suspensos etc.

Combinando as equações (6.4) e (6.5), obtém-se a seguinte expressão, semelhante à proposta por IVES (1963):

$$H(t) = H_0 + (a \cdot C_0 \cdot v) \cdot t \quad (6.6)$$

O valor do coeficiente a deve permanecer constante para um determinado meio filtrante trabalhando sob condições definidas e recebendo o mesmo tipo de suspensão afluente. Deste modo, podendo-se obter este parâmetro característico, pode-se prever o comportamento da perda de carga no filtro em questão para diferentes valores das outras variáveis.

Tal procedimento foi realizado a partir dos dados disponíveis nessa etapa da pesquisa. Utilizando-se as equações calculadas por regressão li

near, juntamente com os valores das taxas de filtração e da turbidez média do afluente aos filtros no período considerado, foram obtidos os valores do coeficiente a apresentados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1. Determinação do coeficiente a para os ensaios da primeira etapa.

ENSAIO	v (m ³ /m ² .d)	H ₀ (m)	a* (m/h)	Turbidez C ₀ (UT)	a (x 10 ⁵) (d/h.UT)
1	300	0,31	0,019	2,56	2,5
2	500	0,55	0,030		2,3
3	600	0,65	0,031	2,50	2,1
4	550	0,62	0,027		2,0
5	450	0,45	0,022		2,0
6	500	0,55	0,040	2,38	3,4
7	400	0,44	0,026		2,7
8	200	0,19	0,012		2,5
10	550	0,61	0,033	2,20	2,7
11	550	0,61	0,028		2,3
12	450	0,45	0,025		2,5
13	450	0,51	0,026		2,6
14	400	0,41	0,025	1,75	3,6
15	500	0,55	0,028		3,2
16	500	0,51	0,028		3,2
17	400	0,45	0,024		3,4
18	250	0,27	0,014	2,38	2,4
19	350	0,40	0,019		2,3
20	250	0,26	0,013		2,2
21	350	0,41	0,021		2,5
22	500	0,59	0,051	3,43	3,0
23	550	0,70	0,055		2,9
24	600	0,77	0,071		3,4
25	550	0,73	0,042	1,74	4,4
26	600	0,81	0,039	1,51	4,3
27	500	0,69	0,034	1,51	4,5
29	450	0,61	0,030	1,64	4,1
30	400	0,54	0,027		4,1
31	200	0,23	0,014	1,58	4,4
32	300	0,37	0,019		4,0
33	250	0,31	0,017		4,3

Alguns comentários devem ser feitos em relação aos valores mostrados no referido quadro. Em primeiro lugar, deve-se notar que a unidade adotada para o coeficiente a permite que se multiplique diretamente seus valores pelos de C_0 e v , obtendo-se o coeficiente a^* , em m/h. Este último, por sua vez, deve ser multiplicado pelo número de horas desejado, a fim de se encontrar a perda de carga desenvolvida do início da carreira até o referido momento.

Quanto aos valores em si, era de se esperar que todos os ensaios convergissem para um único coeficiente a . À primeira vista, tal não aconteceu, podendo-se detectar diferenças de mais de 100 % entre alguns resultados. Uma análise mais cuidadosa, entretanto, mostra que não houve uma divergência tão acentuada, justificando as variações registradas.

Observando-se cada grupo de 2 a 4 ensaios executados simultaneamente, nota-se que, em cada um desses grupos, os valores de a são bastante próximos entre si; a única exceção ocorreu no ensaio nº 6, sem uma explicação satisfatória. Isso mostra que o coeficiente a reflete outras características que não as do próprio filtro, e que também não estão contempladas pelas outras variáveis. Essas outras características poderiam ser, por exemplo, o tipo de floco presente na água decantada, o tipo e as dosagens dos produtos químicos, ou mesmo a temperatura da água. Nos ensaios realizados em conjunto, esses ou outros fatores eram comuns às diversas unidades em operação, minimizando as diferenças entre os valores de a .

Uma causa significativa da ocorrência destas diferenças foi, sem dúvida, a mudança dos aparelhos para medição de turbidez, feita entre o ensaio 21 e o 22. Por um lado, as médias da turbidez afluente, que antes eram calculadas por interpolação a partir de leituras isoladas, passaram a ser obtidas através de um registro contínuo, incluindo variações que não eram detectadas na fase anterior. Por outro lado, notou-se que os turbidímetros de escoamento contínuo apresentavam leituras consistentemente menores que o aparelho de bancada, ambos calibrados segundo as instruções do fabricante, por sinal o mesmo. Infelizmente, não foi possível uma comparação detalhada das diferenças de medição, mas a simples observação dos dados de turbidez apresentados no Apêndice "A", antes e após a substituição do turbidímetro, evidenciam as diferenças.

Como consequência, verificam-se duas tendências bastante claras, cada uma correspondente ao período em que um dos aparelhos estava sendo utilizado, levando a uma convergência em torno de dois valores para a . Para valores de turbidez média mais baixos, os resultados encontrados para o coeficiente a foram maiores, e vice-versa. A maior parte das diferenças observadas pode ser atribuída às alterações nas medições de turbidez.

Independentemente deste fato, que refletiu uma situação particular ocorrida durante a pesquisa, há indicações de que a turbidez pode não ser o parâmetro ideal para se representar a quantidade de partículas presentes no afluente aos filtros. Observando-se os ensaios 14 a 17, nota-se que, em relação aos imediatamente anteriores e posteriores, houve uma redução da

turbidez média do afluente, registrando-se também um aumento dos valores de a, o que não deveria acontecer. A mesma observação pode ser feita, no sentido inverso, com relação aos ensaios 22, 23 e 24, em comparação com os subseqüentes. Em ambos os casos, era de se esperar que as alterações na qualidade do afluente, que realmente ocorreram e influenciaram no coeficiente a*, não se refletissem em a. Uma explicação para a alteração deste último seria o fato de que as diferenças numéricas nos valores da turbidez não acompanhariam proporcionalmente as variações na quantidade de partículas entrando nos filtros. Noutras palavras: um aumento de 100 % na quantidade destas partículas pode manifestar-se através de um índice diferente de aumento da turbidez, afetando, assim, o cálculo do coeficiente a. Este argumento é reforçado pelo fato de que, nos ensaios em que a turbidez média do afluente era aproximadamente igual, houve uma certa igualdade dos valores de tal coeficiente. Nestes casos, a limitação imposta pela utilização da turbidez no cálculo deixa de ser significativa.

Levando-se em conta todas essas considerações, foram então determinados dois valores para o coeficiente a. Para os primeiros 21 ensaios, excetuando-se os de nº 6, 9 e 14 a 17, o valor médio obtido foi:

$$a = (2,4 \pm 0,2) \times 10^{-5} \text{ d/h.UT} \quad (\text{c.v.} = 9,6\%)$$

Já para os ensaios 25 a 33 (exceto o 28), quando foram empregados os turbidímetros de escoamento contínuo, obteve-se:

$$a = (4,3 \pm 0,2) \times 10^{-5} \text{ d/h.UT} \quad (\text{c.v.} = 4,1\%)$$

O desvio calculado para este segundo valor médio de a ($\pm 4,1\%$) indica uma baixa dispersão dos dados, podendo-se considerá-lo como representativo do comportamento observado na primeira etapa da pesquisa, associado à medição contínua da turbidez. Como foi esta a metodologia empregada na terceira etapa, uma comparação entre ambas deve ser feita referindo-se ao valor de a obtido sob condições semelhantes, conforme será apresentado posteriormente.

Uma última observação acerca dos resultados experimentais da presente etapa refere-se à turbidez dos efluentes dos filtros pilotos. A partir das figuras do Apêndice "B", pode-se ver que, na grande maioria dos ensaios, não foi registrada a ocorrência do traspasse final, mesmo em carreiras relativamente longas. Eventuais picos na turbidez do efluente estiveram associados, em geral, com o mesmo fenômeno no afluente, indicando, provavelmente, problemas na dosagem de produtos químicos da ETASC. Em poucos ensaios (22 a 24, 29) chegou a haver uma perda mais significativa de qualidade do efluente ao longo da operação dos filtros. A espessura da camada de areia utilizada foi, com certeza, um dos fatores determinantes da não ocorrência do traspasse, pois, conforme observação já feita a respeito das curvas do Apêndice "C", o meio filtrante esteve longe de atingir uma condição de saturação.

6.2. SEGUNDA ETAPA

A simulação do comportamento de um sistema de filtração com taxa declinante variável, através de um modelo computacional, foi a atividade característica desta etapa da pesquisa. Cronologicamente, entretanto, tais simulações foram realizadas, tanto antes, quanto durante e depois da execução da etapa experimental posterior.

Em cada um destes momentos, foram utilizadas diferentes equações relacionando as perdas de carga laminares e turbulentas com as taxas de filtração, conforme mencionado no item 5.2. Embora as curvas resultantes sejam bastante próximas umas das outras, como era de se esperar, cada uma das equações utilizadas reflete o melhor ajuste aos dados disponíveis em cada situação.

Deste modo, as primeiras simulações foram feitas a partir dos dados de perda de carga levantados logo após a montagem da instalação experimental para operação com taxa declinante. Através de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, tais dados originaram as seguintes equações, correspondentes, respectivamente, à perda de carga no meio filtrante limpo e na saída dos filtros:

$$h_m = (1,11 \times 10^{-3}) \cdot v \quad (n = 25, r^2 = 0,99) \quad (6.7)$$

$$h_t = (3,08 \times 10^{-5}) \cdot v^{1,66} \quad (n = 24, r^2 = 0,99) \quad (6.8)$$

Deve-se notar que a equação (6.7) apresenta uma pequena diferença (11 %) em relação à sua equivalente obtida na primeira etapa, (6.1). Tal diferença não é suficiente para caracterizar uma alteração do meio filtrante entre as duas fases experimentais da pesquisa, podendo ser atribuída, conforme discutido no item 6.1.1, a fatores como mudanças na temperatura da água. Já a equação (6.8) traduz uma perda de carga que somente passou a ser considerada após a montagem do SFTD experimental, não devendo ser comparada a qualquer outra da primeira etapa.

As simulações a partir dessas duas equações permitiram que se definissem os parâmetros de operação da última fase da pesquisa. Uma vez que o número de filtros da bateria não podia ser alterado, tais parâmetros seriam a taxa média de filtração e a carga hidráulica disponível. Para a primeira, foram adotados os valores de 250, 300 e 350 m³/m².d, compatíveis com a prática usual desse tipo de filtração. A carga disponível, por sua vez, foi definida para cada uma daquelas taxas, após os resultados das simulações e levando-se em conta dois fatores: deveria ser suficientemente alta para que a relação entre a taxa máxima e a taxa média de filtração (coeficiente F) fosse maior que 1,2; não poderia ser tão alta de modo a que os níveis de operação ultrapassassem as dimensões da instalação piloto. Como consequência, foram adotadas as cargas hidráulicas máximas de 1,2, 1,6 e 1,6 m, nesta ordem, para as referidas taxas de filtração. Para que tais valores fossem definidos, dezenas de simulações, que não estão sendo aqui apresentadas, foram executadas em computador.

Os resultados de simulações que estão sendo apresentados, nos Apêndices "D" e "E", referem-se, conforme já foi dito no item 5.2, apenas às condições que foram ensaiadas na terceira etapa, correspondendo aos valores citados no parágrafo anterior. Tais resultados foram obtidos após o término da investigação experimental, e as equações de perda de carga empregadas foram ajustadas aos dados efetivamente registrados no decorrer da mesma, apresentando algumas diferenças em relação às equações (6.7) e (6.8). Da mesma forma, alguns valores de v_{med} e N_2 usados nas simulações diferem ligeiramente dos valores nominais dos respectivos ensaios, equivalendo à média dos dados obtidos após uma seleção dos ciclos representativos do SFTD.

As equações modificadas foram, para cada ensaio da terceira etapa, as seguintes:

a. Ensaio 1 ($v_{med} = 250 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$; $N_2 = 1,20 \text{ m}$)

$$h_m = (1,11 \times 10^{-3}) \cdot v \quad (n = 45, r^2 = 0,99) \quad (6.9)$$

$$h_t = (1,35 \times 10^{-4}) \cdot v^{1,40} \quad (n = 88, r^2 = 0,99) \quad (6.10)$$

b. Ensaio 2 ($v_{med} = 350 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$; $N_2 = 1,61 \text{ m}$)

$$h_m = (1,26 \times 10^{-3}) \cdot v \quad (n = 24, r^2 = 0,99) \quad (6.11)$$

$$h_t = (3,38 \times 10^{-5}) \cdot v^{1,65} \quad (n = 62, r^2 = 1,00) \quad (6.12)$$

c. Ensaio 3 ($v_{med} = 297 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$; $N_2 = 1,61 \text{ m}$)

$$h_m = (1,40 \times 10^{-3}) \cdot v \quad (n = 22, r^2 = 0,99) \quad (6.13)$$

$$h_t = (6,31 \times 10^{-5}) \cdot v^{1,54} \quad (n = 59, r^2 = 0,99) \quad (6.14)$$

É interessante observar que, embora pareçam bastante distintas à primeira vista, as equações (6.10), (6.12) e (6.14), referentes às perdas de carga turbulentas, definem curvas muito semelhantes entre si e em relação à curva definida pela equação (6.8). As diferenças observadas ao se calcular h_t através das diversas equações, com valores de v dentro dos intervalos para os quais estas foram ajustadas, poucas vezes ultrapassam 3 cm.

Por outro lado, é nas equações de perda de carga no meio filtrante limpo que as diferenças são mais significativas. E, da mesma maneira que na primeira etapa, a evolução dos ensaios ocorreu no sentido da redução da temperatura da água, reforçando uma vez mais a hipótese de que esta tenha sido a principal causa das alterações nas perdas de carga iniciais, que, de acordo com as equações (6.9), (6.11) e (6.13), aumentaram no decorrer do experimento. Tais alterações é que determinaram a utilização de equações específicas para as simulações correspondentes a cada um dos ensaios da terceira etapa.

Quanto aos resultados em si, uma análise dos mesmos fica bastante facilitada observando-se as figuras do Apêndice "E". Nestas, vê-se claramente o relacionamento que existe, a partir da definição das curvas de perda de carga, entre as taxas de filtração e os níveis de operação no SFTD. Pode-se notar, também, a distribuição das taxas entre os diversos filtros da bateria, comprovando-se uma vez mais que, ao contrário de suposições anteriores (CLEASBY & DI BERNARDO, 1980; CLEASBY, 1981, 1989), não há uma simetria em relação à taxa média de filtração. No presente caso, constatou-se que as diferenças entre as taxas (os "degraus") tornavam-se menores à medida em que os filtros se sujavam.

Outra observação pode ser feita comparando-se as simulações relativas às taxas de 300 e 350 m³/m².d. Comprova-se, de acordo com os resultados apresentados por DI BERNARDO (1986a), que, para um mesmo número de filtros e uma mesma carga hidráulica disponível, um aumento na taxa média de filtração acarreta um acréscimo nas taxas de todos os filtros, e uma redução na variação entre os níveis N₁ e N₂. Já a variação entre N₂ e N₃, durante a lavagem de uma das unidades, é maior para essas mesmas condições.

A análise dos resultados das simulações do comportamento do SFTD ficará, por enquanto, limitada a esses poucos pontos. A comparação entre os mesmos e os resultados experimentais, bem como sua aplicação ao método de levantamento de dados proposto na presente pesquisa, serão abordados mais detalhadamente nos itens a seguir.

6.3. TERCEIRA ETAPA

6.3.1. Avaliação da Operação do SFTD Experimental

A análise do comportamento apresentado pela instalação experimental funcionando como um SFTD deve ser feita, inicialmente, a partir dos dados apresentados nos quadros do Apêndice "F" e, principalmente, das curvas incluídas no Apêndice "G". Com o auxílio dos mesmos, serão discutidos diversos aspectos relativos ao referido comportamento, conforme será visto a seguir:

a. Início dos ensaios: cada um dos três ensaios realizados na terceira etapa iniciou-se com todos os filtros da bateria tendo sido lavados, de modo que, no primeiro ciclo, as taxas de filtração eram iguais nas quatro unidades. Pequenas diferenças observadas, sobretudo no ensaio nº 2, não passaram de 3 %, podendo ser atribuídas à compactação do meio filtrante. Assim, esse primeiro ciclo caracteriza-se por apresentar todos os filtros trabalhando com a taxa média de filtração do respectivo ensaio, o que será levado em conta mais à frente.

b. Ciclos iniciais: à medida em que os filtros foram sendo lavados, um por vez, pôde-se notar a diferenciação das taxas de filtração entre os mesmos, com as unidades limpas assumindo valores maiores deste parâmetro. Em cada um dos ensaios foram seguidos diferentes procedimentos para se atingir a condição caracterizada pelo comportamento repetitivo do SFTD.

Deste modo, no ensaio nº 1, os primeiros ciclos tiveram sua duração fixada arbitrariamente em 7,5 horas, valor este menor que os registrados posteriormente em regime de operação estável. Após todos os filtros terem sido lavados uma vez, notou-se que a carga hidráulica disponível pré-terminada (1,20 m) ainda demoraria a ser atingida, razão pela qual o 5º ciclo foi prolongado até que tal fato ocorresse. A partir daí, os ciclos passaram a ser encerrados sempre que aquele nível era alcançado, segundo a operação normal de um SFTD. O prolongamento do 5º ciclo, entretanto, sobrecarregou excessivamente alguns dos filtros, cujas taxas foram bastante reduzidas nos ciclos seguintes. Foi necessária mais uma lavagem em cada uma das unidades para que uma situação de estabilidade fosse atingida, no 9º ciclo.

No ensaio nº 2, o procedimento adotado foi inverso ao anterior, ocorrendo o prolongamento já no 1º ciclo, seguindo-se dois de curta duração. O mesmo fenômeno de sobrecarga foi registrado, com reduções excessivas nas taxas de alguns filtros. A carga hidráulica disponível somente foi alcançada no 5º ciclo e, novamente, uma condição de estabilidade ocorreu apenas no ciclo nº 9.

O terceiro ensaio foi o que apresentou o melhor desempenho com relação aos ciclos iniciais. A diferença relativa aos ensaios anteriores deveu-se ao fato da duração destes ciclos ter sido fixada em valores próximos (ligeiramente maiores) aos esperados para a operação normal da bateria. Como consequência, não houve necessidade do prolongamento de carreiras nem sobrecarga de filtros, com a estabilidade podendo ser detectada já no 4º ciclo. Este fato reforça a importância de se prever, ao nível de projeto, as durações dos ciclos de um SFTD, facilitando sua operação.

Independentemente do procedimento empregado nos ciclos iniciais, pôde-se constatar uma tendência para se chegar rapidamente a uma condição estável de operação, o que, na pior das hipóteses, ocorreu após cada unidade da bateria ter sido lavada duas vezes.

c. Perturbações nos ensaios: durante a realização da investigação experimental nesta etapa da pesquisa, ocorreram fatos imprevistos que, embora sem invalidar os ensaios como um todo, geraram perturbações em alguns ciclos, alterando o comportamento nos mesmos. Tais perturbações, que serão devidamente identificadas e comentadas, foram provocadas, ou pela operação incorreta da instalação piloto, ou, principalmente, por alterações na água decantada produzida na ETASC, e que constituía o afluente ao SFTD.

Assim, a primeira perturbação significativa ocorreu já no ensaio nº 1, para o qual foi dito que uma situação de estabilidade havia sido atingida no 9º ciclo. Na verdade, esta observação é válida para o início do referido ciclo, que não chegou a ser concluído devido a um erro de dosagem na ETASC, que fez com que a turbidez da água decantada alcançasse valores bastante altos. O problema persistiu durante os ciclos 10, 11 e 12, que tiveram curta duração. Ao término desse último, o experimento, que vinha sendo conduzido de maneira contínua, foi interrompido pela primeira vez, até que fosse regularizada a condição do afluente. A partir daí, passou a ser empregada a operação intermitente da instalação piloto, conforme descrito no item

4.4.2(i). Os efeitos da perturbação, por sua vez, continuaram a se manifestar mesmo após a normalização do afluente, podendo-se ver seus reflexos sobre as taxas de filtração do 13º ao 16º ciclos. Somente a partir do ciclo nº 17 pode-se notar uma certa estabilização, com uma tendência ao comportamento repetitivo. Ao término do 20º ciclo, entretanto, uma nova perturbação alterou os resultados que vinham sendo obtidos.

Desta vez, o erro ocorreu na própria instalação piloto, no momento da lavagem do filtro F4. Inadvertidamente, foi introduzido ar em F3, revolvendo o seu meio filtrante. Ao se iniciar o ciclo 21, as taxas dos referidos filtros estavam bastante próximas entre si, assim permanecendo durante os dois ciclos seguintes. Somente no 26º ciclo, após todos os filtros terem sido lavados, as taxas voltaram ao comportamento esperado.

Logo em seguida, um novo erro de dosagem na ETASC provocou um aumento inesperado da perda de carga, no fim do 27º ciclo. As consequências deste erro prolongaram-se pelos seis ciclos seguintes, e apenas no 33º houve uma nova estabilização, que se manteve até o 38º. Entre este e o ciclo seguinte houve uma interrupção de vários dias, que parece ter provocado algumas alterações nas taxas de filtração nos ciclos subsequentes. Após todas as unidades terem sido lavadas, retomou-se um comportamento estável no ciclo nº 42, não tendo sido registradas novas perturbações significativas até o fim do primeiro ensaio.

No ensaio nº 2, estas não chegaram a ser registradas, só voltando a ocorrer no terceiro. Desta feita houve, durante a lavagem no início do 6º ciclo, um aumento súbito da vazão afluente à instalação piloto. O problema com a vazão persistiu durante o referido ciclo, que teve sua duração reduzida, sobretudo por ter apresentado uma perda de carga inicial maior. Contudo, a partir do 7º ciclo pôde-se detectar uma nova condição de estabilidade, mantida até o final.

Diante das perturbações ocorridas, podia-se optar entre continuar ou encerrar o ensaio que vinha sendo executado. Em todos os casos, a primeira opção foi a escolhida, por dois motivos principais. Um deles, foi o de evitar-se um novo início de ensaio, com os primeiros ciclos e a espera até ser atingido um comportamento estável. O outro foi o interesse em estudar os efeitos das perturbações sobre o SFTD, e sua capacidade de recuperação. Neste sentido, observou-se que as alterações ocorridas num determinado ciclo refletiam-se nos posteriores, mas que, em geral, bastava que os filtros fossem lavados uma única vez para que a situação se normalizasse.

Deve-se ainda destacar que perturbações menos significativas, como eventuais picos de turbidez na água decantada ou pequenas alterações na vazão total afluente aos filtros, ocorreram em diversos momentos ao longo do experimento, sem, contudo, provocarem mudanças acentuadas no comportamento dos mesmos. Da mesma forma, a operação intermitente do SFTD, adotada em boa parte da investigação experimental, não causou alterações que permitissem distingui-la do modo de operação contínuo.

d. Ciclos em operação estável: tanto os ciclos iniciais, quanto a queles que se seguiram à ocorrência de perturbações significativas, não traduzem o comportamento típico registrado para o SFTD. Como consequência, os da dos relativos a tais ciclos não devem ser computados no momento da determinação dos parâmetros característicos desse último. Assim, procedeu-se a uma seleção entre os ciclos executados, identificando-se aqueles que refletiam uma condição estável de operação.

Conforme referido anteriormente no item 5.3.2, os ciclos incluídos nesta primeira seleção podem ser vistos nos apêndices "H" e "I", que apresentam apenas dados relativos aos mesmos. Desta maneira, pode-se notar, no ensaio nº 1, a exclusão dos primeiros 15 ciclos, bem como dos de nº 21 a 25, 28 a 32, e 39 a 41, todos relacionados com o começo de operação ou com perturbações já mencionadas. No segundo ensaio, a exclusão restringiu-se a 8 ciclos iniciais, enquanto, no terceiro, apenas os de nº 1, 2, 3 e 6 não foram selecionados.

O critério empregado nesta seleção, baseado em fatos registrados durante os ensaios, fez com que somente fossem descartados os ciclos claramente diferenciados do padrão de comportamento geral. Conforme será mostrado posteriormente, uma nova seleção, mais restritiva, foi feita no decorrer da análise dos resultados experimentais.

e. Variação das taxas de filtração: os dados mostram que as taxas de filtração medidas nas quatro unidades constituintes do SFTD piloto apresentaram as características básicas da operação com taxa declinante variável. Assim, a manutenção da taxa média de filtração, a variação na forma de degraus e a ocorrência de picos por ocasião das lavagens caracterizaram o comportamento das taxas ao longo do experimento.

Com relação às taxas médias, os valores mostrados nas respectivas colunas dos quadros contidos nos apêndices "F" e "H" mostram que, na grande maioria dos ciclos, os desvios em relação ao valor nominal do ensaio não superaram 2 %. Tal resultado, condizente com a margem de erro nas medidas de vazão, indica que as taxas médias de filtração mantiveram-se praticamente inalteradas nos intervalos entre lavagens, comprovando também que não havia um armazenamento significativo de água na instalação piloto.

Quanto à variação das taxas nos diversos filtros da bateria, pode ser vista claramente, nas figuras do Apêndice "G", a evolução das mesmas segundo "degraus". Por outro lado, analisando-se cada um destes degraus, observam-se pequenas variações das taxas dentro de um mesmo ciclo, de acordo com tendências bem evidentes. Nos quadros do Apêndice "H", são mostrados os valores iniciais e finais das taxas de filtração nos ciclos selecionados, além dos valores médios correspondentes.

Assim, pode-se ver que, no filtro trabalhando com a taxa máxima, ocorria um aumento deste parâmetro durante um ciclo. O mesmo acontecia, em menor escala, com a taxa imediatamente inferior. Já as duas taxas menores apresentavam uma tendência a terem seus valores diminuídos, de forma mais acentuada no filtro operando com a taxa mínima.

Este comportamento pode ser justificado a partir dos dados obtidos na primeira etapa da pesquisa, relativos ao crescimento da perda de carga total ao longo das carreiras de filtração. Foi observado que tal crescimento, inicialmente linear, tornava-se ligeiramente exponencial à medida em que prosseguia a operação dos filtros, tendo como causa mais provável a saturação das camadas superficiais do meio filtrante com as impurezas retidas. No SFTD, tal fenômeno provocaria as variações nas taxas de filtração da seguinte maneira: os filtros mais sujos apresentariam uma tendência a um aumento exponencial da perda de carga total (ou seja, do nível d'água sobre a areia); como os níveis eram iguais nas quatro unidades, tal tendência teria o efeito de aumentar as taxas nos filtros mais limpos; como consequência, o aumento do nível seria minimizado, não sendo suficiente para manter constantes as taxas nos filtros sujos, as quais sofreriam uma redução ao longo do ciclo. Noutras palavras, as variações das taxas de filtração dentro de um mesmo ciclo seriam provocadas pela alteração das taxas de crescimento da perda de carga total com o tempo, ao longo das carreiras dos filtros.

Tais considerações, entretanto, passam a ter um caráter secundário diante dos pequenos valores registrados para as variações em questão. De fato, os aumentos registrados para as taxas máximas raras vezes superaram 3%, enquanto as reduções observadas nas taxas mínimas ficaram abaixo de 5%. Para as duas taxas intermediárias, as variações foram ainda menores. Em todos os casos, tais variações poderiam incluir-se na margem de erro das medidas de vazão, não fosse o fato de ocorrerem sempre num único sentido, e não de forma aleatória. De qualquer maneira, pode-se considerar as taxas de filtração como aproximadamente constantes no intervalo entre lavagens sucessivas, atribuindo-se-lhes valores médios, conforme apresentado nos quadros do Apêndice "H".

Os picos de taxa de filtração ocorriam sempre que um dos filtros era retirado de operação para ser lavado. Neste momento, a vazão total afluente ao SFTD era distribuída entre as três unidades remanescentes, cujas taxas de filtração apresentavam um rápido aumento. O mesmo só era interrompido com o término da lavagem e o retorno do filtro recém-lavado à operação. Imediatamente após, um novo pico era registrado, desta vez nesse último. Em seguida, todas as unidades apresentavam uma redução também rápida nas respectivas taxas, até que, num prazo máximo de 45 minutos, os valores correspondentes ao ciclo seguinte fossem atingidos.

Algumas observações podem ser feitas com relação ao comportamento descrito no parágrafo anterior. A primeira é a de que o maior pico era sempre registrado no filtro recém-lavado, e não no filtro mais limpo que havia permanecido em operação. Tal fato foi igualmente constatado no trabalho de HILMOE & CLEASBY (1986), contrariando o que havia sido observado anteriormente por DI BERNARDO & CLEASBY (1980). A causa desta discordância parece residir nas diferentes alturas de saída da água de lavagem adotadas nas instalações experimentais. Enquanto no trabalho daqueles últimos autores a saída localizava-se a cerca de 25 cm acima do meio filtrante, na presente pesquisa e no outro trabalho citado tal valor era maior que 1 metro. Como esta altura determina o nível d'água no interior do filtro ao término da lavagem,

e como a vazão no filtro depende deste nível, tem-se que, quanto maior a altura da saída, maior a taxa no filtro recém-lavado, justificando-se as diferenças entre os resultados dos experimentos.

Outra observação sobre as variações de taxas relacionadas com as operações de lavagem diz respeito ao fato das mesmas ocorrerem de modo bastante rápido. Conforme foi visto no item 3.4, tal comportamento está associado à ausência de um armazenamento significativo de água a montante dos filtros, que foi uma das características da instalação piloto utilizada.

f. Níveis de operação: as curvas contendo os dados de variação de perda de carga no SFTD, contidas no apêndice "G", permitem identificar-se facilmente os diversos níveis d'água característicos da operação do mesmo. Um deles, o nível inicial N_0 , somente foi registrado uma vez em cada ensaio, enquanto os demais repetiam-se a cada ciclo.

Tal repetição, entretanto, não significa que os mesmos valores eram sempre registrados ao longo do experimento. À exceção do nível correspondente à carga hidráulica disponível (N_2), cujos valores eram fixos em cada ensaio, os demais apresentaram uma certa variabilidade nos diversos ciclos. O nível mínimo de operação (N_1), atingido após a reintrodução do filtro recém-lavado, apresentou os seguintes valores médios nos ciclos selecionados:

- . Ensaio 1 : $N_1 = (0,91 \pm 0,02) \text{ m}$
- . Ensaio 2 : $N_1 = (1,34 \pm 0,02) \text{ m}$
- . Ensaio 3 : $N_1 = (1,27 \pm 0,03) \text{ m}$

Pode-se notar que os desvios não são muito acentuados, em termos absolutos, ficando compreendidos num intervalo de $\pm 2,5 \%$; todavia, em relação à diferença de nível $N_2 - N_1$, tais desvios representam variações entre 7 e 9%. As causas para a obtenção de diferentes valores de N_1 podem ter sido várias, desde alterações na qualidade do afluente entre os diversos ciclos, diferenças na compactação da areia após a lavagem, até erros nas medidas experimentais. Com relação a estes, deve-se mencionar que o nível N_1 tinha sua determinação um pouco dificultada pela característica dinâmica apresentada pelo SFTD em tais momentos.

Com relação ao nível máximo durante as lavagens (N_3), o mesmo também mostrou uma certa variação ao longo dos ensaios. Não há, entretanto, interesse em se determinar valores médios para o mesmo, uma vez que, conforme será visto posteriormente, a comparação entre a simulação e os resultados operacionais apresenta limitações. Por hora, deve-se notar que as variações de nível entre N_2 e N_3 foram relativamente significativas, aumentando para as taxas médias de filtração maiores e refletindo, mais uma vez, a ausência de um armazenamento de água no SFTD experimental. Por fim, cabe destacar a rápida variação que ocorria entre N_3 e N_1 , ao fim das operações de lavagem, não ultrapassando 45 minutos em nenhum dos ciclos realizados.

g. Duração dos ciclos: um dos parâmetros de maior interesse obtido durante a investigação experimental da terceira etapa foi o tempo de duração dos ciclos do SFTD, e, conseqüentemente, das carreiras de filtração. Os valores correspondentes podem ser obtidos a partir da respectiva coluna nos quadros do Apêndice "F".

Os dados de tempo aí apresentados incluem, na duração de cada ciclo, os períodos iniciais referentes à lavagem do filtro e à variação entre os níveis N_3 e N_1 , equivalentes, no total, a 45 minutos ou 1 hora, em cada caso. Para efeito da análise a ser desenvolvida, interessa o tempo decorrido desde o momento em que o nível N_1 é atingido, até o término do respectivo ciclo, com o nível N_2 sendo alcançado. Portanto, a duração do ciclo deverá referir-se a tal período, durante o qual há um aumento gradual do nível de operação.

A partir desta consideração, foram calculados os valores médios e os desvios padrões para a duração dos ciclos seleccionados em cada ensaio:

- . Ensaio 1 : (10,8 ± 1,4) horas. (c.v.= 13 %)
- . Ensaio 2 : (6,8 ± 1,1) horas. (c.v.= 16 %)
- . Ensaio 3 : (9,2 ± 1,2) horas. (c.v.= 13 %)

A dispersão dos dados é relativamente alta; no primeiro ensaio, por exemplo, a duração dos ciclos variou entre 8 e 14 horas (considerando apenas os previamente seleccionados), o que equivale a uma diferença de 75 %. Tal dispersão pode ser atribuída a variações nos parâmetros que condicionam o tempo de duração dos ciclos. O primeiro deles seria o nível N_1 que, conforme foi visto no ítem (f), apresentou uma certa variabilidade, o mesmo podendo ser dito com relação à turbidez do afluente e às próprias taxas de filtração nas unidades do SFTD. Todos estes fatores têm influência sobre o tempo necessário para que o nível d'água varie entre os níveis N_1 e N_2 , provocando as diferenças observadas na duração dos ciclos. Não obstante, pôde-se detectar uma certa convergência em torno dos valores médios, sendo que, num ítem posterior, números ainda mais favoráveis serão apresentados.

h. Qualidade dos efluentes: os dados relativos à qualidade da água, representados pelas medidas de turbidez do afluente e dos efluentes do SFTD experimental, indicam um excelente desempenho do mesmo, conforme os resultados apresentados nos apêndices "F", "I" e "J".

Considerando-se os ciclos com operação normal, constata-se a produção de uma água filtrada com turbidez consistentemente inferior a 0,1 UT, com a manutenção da qualidade ao longo de todo o intervalo entre lavagens e sem qualquer tendência à ocorrência de traspasse final. Durante esses períodos, eventuais aumentos na turbidez dos efluentes estiveram sempre associados a perturbações no afluente, sejam as mais significativas, comentadas no ítem (c), sejam as de menor alcance (por exemplo, ciclos 33 e 36 do ensaio 1, ou ciclo 12 do ensaio 3). No caso das perturbações menores (normalmente, por problemas de dosagem na ETASC), os efeitos cessavam logo que a condição da água decantada era normalizada, recuperando-se plenamente a qualidade do

efluente. Em várias ocasiões, as alterações na turbidez do afluente não tiveram repercussão alguma sobre a eficiência dos filtros, provavelmente por não ter havido um comprometimento do pré-tratamento, sobretudo em termos de dosagens incorretas. Em tais circunstâncias, o sistema mostrou-se capaz de absorver as variações ocorridas.

Por outro lado, picos na turbidez dos efluentes foram registrados sempre que as operações de lavagem eram realizadas. Tais picos já eram esperados, tendo sido observados em investigações anteriores (DI BERNARDO & CLEASBY, 1980; HILMOE & CLEASBY, 1986). Da mesma forma que nestes trabalhos, observou-se que a deterioração do efluente ocorria principalmente no filtro recém-lavado, após sua volta à operação, e não nos filtros que continuavam funcionando durante a lavagem. Em alguns ciclos, estes últimos não apresentaram nenhuma alteração na qualidade do efluente no momento da lavagem, conforme pode ser visto nas curvas do Apêndice "J".

Nestas mesmas curvas pode-se ver que, nos ciclos iniciados com a lavagem do filtro F1, o efluente deste, além de registrar o pico de turbidez referido no parágrafo anterior, mantinha uma qualidade ligeiramente inferior ao longo de todo o período de operação normal. Este comportamento ocorreu igualmente nos trabalhos mencionados, comprovando-se, uma vez mais, que o efluente dos filtros de um SFTD não apresenta tendência à deterioração à medida em que as carreiras se desenvolvem.

De modo geral, as variações observadas na turbidez, tanto do afluente, quanto dos efluentes da instalação piloto, no decorrer de cada um dos ciclos previamente selecionados, não foram tão significativas, permitindo que fossem calculados valores médios para tais parâmetros. Os resultados destes cálculos, feitos a partir das curvas de variação contínua de turbidez, são apresentados no Apêndice "I", passando a caracterizar os respectivos ciclos de operação.

i. Perdas de carga ao longo do meio filtrante: embora tenham sido bastante numerosos, os dados relativos à distribuição das perdas de carga ao longo da camada de areia tiveram importância secundária para a consecução dos objetivos da presente pesquisa. A sua apresentação, através das figuras do Apêndice "L", limitou-se a alguns ciclos representativos de cada um dos ensaios, referindo-se a apenas um dos filtros da bateria por vez.

A principal observação acerca desses dados refere-se à comprovação de que as perdas de carga concentraram-se na porção superior das camadas filtrante, conforme pode ser visto pelo aumento das faixas compreendidas entre as linhas correspondentes às leituras nos 4 primeiros piezômetros. Tal comportamento foi semelhante ao da fase inicial da pesquisa, indicando que poderia ter sido empregado um leito filtrante com uma espessura menor. As perdas de carga nas camadas inferiores praticamente não sofreram alterações, a não ser em decorrência de variações nas taxas de filtração, seja entre os diversos ciclos, seja ao longo de um deles.

Deve-se também observar a significativa redução das perdas de carga nas saídas dos filtros ao longo de suas carreiras, representadas pelos espaços abaixo das curvas relativas ao piezômetro nº 1.

6.3.2. Comparação entre Simulação e Operação Real do SFTD

A fim de se comprovar a adequação do modelo teórico de DI BERNARDO às condições experimentais observadas, bem como verificar sua aplicabilidade ao método de levantamento de dados investigado na presente pesquisa, procedeu-se a uma comparação entre os resultados das simulações referidas na segunda etapa e os dados registrados durante a operação do SFTD piloto. Tal comparação diz respeito aos valores das taxas de filtração e dos níveis de operação, uma vez que o modelo teórico em questão não prevê o tempo de duração das carreiras ou a eficiência do sistema na retenção de partículas.

Assim, considerando-se os valores médios relativos aos ciclos previamente selecionados na terceira etapa, obtém-se uma primeira comparação, apresentada no Quadro 6.2. Neste, os dados teóricos provêm do Apêndice "D", enquanto as taxas e os níveis experimentais originam-se, respectivamente, a partir do Apêndice "H" e do item 6.3.1(f).

Quadro 6.2. Primeira comparação entre valores teóricos e experimentais das taxas de filtração e dos níveis de operação do SFTD.

ENSAIO	TIPO DE DADOS	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)					NÍVEIS DE OPERAÇÃO (m)		
		Med.	Max.	T2	T3	Min.	N ₁	N ₂	N ₂ - N ₁
1	T	250	354	275	211	160	0,89	1,20	0,31
	E	250	361	283	208	148	0,91	1,20	0,29
	V(%)	-	(2,0)	(2,9)	(1,4)	(7,5)	(2,2)	-	(6,5)
2	T	350	437	375	319	269	1,32	1,61	0,29
	E	350	449	389	319	245	1,34	1,61	0,27
	V(%)	-	(2,7)	(3,7)	(0,0)	(8,9)	(1,5)	-	(6,9)
3	T	297	407	325	257	201	1,23	1,61	0,38
	E	297	415	336	256	181	1,27	1,61	0,34
	V(%)	-	(2,0)	(3,4)	(0,4)	(10,0)	(3,3)	-	(10,5)

T = dados teóricos.

E = dados experimentais.

$$V = \text{variação percentual} = \left| \frac{(T - E) \times 100}{T} \right|$$

Analisando-se o quadro comparativo apresentado, observa-se um bom ajuste entre os valores resultantes da simulação e da operação real do SFTD. Em termos percentuais, as diferenças mais significativas ocorreram em relação às taxas mínimas de filtração e às variações de nível entre N₁ e N₂. Já as taxas máximas e as intermediárias (sobretudo a T3), bem como os valores de N₁, apresentaram diferenças muito pequenas, compreendidas numa faixa entre + 1,4 e - 3,7 %.

Apesar deste resultado positivo, foi feita uma segunda comparação entre os valores teóricos e experimentais, levando-se em conta uma nova seleção dos dados obtidos na terceira etapa. Esta seleção, mais restritiva que a descrita no item 6.3.1(d), incluiu apenas os ciclos que, além da condição de estabilidade, apresentaram valores de N_1 próximos aos calculados teoricamente para cada ensaio. A diferença máxima considerada foi de 2 cm, de tal modo que os ciclos selecionados tiveram, nos respectivos ensaios, níveis mínimos de operação aproximadamente iguais. Tal critério diminuiu sensivelmente os desvios relativos às diferenças de nível $N_2 - N_1$, apresentados e comentados no item 6.3.1(f), reduzindo também a dispersão dos dados referentes aos tempos de duração dos ciclos, discutidos em 6.3.1(g).

Essa segunda seleção passou, deste modo, a levar em conta apenas os dados referentes aos seguintes ciclos:

. Ensaio 1 (12 ciclos): 17, 26, 33, 35, 38, 42, 43, 47, 48, 52, 53 e 54.

. Ensaio 2 (6 ciclos) : 9, 10, 12, 16, 18 e 20.

. Ensaio 3 (6 ciclos) : 4, 5, 7, 8, 9 e 12.

Como consequência, um novo quadro comparativo (Quadro 6.3) foi elaborado, a partir dos valores médios das taxas de filtração e dos níveis operacionais registrados nos ciclos mencionados. Pode-se notar, num paralelo com o Quadro 6.2, que, embora as alterações não pareçam tão significativas, houve uma menor variação entre os resultados teóricos e experimentais.

Quadro 6.3. Segunda comparação entre valores teóricos e experimentais das taxas de filtração e dos níveis de operação do SFTD.

ENSAIO	TIPO DE DADOS	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m ³ /m ² .d)					NÍVEIS DE OPERAÇÃO (m)		
		Med.	Max.	T2	T3	Min.	N ₁	N ₂	N ₂ - N ₁
1	T	250	354	275	211	160	0,89	1,20	0,31
	E	250	357	283	211	148	0,90	1,20	0,30
	V(%)	-	(0,8)	(2,9)	(0,0)	(7,5)	(0,6)	-	(1,6)
2	T	350	437	375	319	269	1,32	1,61	0,29
	E	350	447	387	316	248	1,33	1,61	0,28
	V(%)	-	(2,3)	(3,2)	(0,9)	(7,8)	(0,8)	-	(2,6)
3	T	297	407	325	257	201	1,23	1,61	0,38
	E	297	409	334	258	186	1,23	1,61	0,38
	V(%)	-	(0,5)	(2,8)	(0,4)	(7,5)	(0,0)	-	(0,0)

T = dados teóricos.

E = dados experimentais.

$$V = \text{variação percentual} = \left| \frac{(T-E) \times 100}{T} \right|$$

As duas comparações efetuadas mostram que, com relação às taxas de filtração e aos níveis de operação, o modelo teórico empregado apresentou resultados bastante satisfatórios, simulando muito bem o comportamento daqueles parâmetros. Assim, pôde-se, mais uma vez, comprovar a validade e a utilidade do referido modelo, quando aplicado à operação de um SFTD com características semelhantes às da instalação piloto utilizada. Do mesmo modo, ficou evidente a possibilidade de se empregá-lo como parte integrante do método de levantamento de dados objeto da pesquisa em discussão.

Por outro lado, deve-se destacar que o modelo teórico, como qualquer outro, prevê um comportamento médio a ser esperado, não contemplando a totalidade das variáveis envolvidas. Deste modo, as comparações apresentadas referem-se aos valores médios observados na prática, tendo havido variações ao longo dos diversos ciclos. A seleção dos ciclos foi feita justamente para minimizar a influência de fatores não controláveis e não previstos pela modelação teórica.

Com relação às taxas de filtração e aos níveis d'água registrados por ocasião da lavagem de um dos filtros, não foram feitas comparações entre valores teóricos e experimentais, por dois motivos principais. Em primeiro lugar, os dados práticos tinham uma precisão menor, por não haver tempo suficiente para medições mais acuradas; as vazões, por exemplo, eram obtidas diretamente nos rotâmetros, e não através de medidas volumétricas. Em segundo lugar, os resultados das simulações indicam valores de taxas e níveis que seriam atingidos numa condição de estabilidade durante as lavagens. Estas, na prática, eram encerradas antes que tal condição fosse alcançada, mesmo nos casos em que o tempo de lavagem era propositalmente aumentado de 15 para 30 minutos, inviabilizando as comparações. De qualquer maneira, as mesmas não têm maior significado no contexto da presente pesquisa.

6.3.3. Comparação entre a Operação do SFTD e a do Filtro F5.

As análises do comportamento do filtro independente F5, operado em paralelo com o SFTD experimental, bem como uma comparação entre ambos, devem ser feitas a partir dos quadros do Apêndice "M" e, sobretudo, das figuras do Apêndice "G".

Conforme referido anteriormente, a operação de F5 somente era executada quando o SFTD apresentava uma condição de estabilidade, de modo que um dos filtros da bateria, em funcionamento normal, pudesse ter o seu desempenho acompanhado e comparado ao da unidade independente. Neste sentido, podem ser caracterizadas duas situações, para os diferentes ciclos: numa primeira, tanto F5 quanto o filtro da bateria (na maior parte dos casos, F1) iniciavam uma carreira, estando recém-lavados; na outra, ambos já haviam trabalhado no ciclo anterior, dando prosseguimento às suas respectivas carreiras, enquanto outra unidade era lavada. O comportamento de F5 em relação ao SFTD apresentou diferenças de acordo com cada uma destas situações.

Assim, com respeito à evolução da perda de carga total com o tempo, pode-se notar que o filtro F5 apresentou um desempenho praticamente i-

igual ao do SFTD, em todos os ciclos correspondentes à primeira daquelas situações. Tais ciclos, que aparecem assinalados com o símbolo * nas figuras do Apêndice "G", foram, no Ensaio 1, os de nº 30, 34, 38, 42, 46, 50 e 54; no Ensaio 2, 14 e 18; e, no último ensaio, 10, 12, 15, 16 e 20. Em todos eles, a taxa de crescimento da perda de carga com o tempo foi a mesma para o filtro independente e o SFTD. Como, nestes casos, procurava-se manter em F5 um valor igual ao da taxa máxima de filtração registrada simultaneamente no filtro do SFTD, chega-se a uma importante constatação. Qual seja, a de que o aumento da perda de carga total durante os ciclos de um SFTD é equivalente ao de um único filtro que, recém-lavado, seja operado com uma taxa de filtração igual à taxa máxima observada naquele sistema. Desta forma, foi comprovada a hipótese, apresentada no item 4.1.1(e), sobre a qual se baseia o método de levantamento de dados aqui investigado.

Embora bastante lógica, podendo parecer até mesmo óbvia, tal constatação contraria algumas informações contidas na literatura. Os experimentos apresentados por DI BERNARDO & CLEASBY (1980) e HILMOE & CLEASBY (1986) concluíram que a equivalência referida aconteceria em relação a um filtro operando com a taxa média do SFTD, e não com a máxima. Esta observação levou a critérios de projeto apresentados por CLEASBY (1981, 1989), não tendo sido questionada até o momento. Na presente pesquisa, entretanto, tais conclusões não se sustentaram, não só a partir da comparação com o filtro F5, mas também observando-se o primeiro ciclo de cada um dos ensaios. Em tais ciclos, as taxas nos quatro filtros da bateria eram iguais à taxa média de filtração, como se fossem quatro filtros independentes. Comparando-se a variação da perda de carga nessas ocasiões, com as registradas posteriormente nos ciclos estáveis, nota-se claramente, através da inclinação das respectivas curvas nas figuras do Apêndice "G", um incremento das taxas de crescimento da perda de carga com o tempo. Se tais taxas fossem as mesmas no SFTD e num filtro trabalhando com a taxa média de filtração, a inclinação no ciclo inicial deveria manter-se ao longo de toda a operação do sistema, o que não ocorreu. Infelizmente, nas pesquisas mencionadas não foram apresentados os dados relativos aos ciclos iniciais, de modo a que a mesma comparação pudesse ser feita. De qualquer maneira, os resultados do presente experimento e considerações de ordem teórica tornam as conclusões anteriores a respeito da variação das perdas de carga totais com o tempo, num SFTD, bastante contestáveis.

Ainda com relação à comparação entre F5 e o SFTD, pode-se observar, nos ciclos caracterizados pela ocorrência da segunda situação, dentre as duas apresentadas no início deste item, uma certa variabilidade de comportamento. Assim, apesar de em alguns casos ocorrer uma semelhança entre o desempenho de ambos, em muitos outros o filtro independente mostrou uma tendência a registrar perdas de carga menores que as do SFTD, com as diferenças aumentando no decorrer dos ciclos. Um dos principais fatores responsáveis por tal fato parece ter sido a paralisação de F5 no momento das operações de lavagem, enquanto o filtro da bateria continuava em funcionamento, recebendo, inclusive, uma vazão maior. Deste modo, as condições dos filtros operados em paralelo passavam a ser diferentes no início dos ciclos seguin-



tes, alterando o comportamento relativo dos mesmos. Este tipo de influência apresentava um efeito cumulativo ao longo das carreiras de filtração, tornando as diferenças mais significativas à medida em que as unidades iam se sujando. Note-se, por outro lado, que, nos ciclos em que eram simuladas lavagens numa bateria hipotética em que F5 estaria incluído, tais diferenças eram minimizadas. Nestes casos, indicados com o sinal (*) no Apêndice "G", não só o filtro independente permanecia em funcionamento durante a lavagem, como tinha sua vazão aumentada, de acordo com o que ocorria simultaneamente no SFTD, resultando numa maior igualdade entre as variações das perdas de carga observadas nos ciclos subseqüentes.

De qualquer forma, as comparações feitas sob as condições descritas no parágrafo anterior não exerceram maiores influências sobre o desenvolvimento e as conclusões da pesquisa. Já as comparações apresentadas antes, refletindo condições operacionais mais favoráveis, em que F5 e o SFTD estavam em início de carreira, foram extremamente significativas em termos de se atingir o principal objetivo do presente estudo, conforme será visto a seguir.

6.3.4. Verificação do Método de Levantamento de Dados Proposto.

Apesar da operação simultânea do filtro com taxa constante e da bateria com taxa declinante ter confirmado a hipótese básica do método de levantamento de dados aqui investigado, sua verificação efetiva dar-se-á com a aplicação do mesmo aos resultados obtidos nas diversas etapas da pesquisa. Tal verificação consiste, fundamentalmente, numa comparação entre os tempos de duração dos ciclos, previstos a partir das duas primeiras fases, com aqueles registrados durante a investigação experimental da última etapa.

Antes da aplicação do método propriamente, uma primeira comparação pode ser efetuada, relacionando os coeficientes de variação da perda de carga no tempo (parâmetro \underline{a}) obtidos na primeira e na terceira etapas. Calculando-se tais coeficientes para os três ensaios realizados com taxas declinantes, empregando-se a equação (6.6) e levando-se em conta apenas os ciclos selecionados no item 6.3.2, chega-se aos valores apresentados no Quadro 6.4, que inclui também os dados de perda de carga inicial (H_0) e final (H), taxa de filtração (v), turbidez média do afluente (C_0) e tempo de duração do ciclo (t), utilizados no cálculo de \underline{a} .

A partir dos dados calculados para os diversos ciclos, obtém-se o valor médio de \underline{a} para cada um dos ensaios da terceira etapa:

$$\text{Ensaio 1: } a = (4,5 \pm 0,8) \times 10^{-5} \text{ d/h.U.T}$$

$$\text{Ensaio 2: } a = (4,3 \pm 0,7) \times 10^{-5} \text{ d/h.U.T}$$

$$\text{Ensaio 3: } a = (4,7 \pm 0,7) \times 10^{-5} \text{ d/h.U.T}$$

Embora apresentando uma dispersão relativamente maior em relação à média, os valores de \underline{a} calculados na terceira etapa estão bastante próximos do obtido na fase inicial da pesquisa, e mostrado no item 6.1.2, relativo à operação com os turbidímetros de escoamento contínuo. Várias das obser

Quadro 6.4. Determinação do coeficiente a para os ensaios da terceira etapa.

ENSAIO	CICLO	PERDA DE CARGA (m)		v (m ³ /m ² .d)	C ₀ (UT)	t (horas)	a (x10 ⁵) (d/h.UT)
		Inicial	Final				
1	17	0,895	1,200	354	1,84	11,00	4,3
	26	0,880	1,200	360	2,21	9,75	4,1
	33	0,905	1,200	360	1,97	11,00	3,8
	35	0,905	1,200	360	2,87	10,50	2,7
	38	0,905	1,200	360	1,68	11,25	4,3
	42	0,895	1,200	358	1,68	12,50	4,1
	43	0,895	1,200	350	1,40	11,50	5,4
	47	0,890	1,200	354	1,42	12,50	4,9
	48	0,900	1,200	359	1,84	11,00	4,1
	52	0,890	1,180	358	1,50	11,00	4,9
	53	0,890	1,200	361	1,31	11,00	6,0
54	0,890	1,200	356	1,49	12,00	4,9	
2	9	1,330	1,625	454	2,14	8,00	3,8
	10	1,335	1,670	460	2,51	8,00	3,6
	12	1,320	1,600	441	2,25	7,50	3,8
	16	1,320	1,600	441	1,73	8,00	4,6
	18	1,320	1,600	446	2,29	6,50	4,2
	20	1,340	1,605	441	1,44	7,50	5,6
3	4	1,245	1,600	417	1,81	10,25	4,6
	5	1,240	1,605	414	1,95	8,75	5,2
	7	1,215	1,600	407	1,73	9,25	5,9
	8	1,210	1,605	402	2,34	11,25	3,7
	9	1,235	1,605	399	1,90	11,00	4,4
	12	1,250	1,650	413	2,21	9,50	4,6

vações feitas naquele ítem a respeito da variabilidade do parâmetro a aplicam-se aos resultados da terceira etapa, sobretudo as que dizem respeito ao fato da turbidez não ser o indicador ideal da quantidade de partículas que têm acesso aos filtros. Não obstante, uma análise estatística mais rigorosa mostrou que, a um nível de significância de 5%, as médias calculadas a partir da operação do SFTD não diferem entre si, nem em relação ao valor médio resultante da operação com taxa constante (ver Apêndice "N").

Uma vez que os valores de a foram calculados, na última etapa, utilizando-se as taxas máximas de filtração registradas ao longo de cada um dos ciclos em questão, os resultados obtidos reforçam a constatação feita após o paralelo traçado entre o filtro F5 e o SFTD. Qual seja, a de que a variação da perda de carga com o tempo (refletida pelo parâmetro a) é condicionada pela taxa máxima e não pela taxa média, naquele sistema. Os resultados demonstraram, além disto, que o coeficiente a , apesar de algumas limitações, reflete, da forma como foi calculado, o comportamento observado nos filtros, sendo útil para efeito de comparações.

Após todas essas considerações e constatações, pode-se proceder à verificação final do método de levantamento de dados, fazendo-se sua aplicação através da determinação das durações dos ciclos do SFTD. Como o referido método inclui a utilização do modelo teórico de Di Bernardo, outros parâmetros, como as taxas de filtração e os níveis de operação, também são determinados. A comparação entre os valores teóricos e práticos destes últimos já tendo sido feita, resta a confirmação de que os tempos previstos para a duração dos ciclos foram observados na instalação experimental.

De acordo com o método proposto, tais previsões devem ser realizadas a partir de dados levantados na operação de um filtro com taxa constante, o que, na presente pesquisa, aconteceu durante a primeira etapa. Tais dados resultaram na determinação do parâmetro a , que seria característico da unidade filtrante em operação, tanto para a taxa constante, quanto para a declinante. Além disto, são obtidas as equações de perda de carga, utilizadas na simulação teórica do SFTD, dando origem aos valores da taxa máxima de filtração e dos níveis de operação. Todos os parâmetros citados (a , $v_{max.}$, H e H_0) são obtidos sem a necessidade de uma instalação piloto funcionando com taxa declinante. No presente caso, entretanto, para efeito de comparação, a correção devida à quantidade de partículas no afluente deve ser feita a partir dos valores de C_0 registrados na etapa final, no SFTD experimental.

Assim, empregando-se a equação (6.6), são calculados os tempos de duração previstos para os ciclos do SFTD. No Quadro 6.5 os valores resultantes são apresentados, ao lado dos dados utilizados nos respectivos cálculos e dos valores experimentais obtidos. Deve-se ressaltar que estes últimos, assim como os relativos a C_0 , correspondem à média dos valores mostrados nas respectivas colunas do Quadro 6.4. O valor de a , por sua vez, é aquele apresentado no item 6.1.2, enquanto H , H_0 e $v_{max.}$ provêm dos resultados das simulações, podendo ser vistos no Apêndice "D" ou no Quadro 6.3.

Quadro 6.5. Comparação entre os tempos teóricos e experimentais de duração dos ciclos do SFTD.

ENSAIO	a (d/h.UT)	H (m)	H ₀ (m)	v _{max.} (m ³ /m ² .d)	C ₀ (UT)	TEMPOS (horas)		V (%)
						T	E	
1	4,3 x 10 ⁻⁵	1,20	0,89	354	1,77	11,51	11,25	2,22
2	" "	1,61	1,32	437	2,06	7,49	7,58	1,18
3	" "	1,61	1,23	407	1,99	10,91	10,00	8,35

T = valor teórico.

E = valor experimental

$$V = \text{variação percentual} = \left| \frac{(T - E) \times 100}{T} \right|$$

Comparando-se os tempos teóricos e experimentais, confirmam-se os bons resultados obtidos com a aplicação do método de levantamento de dados proposto. As diferenças foram pequenas, e em apenas um dos casos aproximou-se de 10%, valor que ainda é bastante razoável. Nos outros dois ensaios, a variação esteve abaixo de 2,5%.

Com relação aos valores experimentais de duração dos ciclos, as médias apresentadas mostraram a seguinte dispersão:

- . Ensaio 1 : (11,25 ± 0,80) horas. (c.v.= 7 %)
- . Ensaio 2 : (7,58 ± 0,59) horas. (c.v.= 8 %)
- . Ensaio 3 : (10,00 ± 1,00) horas. (c.v.= 10 %)

Duas comparações podem ser feitas com relação aos valores obtidos para estes parâmetros antes da seleção descrita no item 6.3.2, e que haviam sido apresentados em 6.3.1(g). A primeira é a de que houve uma redução nas dispersões em torno dos valores médios, e a segunda é a de que estes últimos ficaram mais próximos dos valores teóricos. Como a referida seleção foi feita a partir dos valores registrados para o nível N₁, e não com base nos dados de duração dos ciclos, tais observações, que refletem resultados melhores, indicam o acerto do critério seletivo empregado, com a diminuição dos efeitos decorrentes das variações do nível mínimo de operação.

Cabe ainda uma observação a respeito dos valores da turbidez do afluente, cujas medidas de dispersão foram as seguintes:

- . Ensaio 1 : (1,77 ± 0,44) UT (c.v.= 25 %)
- . Ensaio 2 : (2,06 ± 0,40) UT (c.v.= 19 %)
- . Ensaio 3 : (1,99 ± 0,24) UT (c.v.= 12 %)

Estes dados mostram que, conforme afirmado anteriormente, a turbidez é o parâmetro que pode ser a principal causa de desvios durante a aplicação do método. Não obstante, pelo seu largo emprego e pela facilidade com que é obtida, a turbidez ainda continua sendo o principal indicador da qualidade da água a ser filtrada, sobretudo em termos de partículas suspensas. O seu emprego, entretanto, deve ser feito de forma bastante controlada, sob condições relativamente estáveis, principalmente quando do levantamento de dados em instalações pilotos. A sua substituição por parâmetros mais apropriados (sólidos totais e suspensos, contagem de partículas) deve ser investigada e adotada, sempre que possível.

Deve-se também notar que, na equação (6.6), foi considerada somente a condição de entrada no filtro, em termos de qualidade da água. Isto se justifica, na medida em que, na maioria dos filtros, a quantidade de partículas na saída é realmente bem menor. Em alguns casos, entretanto, tal valor pode se tornar significativo, devendo-se incluir o parâmetro correspondente na referida equação. Esta deverá refletir, assim, a quantidade de partículas retidas no meio filtrante.

6.3.5. Descrição Final do Método Proposto

Comprovada a validade do método de levantamento de dados investigado na presente pesquisa, pode-se fazer uma descrição final do mesmo, considerando a seguinte sequência de passos:

1º passo: definição das características básicas do meio filtrante (materiais, granulometria, altura da camada), da disposição das unidades (dimensões, número, sistema de drenagem, tubulações e acessórios, tipo de lavagem) e do pré-tratamento (tipo, produtos químicos, dosagens).

2º passo: montagem de um filtro piloto para trabalhar com taxa de filtração constante e nível variável, tendo o meio filtrante idêntico ao de finido no passo anterior.

3º passo: obtenção, na instalação piloto, da curva de variação da perda de carga no meio filtrante limpo em função das taxas de filtração.

4º passo: cálculo teórico da equação de perda de carga turbulenta em função das taxas de filtração (caso seja possível a reprodução das características geométricas do filtro na instalação piloto, pode-se obter a curva $h_t \times v$ a partir da mesma).

5º passo: aplicação do modelo teórico de Di Bernardo, considerando as curvas obtidas nos passos anteriores e os valores definidos para a taxa média de filtração, o número de filtros e a carga hidráulica máxima, obtendo-se os níveis de operação e as taxas nas unidades do SFTD.

6º passo: operação da instalação piloto com taxa constante, mantida igual à taxa máxima calculada, no passo anterior, para o SFTD; ou então, operação com diversas taxas de filtração constantes, calculando-se, em seguida, o coeficiente de variação de perda de carga com o tempo (a).

7º passo: previsão dos tempos de duração dos ciclos do SFTD, seja por observação direta no filtro piloto (operação com taxa igual à máxima do SFTD), seja através do coeficiente a (operação com diversas taxas); pode-se prever a duração dos ciclos para diferentes condições do afluente (quantidade de sólidos, dosagens de produtos químicos, temperatura), cobrindo-se toda a faixa de variação esperada na situação real.

Caso os tempos obtidos não sejam adequados (ciclos muito curtos, ou muito longos), as características do sistema poderão ser convenientemente alteradas, de modo a resultar valores mais apropriados. Tais alterações, portanto, podem ser feitas ainda durante a etapa de projeto, otimizando-o. Da mesma forma, a operação do SFTD poderá ser grandemente beneficiada, a partir do conhecimento prévio da duração das carreiras de filtração, sob diferentes condições.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir das considerações teóricas e dos resultados experimentais obtidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foram estabelecidas as seguintes conclusões, relacionadas segundo o aspecto particular a que se referem:

a. Com relação, especificamente, ao comportamento do SFTD:

a.1. A instalação experimental trabalhando com taxa declinante variável apresentou um padrão de comportamento típico de tais sistemas, com as taxas de filtração mantendo-se aproximadamente constantes em cada ciclo, variando na forma de degraus e apresentando picos por ocasião da lavagem de um dos filtros; as lâminas d'água acima do meio filtrante variaram continuamente, caracterizando os diversos níveis de operação; e a qualidade do efluente não mostrou qualquer tendência à ocorrência do traspasse final.

a.2. Foram registradas pequenas, porém sistemáticas, variações das taxas de filtração durante cada ciclo de operação, com o aumento das taxas maiores e a redução das menores, podendo-se atribuir tais ocorrências à colmatação superficial do meio filtrante, em decorrência de uma penetração pouco profunda das partículas retidas no mesmo.

a.3. Eventuais perturbações na operação ocorridas durante determinado ciclo refletiam-se, a partir de uma certa magnitude, no comportamento dos ciclos subsequentes, com alterações nas taxas de filtração das diversas unidades; uma condição de normalidade era novamente atingida, em geral, após cada um dos filtros ter sido lavado.

a.4. A melhor condição de início de operação foi obtida quando os ciclos iniciais tiveram sua duração aproximadamente igual à dos ciclos com operação estável, com tal situação sendo atingida mais rapidamente; de qualquer modo, a estabilidade foi sempre atingida antes que cada um dos filtros fosse lavado pela terceira vez, após o início da operação do sistema.

a.5. Os picos de vazão e nível de operação durante as lavagens foram bastante significativos, ocorrendo de maneira bastante rápida, o que pode ser associado à ausência de armazenamento de água a montante dos filtros da instalação piloto.

b. Quanto à simulação teórica do desempenho de um SFTD, os resultados da aplicação do modelo de Di Bernardo ficaram muito próximos dos valores obtidos experimentalmente, tanto para as taxas de filtração, quanto para os níveis de operação, comprovando-se a aplicabilidade do mesmo na de terminação dos referidos parâmetros, em sistemas semelhantes.

c. Com referência ao coeficiente de variação da perda de carga com o tempo, a, pode-se considerar que sua obtenção por meio de uma equação do tipo $H = H_0 + a.C_0.v.t$ levou a resultados razoáveis, principalmente quando não ocorriam diferenças significativas em C_0 . Este, medido em termos de turbidez, mostrou ser o parâmetro mais sujeito a imprecisões quando do cálculo de a através daquela equação.

d. A respeito da operação simultânea do SFTD e do filtro trabalhando com taxa constante e nível variável:

d.1. Os dois sistemas, com meios filtrantes idênticos, apresentaram evoluções semelhantes das perdas de carga totais, quando o filtro independente era operado com uma taxa de filtração correspondente à da unidade do SFTD com o mesmo grau de colmatação; ou seja, a variação do nível d'água num filtro tendo a vazão fixada externamente é a mesma de uma unidade similar, cuja vazão resulta da operação com taxa declinante variável.

d.2. A variação do nível d'água $(N_2 - N_1)$ durante cada um dos ciclos de um SFTD é equivalente ao de um único filtro que, recém-lavado, seja operado com a mesma taxa de filtração registrada na unidade mais limpa daquele sistema; deste modo, a curva de variação do nível de operação num SFTD é paralela à de um filtro com taxa constante igual à taxa máxima daquele sistema, e não à taxa média, conforme apresentado em trabalhos anteriores (CLEASBY, 1981, 1989; DI BERNARDO & CLEASBY, 1980; HILMOE & CLEASBY, 1986).

e. Por fim, como principal conclusão da pesquisa, verificou-se a possibilidade da obtenção da duração dos ciclos de um SFTD, a partir da operação de um filtro piloto trabalhando com taxa constante, comprovando-se o método de levantamento de dados inicialmente proposto.

Recomenda-se, portanto, que o referido método seja empregado para o estabelecimento dos parâmetros necessários ao projeto e à operação de sistemas de filtração com taxa declinante variável, facilitando muito tais atividades e contribuindo para uma generalização do uso desses sistemas. A través da utilização de uma instalação piloto bastante simples e de um modelo teórico racional, poderão ser obtidos, seguindo-se a metodologia descrita no item 6.3.5, os principais dados relativos a um SFTD que se queira implantar.

Além desta recomendação de caráter geral, a pesquisa desenvolvida permite que sejam feitas outras mais específicas. Em termos da operação de um SFTD, por exemplo, seria interessante adotar nos ciclos iniciais, cuja duração é fixada arbitrariamente, valores próximos aos previstos para os intervalos entre lavagens na operação estável, fazendo com que esta situação seja alcançada de forma mais rápida.

Com relação a futuras pesquisas, sugere-se que seja investigada, de maneira mais profunda, a determinação do coeficiente de variação da perda de carga com o tempo (a), identificando-se os diversos fatores que têm influência sobre o mesmo, bem como a melhor forma de se calculá-lo e os limites de sua validade. Em particular, deve-se procurar estudar qual seria a maneira mais adequada de se quantificar o parâmetro C_0 , de modo a que o mesmo apresente uma resposta mais linear do que a medição em termos de turbidez.

Quanto a pesquisas a respeito da filtração com taxa declinante, recomenda-se a investigação, a nível experimental, dos efeitos decorrentes de diferentes graus de armazenamento de água a montante dos filtros, assim como a comparação entre o desempenho de sistemas apresentando meios filtrantes com diferentes ações de profundidade.

A partir da experiência obtida durante a análise dos resultados experimentais da presente pesquisa, recomenda-se, finalmente, que a temperatura da água seja um parâmetro monitorado de forma sistemática em qualquer ensaio ou investigação prática sobre a filtração.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Filtration Committee. Committee report: comparison of alternative systems for controlling flow through filters. Journal AWWA , Denver, v. 76 , n. 1 , p. 91-95, Jan. 1984.
2. AMIRTHARAJAH, A. Design of granular-media filter units. In: SANKS, R.L. (Ed.). Water treatment plant design for the practicing engineer. Ann Arbor : Ann Arbor Science, 1979.
3. ARBOLEDA, J. Hydraulic control systems of constant and declining flow rate in filtration. Journal AWWA , Denver, v. 66 , n. 2, p. 87-94, Feb. 1974.
4. ARBOLEDA, J., GIRALDO, R. & SNEL, H. Hydraulic behavior of declining-rate filtration. Journal AWWA , Denver, v. 77, n. 12, p. 67-74, Dec. 1985.
5. AULTMAN, W.W. Valve-operating devices and rate-of-flow controllers. Journal AWWA , Denver, v. 51, n. 11, p. 1467-1469, Nov. 1959.
6. BAYLIS, J.R. Surges in the flow of water through filters. Pure Water , Chicago, v. 10, n. 5. p. 77-97, May 1958.
7. _____. Variable rate filtration. Pure Water , Chicago, v. 11., n. 5 , p. 86-114 , May 1959.
8. BRYANT, E.A. Variable rate filtration - principles, design and operation. Water & Sewage Works , Chicago, v. 121, n. 12, p. 40-44, Dec. 1974.
9. CHAUDHRY, F.H. Theory of declining rate filtration. I: Continuous operation. Journal of Environmental Engineering, ASCE, New York, v. 113, n. 4, p. 834-851, Aug. 1987a.
10. _____. Theory of declining rate filtration. II: Bank operation . Journal of Environmental Engineering, ASCE, New York, v. 113, n. 4, p. 852-867, Aug. 1987b.

11. CLEASBY, J.L. Filter rate control without rate controllers. Journal AWWA, Denver, v. 61, n. 4, p. 181-185, Apr. 1969.
12. _____. New ideas in filter control systems. In: SYMPOSIUM ON NEW METHODS OF WATER TREATMENT, 1972, Asuncion. Anais ... Asuncion: CEPIS/OPS/OMS, 1972a.
13. _____. Case history V: variable declining rate filtration. In: SYMPOSIUM ON NEW METHODS OF WATER TREATMENT, 1972, Asuncion. A - nais ... Asuncion: CEPIS/OPS/OMS, 1972b.
14. _____. Declining-rate filtration. Journal AWWA, Denver, v. 73, n. 9, p. 484-489, Sep. 1981.
15. _____. Declining rate filtration. Fluid/Particle Separation Journal, v. 2, n. 1, p. 1-4, Mar. 1989.
16. CLEASBY, J.L. & BAUMANN, E.R. Selection of sand filtration rates. Journal AWWA, Denver, v. 54, n. 5, p. 579-602, May 1962.
17. CLEASBY, J.L. & DI BERNARDO, L. Hydraulic considerations in declining-rate filtration. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, N. York, v. 106, n. EE6, p. 1043-1055, Dec. 1980.
18. CLEASBY, J.L., WILLIAMSON, M.M. & BAUMANN, E.R. Effect of filtration rate changes on quality. Journal AWWA, Denver, v. 55, n. 7, p. 869-877, July 1963.
19. CORNWELL, D.A., BISHOP, M.M. & DUNN, H.J. Declining-rate filters: regulatory aspects and operating results. Journal AWWA, Denver, v. 76, n. 12, p. 55-61, Dec. 1984.
20. DI BERNARDO, L. Características hidráulicas dos métodos de operação dos filtros rápidos de gravidade. Revista DAE, São Paulo, v. 43, n. 135, p. 30-36, dez. 1983.
21. _____. Proposição de um modelo matemático para projeto de sistemas de filtração com taxa declinante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 13º, Maceió. Anais ... Maceió: ABES, 1985.
22. _____. A rational method to the design of declining-rate filters. In: WORLD FILTRATION CONGRESS, 4th., 1986, Ostend. Anais ... Ostend: 1986a.
23. _____. Hidráulica da filtração com taxa declinante. Revista DAE, São Paulo, v. 46, n. 146, p. 259-267, set. 1986b.
24. DI BERNARDO, L. & CLEASBY, J.L. Declining-rate versus constant rate filtration. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, New York, v. 106, n. EE6, p. 1023-1041, Dec. 1980.
25. GRABOVSKII, P.A. & LARKINA, G.M. Operation of high-rate filters under variable conditions. Soviet Journal of Water Chemistry and Technology (english translation of *Khimiya i Tekhnologiya Vody*), New York, v. 6, n. 6, p. 89-94, 1984.

26. HILMOE, D.J. & CLEASBY, J.L. Comparing constant-rate and declining rate direct filtration of a surface water. Journal AWWA, Denver, v. 78, n. 12, p. 26-34, Dec. 1986.
27. HUDSON Jr., H.E. Factors affecting filtration rates. Journal AWWA, Denver, v. 48, n. 9, p. 1138-1154, Sep. 1956.
28. _____. Declining-rate filtration. Journal AWWA, Denver, v. 51, n. 11, p. 1455-1463, Nov. 1959.
29. _____. Functional design of rapid sand filters. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, New York, v. 89, n. SA1, p. 17-28, Jan. 1963.
30. _____. Water clarification processes: practical design and evaluation. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981. 353 p.
31. HUDSON Jr., H.E. & HAZEY, G. Simplified rapid sand filter system. Water & Sewage Works, Chicago, v. 106, n. 10, p. 448-451, Oct. 1959.
32. IVES, K.J. Simplified rational analysis of filter behaviour. Proc. Instn. Civ. Engrs., London, v. 25, p. 345-364, Jul. 1963.
33. JACKSON, N.E. Study of high-rate filtration at the Dalecarlia Plant, Washington. Journal AWWA, Denver, v. 47, n.2, p. 129-141, Feb. 1955.
34. JENKS, H.N. Filter operation at variable rates. Journal AWWA, Denver, v. 20, n. 8, p. 214-219, Aug. 1928.
35. LIMA, A.F. Projeto de filtros de taxas declinantes. Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 111-115, jan./mar. 1985.
36. LING, J.T. Progress in technology of water filtration. Water & Sewage Works, Chicago, v. 109, n. 8, p. 315-319, Aug. 1962.
37. OKUN, D.A. & SCHULZ, C.R. Practical water treatment for communities in developing countries. Aqua, London, v. 1, n. 1, p. 23-26, 1983.
38. ROGERS, M.E. Effect of control systems on filter performance. Journal AWWA, Denver, v. 56, n. 7, p. 907-914, July 1964.
39. SAATÇI, A.M. Harmonic mean conductivity in declining rate filters. Journal of Environmental Engineering, ASCE, New York, v. 115, n. 2, p. 462-466, Apr. 1989.
40. _____. Application of declining rate filtration theory - continuous operation. Journal of Environmental Engineering, ASCE, New York, v. 116, n. 1, p. 87-105, Feb. 1990.
41. SEGALL, B.A. & OKUN, D.A. Effect of filtration rate on filtrate quality. Journal AWWA, Denver, v. 58, n. 3, p. 368-378, Mar. 1966.

42. TUEPKER, J.L. Filter performance under varying operating conditions. In: CONFERENCE ON WATER FILTRATION, 1965, Rolla. Proceedings ... Rolla: Univ. of Missouri at Rolla, 1965.
43. YAROSHEVSKAYA, N.V. & KUL'SKII, L.A. Methods of designing filter systems operating with a decreasing flow rate. Soviet Journal of Water Chemistry and Technology (english translation of Khimiya i Tekhnologiya Vody) , New York, v. 7, n. 2, p. 1-5, 1985.

APÊNDICES

A P Ê N D I C E " A "

- Quadros Com os Dados de Perda de Carga e Turbidez dos Ensaios da Primeira Etapa.

QUADRO A.1

ENSAIO nº : 1		TAXA: 300 m ³ /m ² .d								FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,2	129,3	133	137	141,5	146	152,5	154,5	2,7	0,73	
1	126,2	129,4	133,2	137,3	141,8	146,5	154	157,5	2,7	0,28	
4,5	126,2	129,4	133,2	137,3	142,2	147,2	157,2	165	2,1	0,21	
8	126,2	129,4	133,6	138,1	143,1	148,6	161,3	173	3,0	0,22	
12	126,2	129,4	133,6	138,1	143,1	148,8	163,3	178,2	2,4	0,19	
15	126,2	129,4	133,3	137,7	142,7	148,4	165	184	3,3	0,20	
22	126,2	129,4	133,4	137,8	143,1	149,3	171,1	196	2,1	0,15	
28,5	126,2	129,4	133,4	137,8	142,8	148,9	176,5	209,5	2,6	0,18	
36	126,1	129,3	133,3	137,8	143,2	150	186	228	1,7	0,32	
44	126,1	129,4	133,5	138,3	144	152	198	253	1,6	0,18	
52	126,1	129,4	133,6	138,4	144,4	153,3	209	277	1,7	0,17	
60	126,1	129,4	133,7	138,6	145	155	225	314	2,0	0,19	
Médias									2,16	0,19	

QUADRO A.2

ENSAIO nº : 2		TAXA: 500 m ³ /m ² .d								FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	127	133,5	141	148,5	156	-	174,5	176,5	2,7	0,41	
1	127	133,6	141,2	149,2	157,1	166,4	178,5	183	2,7	0,26	
2	127	133,6	141,3	149,3	157,4	166,9	180,3	187	2,5	0,22	
4,5	127	133,6	141,3	149,3	157,7	167,7	183,5	193,5	2,1	0,25	
8	127	133,8	142	150,3	159,4	170,4	190,6	205,3	3,0	0,26	
12	127	133,9	142,1	150,4	159,7	171,3	194,6	213,5	2,4	0,22	
15	127	133,9	142,1	150,7	160,1	172,3	200	223	3,3	0,30	
22	127	134	142,4	151,4	161,1	175,2	209,4	239,7	2,1	0,24	
25	127	134,2	142,7	151,7	161,6	176,2	214	248	2,0	0,19	
28,5	127	133,8	142,5	151,2	160,9	176	220,2	262	2,6	0,32	
32	127	134,1	142,6	151,7	162	179,4	230	277,3	1,4	0,30	
36	127	134,3	143	152,3	163,2	182,2	238	292,5	1,7	0,36	
44	127	134,6	143,7	153,6	166	189,3	257,2	328	1,6	0,38	
Médias									2,25	0,29	

QUADRO A.3

ENSAIO nº : 3		TAXA: 600 m ³ /m ² .d								FILTRO : 1	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	127,3	133,2	142,3	152,2	162	173	186,3	190	2,0	0,27	
1	127,3	133,3	142,6	152,5	162,8	174	188,5	193,5	2,0	0,25	
4,5	127,3	133,3	142,7	153	163,7	176	195,5	204	1,7	0,20	
8	127,3	133,4	143	153,6	165	178,7	202,5	215	3,5	0,41	
12	127,3	133,6	143,5	154,6	166,5	181	210	228	2,7	0,30	
20,5	127,3	133,7	144	155,8	169	190	247	289	6,0	0,39	
24	127,3	134	144,6	157	171,3	195,6	263,5	313	2,0	0,42	
26	127,3	134	144,6	157	171,5	197	267,5	322	2,2	0,54	
Médias									2,33	0,34	

QUADRO A.4

ENSAIO nº : 4		TAXA: 550 m ³ /m ² .d								FILTRO : 2	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	127,3	134,2	143,2	152,3	161,6	171,7	183,8	187	2,0	0,24	
1	127,3	134,2	143,2	152,3	161,6	172	185,5	190	2,0	0,24	
4,5	127,3	134,2	143,2	152,4	162,4	173,7	191,8	199	1,7	0,28	
8	127,3	134,5	143,9	153,8	164	177	199,7	209	3,5	0,46	
12	127,3	134,5	143,9	154	165	178,5	205,7	218,5	2,7	0,23	
20,5	127,3	134,8	144,9	155,8	168,1	187	238	265	6,0	0,30	
24	127,3	135	145,2	156,4	169,3	191,5	253,7	283	2,0	0,50	
30	127,3	135	145,5	156,8	170,6	196,4	268,5	307,5	2,0	0,43	
34	127,3	135,2	145,8	157,5	172	200,2	280	325	2,0	0,43	
Médias									2,26	0,35	

QUADRO A.5

ENSAIO nº : 5		TAXA: 450 m ³ /m ² .d								FILTRO : 3	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,4	130,5	136,3	142,8	150	157,7	167,7	169	2,0	0,36	
1	126,4	130,5	136,3	143	150	158	170	173	2,0	0,34	
4,5	126,4	130,5	136,3	143	150,3	158,7	173,8	180,5	1,7	0,30	
8	126,4	130,6	136,5	143,4	150,9	159,7	178	187	3,5	0,51	
12	126,4	130,6	136,7	143,6	151,5	161	183,4	196,8	2,7	0,37	
20,5	126,4	130,6	136,8	144,2	152,8	165	213	247	6,0	0,35	
24	126,4	130,6	137,2	144,8	153,8	167,8	225,3	264	2,0	0,35	
30	126,4	130,9	137,3	145,2	154,6	170	237	282,5	2,0	0,42	
34	126,4	131	137,5	145,5	155,3	172	246,3	298,5	2,0	0,40	
44	126,4	131,2	138	146	156	175	265	335	-	-	
Médias									2,26	0,38	

QUADRO A.6

ENSAIO nº : 6		TAXA: 500 m ³ /m ² .d								FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,8	132,5	140,3	148,4	156,7	165	177	180	2,4	0,58	
2	126,8	132,5	140,3	148,7	157,5	168,2	183	188,5	2,7	0,20	
4	126,8	132,5	140,6	149,2	158,3	169,8	187	196	2,6	0,18	
8	126,8	132,6	140,8	149,8	159,6	172,3	197	212	2,0	0,18	
12	126,8	132,6	141,1	150,3	160,5	174,3	206	228	2,5	0,20	
19	126,8	132,9	141,8	151,5	162,5	178,5	224	260	1,3	0,20	
24	126,8	133	142	151,8	163,3	182	244	298	4,4	0,28	
28	126,8	133	142	152	164	185	261	325	3,6	0,34	
Médias									2,77	0,23	

QUADRO A.7

ENSAIO nº : 7		TAXA: 400 m ³ /m ² .d								FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,5	131,6	137,9	144,3	151	158	166	168	2,4	0,68	
2	126,5	131,6	137,9	144,5	151,7	159,3	169,6	173,5	2,7	0,25	
4	126,5	131,6	138,2	145	152,5	161	174	179	2,6	0,25	
8	126,5	131,7	138,3	145,3	153,3	162,5	180	189	2,0	0,25	
12	126,5	131,8	138,5	145,5	153,7	163,6	185,8	199	2,5	0,17	
19	126,5	131,8	138,6	146	155	166,3	198,6	220	1,3	0,14	
24	126,5	131,8	138,7	146,3	155,6	168,5	214	245	4,4	0,22	
28	126,5	131,8	138,7	146,5	156,1	171	226	261,5	3,6	0,16	
34	126,5	132	139,5	147,5	158	175	239	283	2,1	0,19	
43	126,5	132,5	140,5	149,4	161	182	263	321	2,7	0,19	
Médias									2,70	0,20	

QUADRO A.8

ENSAIO nº : 8		TAXA: 200 m ³ /m ² .d								FILTRO : 3	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	125,3	127,6	130,5	133,3	136,3	139,6	143,5	144,3	2,4	0,75	
2	125,3	127,6	130,5	133,3	136,4	139,8	145,3	147,3	2,7	0,30	
4	125,3	127,6	130,5	133,4	136,5	140	146	148,7	2,6	0,23	
8	125,3	127,6	130,6	133,5	136,7	140,4	148	153,5	2,0	0,28	
12	125,3	127,6	130,6	133,6	136,8	140,7	150,2	158,2	2,5	0,26	
19	125,3	127,6	130,6	133,7	137	141,2	155	167,5	1,3	0,23	
24	125,3	127,6	130,6	133,7	137	141,4	161	179,5	4,4	0,21	
28	125,3	127,6	130,6	133,7	137	141,9	167,2	190	3,6	0,26	
34	125,3	127,6	130,7	133,8	137,2	142,8	172,4	199	2,1	0,20	
43	125,3	127,6	130,7	133,8	137,3	143,5	181,1	214	2,7	0,18	
50	125,3	127,6	130,7	133,8	137,3	144	188	226	2,6	0,18	
58	125,3	127,6	130,7	133,8	137,7	145,2	201	252,5	2,6	0,15	
68	125,3	127,6	130,7	133,9	138,3	147,5	220	286,5	3,1	0,17	
74	125,3	127,6	130,7	133,9	138,3	148,5	228	299	2,7	0,22	
81	125,3	127,6	130,7	134	139	151	247	332	2,5	0,15	
Médias									2,71	0,21	

QUADRO A.9

ENSAIO nº : 10											TAXA: 550 m ³ /m ² .d		FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	127,2	133,6	142,4	151,2	161,1	171,2	183,2	186,5	1,6	0,29				
4	127,2	133,6	142,4	152	162	173,5	192	200	2,4	0,21				
9,5	127,2	133,6	142,7	152,6	163,2	176	202,5	216,5	2,3	0,26				
18	127,2	133,6	143	153	165	180	223,5	252	2,0	0,31				
24	127,2	133,9	143,6	154,3	166,5	185	242	289	2,5	0,55				
30,5	127,2	134	144	155	168	189,5	261	327	1,7	0,43				
Médias									2,18	0,34				

QUADRO A.10

ENSAIO nº : 11											TAXA: 550 m ³ /m ² .d		FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	127,3	135,3	144	152,8	161,8	171,5	182,5	186	1,6	0,24				
4	127,3	135,3	144,2	153,3	163	174	191	198	2,4	0,25				
9,5	127,3	135,4	144,7	154	165	176,5	201	213	2,3	0,26				
18	127,3	135,9	145,6	155,8	167,1	182,5	222,5	248	2,0	0,31				
24	127,3	135,9	145,8	156,2	168	186	237	281	2,5	0,49				
31	127,3	136,1	146,3	157	170	192,3	256	320	1,7	0,38				
Médias									2,18	0,33				

QUADRO A.11

ENSAIO nº : 12		TAXA: 450 m ³ /m ² .d								FILTRO : 3	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,3	130,3	136,2	142,6	150	157,5	167,5	170	1,6	0,32	
4	126,3	130,3	136,2	142,6	150,1	158,3	174	180	2,4	0,22	
9,5	126,3	130,4	136,3	142,9	151,1	160,2	183,2	194	2,3	0,24	
18,5	126,3	130,5	136,7	143,9	152,5	163	202,5	224,5	2,0	0,27	
24	126,3	130,5	136,8	144,1	153	164,6	215	250	2,5	0,31	
31	126,3	130,6	136,9	144,5	154	167,5	233	281,5	1,7	0,32	
36	126,3	130,6	137,1	144,6	154,6	169	244	302,5	1,9	0,35	
Médias									2,12	0,28	

QUADRO A.12

ENSAIO nº : 13		TAXA: 450 m ³ /m ² .d								FILTRO : 4	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,3	131,3	138,1	145,6	153,9	162,6	173,3	176,2	1,6	0,38	
4	126,3	131,3	138,1	145,6	154,1	164	180,5	187	2,4	0,33	
9,5	126,3	131,3	138,3	145,9	154,9	166	189,5	201	2,3	0,15	
18,5	126,3	131,3	138,8	146,9	156,7	170	210	234	2,0	0,23	
24	126,3	131,5	138,9	147,3	157,5	172	224	260	2,5	0,33	
31	126,3	131,5	139,2	148	158,7	176,2	242,5	292	1,7	0,29	
36	126,3	131,5	139,4	148,3	159,4	178,6	254	312	1,9	0,35	
Médias									2,12	0,27	

QUADRO A.13

ENSAIO nº : 14											TAXA: 400 m ³ /m ² .d		FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	126,5	130,5	135,9	141,8	148	154,6	163	165	1,8	0,50				
4	126,5	130,8	136,5	142,9	150	157,5	170,5	177	1,6	0,21				
8	126,5	130,8	136,6	143,1	150,2	158,5	175	185	2,0	0,14				
16	126,5	130,9	137,1	144,1	152	162	191	212,5	2,5	0,17				
20	126,5	131	137,2	144,2	152,3	163	196,5	223,5	2,2	0,18				
24	126,5	130,9	137,1	144,4	152,4	163	201,5	233,5	2,0	0,18				
29	126,5	131	137,2	144,5	153	165	210	251,5	1,6	0,23				
34	126,5	131,1	137,7	145,4	154,4	168	221	275	1,9	0,24				
40	126,5	131,2	138	145,9	155,3	170,5	234	300	1,5	0,18				
Médias									1,94	0,21				

QUADRO A.14

ENSAIO nº : 15											TAXA: 500 m ³ /m ² .d		FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	127	133,5	141,4	149,5	158	166,8	176,5	179	1,8	0,45				
4	127	133,9	141,9	151,1	160,5	171	185,5	191,5	1,6	0,23				
8	127	134,1	142,4	151,5	161,5	172,5	192	200,5	2,0	0,17				
16	127	134,3	143,5	153,3	165	178,5	211	228,5	2,5	0,28				
20	127	134,5	143,7	153,7	166	180,5	219	240,5	2,2	0,30				
24	127	134,5	143,8	153,8	166,5	182	225	250	2,0	0,30				
34	127	134,8	144,5	155,5	168,5	190	250	290,5	1,9	0,28				
40	127	135	145	156,5	170,5	195	264	313,5	1,5	0,24				
Médias									1,94	0,27				

QUADRO A.15

ENSAIO nº : 16											TAXA: 500 m ³ /m ² .d		FILTRO : 3	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	126,6	131,2	138,5	141,1	154	162,6	173,5	175,5	1,8	0,45				
4	126,6	131,3	139	147	155,5	165,5	182	188	1,6	0,21				
8	126,6	131,4	139	147,3	156,1	167	188,5	198	2,0	0,18				
16	126,6	131,6	139,8	148,7	158,4	171,5	209,5	228,5	2,5	0,30				
20	126,6	131,7	140	149	159	173	219	242	2,2	0,31				
24	126,6	131,6	140	149	159	174	225	252,5	2,0	0,30				
34	126,6	131,7	140,4	150	161	180	251	296,5	1,9	0,27				
40	126,6	131,8	140,7	150,8	162,2	184	267,5	323	1,5	0,23				
Médias									1,94	0,27				

QUADRO A.16

ENSAIO nº : 17											TAXA: 400 m ³ /m ² .d		FILTRO : 4	
TEMPO	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)					
(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.				
0	126,1	131,2	-	-	-	166,7	168	169	1,8	0,50				
4	126,1	131,5	138	145	152	160	174	180	1,6	0,24				
8	126,1	131,5	138,2	145,2	152,5	161	180	188	2,0	0,27				
16	126,1	131,5	138,3	145,6	153,5	163,3	196	213	2,5	0,16				
20	126,1	131,6	138,5	146	154	164,5	204	225	2,2	0,23				
24	126,1	131,7	138,6	146,3	154,5	165,7	211	235	2,0	0,25				
29	126,1	131,7	138,8	146,7	155,2	167,5	220	251	1,6	0,27				
34	126,1	131,9	139,3	147,3	156,4	169	233	272,5	1,9	0,24				
40	126,1	132	139,5	147,7	157,3	172,5	246	293,5	1,5	0,23				
48	126,1	132,1	140	149	159,3	178,5	272,5	335	-	-				
Médias									1,94	0,25				

QUADRO A.17

ENSAIO nº : 18		TAXA: 250 m ³ /m ² .d							FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	125,9	128	131,6	135,3	139,3	143,7	149,8	151,5	3,5	0,89
4	125,9	128	131,6	135,4	139,4	144,2	153,2	157,6	2,8	0,23
8	125,9	128	131,6	135,4	139,5	144,5	156	163	2,0	0,31
13	125,9	128	131,6	135,5	139,6	145	160	170	1,5	0,26
20	125,9	128	131,6	135,6	139,8	145,4	165	178	2,3	0,35
26	125,9	128	131,6	135,6	139,8	145,6	170	188	3,5	0,41
29,5	125,9	128	131,6	135,6	139,8	146,2	175	198	4,0	0,81
36	125,9	128	131,6	135,6	140,2	147,3	186,5	219	1,9	0,24
44	125,9	128	131,7	135,8	140,5	148,5	198,5	240	2,6	0,24
49	125,9	128	131,7	135,8	140,7	149,8	216,5	269	2,8	0,59
55	125,9	128	131,9	136,1	141,5	152,3	244	312	1,8	0,32
Médias									2,53	0,39

QUADRO A.18

ENSAIO nº : 19		TAXA: 350 m ³ /m ² .d							FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	126,3	131	136,5	142,3	148,2	154,4	161,7	164	3,5	0,48
4	126,3	131	136,5	142,5	148,9	156	167	172,5	2,8	0,20
8	126,3	131	136,6	142,7	149,3	157	171	179,5	2,0	0,27
13	126,3	131,1	136,9	143,2	150	158,5	177	189	1,5	0,28
20	126,3	131,2	137	143,5	150,8	160	184	200	2,3	0,37
26	126,3	131,1	137	143,2	150,7	160,5	191	212	3,5	0,41
29,5	126,3	131,1	137	143,5	151,5	162,5	198	225	4,0	0,81
36	126,3	131,2	137,2	144,2	153	165	215	253,5	1,9	0,24
44	126,3	131,3	137,5	144,8	154	168,5	230,5	280	2,6	0,24
49	126,3	131,3	137,5	145,3	155,5	173,5	256	315	2,8	0,62
Médias									2,56	0,37

QUADRO A.19

ENSAIO nº : 20		TAXA: 250 m ³ /m ² .d							FILTRO : 3	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	125,5	127,7	131,1	134,6	138,5	143,1	149,1	150,5	3,5	0,49
4	125,5	127,7	131,1	134,6	138,5	143,4	152	155,8	2,8	0,29
8	125,5	127,7	131,1	134,7	138,8	143,9	155	161,5	2,0	0,30
13	125,5	127,7	131,1	134,7	138,9	144	158,5	167,5	1,5	0,27
20	125,5	127,7	131,1	134,7	138,9	144,5	163,2	176	2,3	0,34
26	125,5	127,7	131,1	134,8	138,9	144,8	169	185,5	3,5	0,44
29,5	125,5	127,7	131,1	134,8	139	145,5	174	195	4,0	0,81
36	125,5	127,7	131,1	134,8	139,2	146,5	186	216	1,9	0,24
44	125,5	127,7	131,2	134,9	139,5	147,6	198,5	237	2,6	0,26
49	125,5	127,7	131,2	134,9	139,7	149	216,5	265	2,8	0,60
55	125,5	127,8	131,3	135,2	140,5	151,7	235,5	307	1,8	0,26
Médias									2,53	0,38

QUADRO A.20

ENSAIO nº : 21		TAXA: 350 m ³ /m ² .d							FILTRO : 4	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	125,8	129,5	135	140,5	145,3	153	161,5	165	3,5	0,56
4	125,8	129,5	135	140,5	146,5	153,6	167,5	175	2,8	0,25
8	125,8	129,5	135	140,7	147	154,7	172,5	183	2,0	0,27
13	125,8	129,5	135,1	141	147,3	155,8	178,8	193	1,5	0,27
20	125,8	129,5	135,2	141,1	147,8	157	187	205,5	2,3	0,31
26	125,8	129,5	135,2	141,2	148	158	196,5	221	3,5	0,50
29,5	125,8	129,5	135,2	141,3	148,5	159,5	205,5	236	4,0	0,84
36	125,8	129,5	135,2	141,5	149,1	161,6	222,7	266	1,9	0,24
44	125,8	129,5	135,4	142	150	164,4	242,5	297,5	2,6	0,30
49	125,8	129,5	135,5	142,5	151,2	169	270	339	2,8	0,56
Médias									2,56	0,38

QUADRO A.21

ENSAIO nº : 22		TAXA: 500 m ³ /m ² .d							FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	127	132,8	140,6	149,5	159	169,3	182,1	185,5	2,9	0,23
1	127	132,8	140,6	149,5	159,1	170	185	189,7	2,8	0,20
4	127	132,8	140,6	149,8	159,7	171,5	192,3	202	3,8	0,05
9	127	132,8	141	150,6	161,5	175,5	210	231	3,4	0,30
13	127	133	141,5	151,5	163	179	222	252	3,5	0,49
16	127	133	141,6	151,7	163,5	181	231	272	3,1	0,48
Médias									3,38	0,28

QUADRO A.22

ENSAIO nº : 23		TAXA: 550 m ³ /m ² .d							FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	127,3	135,4	145,2	155,5	166	178,2	192	196	2,9	0,22
1	127,3	135,4	145,2	155,5	166,5	179,2	195	200,8	2,8	0,20
4	127,3	135,4	145,3	155,7	167,3	181,1	203,5	214	3,8	0,09
9	127,3	135,6	146	157	169,5	186	222	244	3,4	0,48
13	127,3	135,9	146,7	158,2	171,5	190,5	236	267	3,5	0,77
16	127,3	136	146,9	158,5	172,5	193	245	288	3,1	0,63
Médias									3,38	0,42

QUADRO A.23

ENSAIO nº : 24		TAXA: 600 m ³ /m ² .d							FILTRO : 4	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	127,1	135,2	146,3	157,6	168	181,5	199,5	204	2,9	0,21
1	127,1	135,2	146,3	157,6	168,5	182,2	203,4	210	2,8	0,19
4	127,1	135,2	146,3	157,7	169	183,7	214,2	226,5	3,8	0,06
9	127,1	135,3	147	159	172	188,5	241	266	3,4	0,37
13	127,1	135,6	147,6	160,3	174,5	193,2	258	294,5	3,5	0,65
16	127,1	135,6	147,7	160,3	174,5	195	269	320	3,1	0,56
Médias									3,38	0,34

QUADRO A.24

ENSAIO nº : 25		TAXA: 550 m ³ /m ² .d							FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	127,1	134,2	144,2	155,7	168	179,8	194,2	197,5	1,8	0,13
1	127,1	134,3	144,6	156,4	169,1	181,7	198,2	203	1,9	0,09
4	127,1	134,2	144,3	156,1	168,5	181,7	206	214,5	1,5	0,09
20,5	127,1	134,7	146	159,5	175,2	198,8	247,5	272,5	1,5	0,20
24	127,1	134,7	146,1	159,7	175,7	200	255,5	286	1,7	0,21
28,5	127,1	134,8	146,3	160,2	177	204	269	307	1,4	0,54
31	127,1	135	146,5	160,5	178	205,5	274	316	1,2	0,32
Médias									1,51	0,24

QUADRO A.25

ENSAIO nº : 26		TAXA: 600 m ³ /m ² .d							FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	127,6	137,7	149,7	162,5	175,6	188,7	203	206	1,8	0,17
1	127,6	138	150,2	163,3	177	191	207	211,5	1,9	0,12
4	127,6	137,9	150	163,1	177,2	192	212,5	218,5	1,5	0,12
8	127,6	138,5	152,1	166,5	182,2	200	228	238,5	1,3	0,23
12,5	127,6	138,5	152,5	166,8	182,5	201,5	236	251	1,5	0,23
20,5	127,6	139	153	168,3	186	210	258	281,5	1,5	0,30
24	127,6	139	153,1	168,5	186,9	212,5	266,5	295	1,7	0,34
28,5	127,6	139,1	153,3	169,2	188,5	217	279	312	1,4	0,75
31	127,6	139,2	153,6	170	189,5	220	284	321	1,2	0,43
Médias									1,51	0,30

QUADRO A.26

ENSAIO nº : 27		TAXA: 500 m ³ /m ² .d								FILTRO : 4	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,5	134,5	144,5	155,2	166,2	177	191	194	1,8	0,13	
1	126,5	134,5	144,8	155,8	167,1	178,7	195	199	1,9	0,07	
4	126,5	134,5	144,8	156	167,5	180	200,7	207	1,5	0,05	
8	126,5	134,8	145,5	157,3	-	183,7	212	222,5	1,3	0,09	
12,5	126,5	134,7	145,6	157,5	-	185,5	221	236	1,5	0,13	
20,5	126,5	135,2	146,8	159,5	173,5	192	242	265	1,5	0,16	
24	126,5	135,2	146,7	159,3	173,5	192	247,5	274	1,7	0,21	
28,5	126,5	135,2	147	160	175	197	262	294	1,4	0,60	
31	126,5	135,3	147	160,2	175,5	199	267	302	1,2	0,28	
Médias									1,51	0,19	

QUADRO A.27

ENSAIO nº : 29		TAXA: 450 m ³ /m ² .d								FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.	
0	126,9	134	142,2	151	160,8	171,5	184	186	2,0	0,19	
1	126,9	134	142,4	151,5	161,5	173,2	187,5	191	1,9	0,12	
4,5	126,9	134,1	142,8	152	162,5	175,3	193	197	1,2	0,08	
8	126,9	134,3	143,1	152,5	163,5	177,7	204	212	2,1	0,11	
16,5	126,9	134,3	143,3	153	-	182,3	225	241	1,9	0,26	
20,5	126,9	134,6	143,9	154	166,3	189	245	267	1,9	0,46	
24	126,9	135	144,7	155,5	169,5	206,5	280	307	2,2	0,93	
Médias									1,89	0,32	

QUADRO A.28

ENSAIO nº : 30		TAXA: 400 m ³ /m ² .d							FILTRO : 4	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	126,1	132,3	139,7	147,7	156,3	165,2	175,7	178	2,0	0,18
1	126,1	132,4	140,1	148,5	157,3	167	179,1	182	1,9	0,11
4	126,1	132,4	140,2	148,7	158	168	184,5	190	1,3	0,04
8	126,1	132,5	140,7	149,6	159,5	171,5	192	197	2,1	0,04
16,5	126,1	132,8	141,2	150,5	161	175	211	222	1,9	0,12
20,5	126,1	133	141,6	151,2	162,5	178,5	224	239	1,9	0,21
24	126,1	133,2	142,3	152,5	164,6	183	240	259	2,2	0,36
28,5	126,1	133,4	142,6	153	166	187	256	280	1,3	0,11
31,5	126,1	133,5	143	153,5	167	189,5	266	294	2,3	0,15
Médias									1,92	0,15

QUADRO A.29

ENSAIO nº : 31		TAXA: 200 m ³ /m ² .d							FILTRO : 1	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.
0	125,6	128	130,8	133,9	137,6	141,4	146,4	147,5	1,2	0,13
0,5	125,6	128	131,1	134,2	138,1	141,9	147,6	149	1,2	0,10
4,5	125,6	128	131,1	134,2	138,1	142	150	153,2	1,7	0,05
10	125,6	128	131,2	134,6	138,6	143,1	155	161,5	1,7	0,04
20	125,6	128	131,3	134,6	139,3	144,5	165	176,5	1,2	0,05
26	125,6	128	131,2	134,6	138,8	144,1	169,5	185	0,80	0,04
34	125,6	128	131,2	134,7	139,1	145,2	184,5	208,5	1,5	0,03
44	125,6	128	131,2	134,7	139,1	146,2	205	238,5	1,3	0,03
51,5	125,6	128	131,2	134,7	138,7	146,2	216	255,5	1,4	0,04
56	125,6	128	131,1	134,7	138,7	146,6	228	274	0,90	0,03
Médias									1,33	0,04

QUADRO A.30

ENSAIO nº : 32											TAXA: 300 m ³ /m ² .d			FILTRO : 2	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)						
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.					
0	126,1	130,4	135,4	140,9	146,9	153	159,7	161,3	1,2	0,14					
0,5	126,1	130,4	135,5	141,1	147,2	153,4	160,6	162,5	1,2	0,09					
4,5	126,1	130,4	135,6	141,2	147,5	154,4	165	169,5	1,7	0,05					
10	126,1	130,4	135,8	141,7	148,5	156,3	171,7	180	1,7	0,04					
20	126,1	130,4	135,9	142,3	149,8	159,3	184,5	200	1,2	0,05					
26	126,1	130,4	135,7	142,1	149,5	159,5	191,2	211	0,80	0,04					
34	126,1	130,4	135,9	142,7	151,4	165	213,5	243	1,5	0,04					
44	126,1	130,4	135,8	142,5	151,6	168,5	235,5	277	1,3	0,04					
51,5	126,1	130,4	135,9	142,5	152,1	171,3	255	306	1,4	0,05					
56	126,1	130,4	136	143,1	153	174,5	270	328	0,90	0,04					
Médias									1,33	0,04					

QUADRO A.31

ENSAIO nº : 33											TAXA: 250 m ³ /m ² .d			FILTRO : 4	
TEMPO (h)	NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS (cm)								TURBIDEZ (UT)						
	1	2	3	4	5	6	7	8	AFL.	EFL.					
0	125,4	128,5	133,1	137,7	142,7	147,7	154,1	155,8	1,2	0,17					
0,5	125,4	128,5	133,1	137,8	142,8	147,9	154,8	156,8	1,2	0,09					
4,5	125,4	128,5	133,1	137,8	143	148,5	158,5	162,8	1,7	0,05					
10	125,4	128,5	133,2	138	143,3	149,3	164,5	173,3	1,7	0,04					
20	125,4	128,5	133,4	138,5	144,3	151,4	176,5	191	1,2	0,05					
26	125,4	128,5	133,1	138	143,7	151	183	202	0,80	0,03					
34	125,4	128,5	133,3	138,2	144,6	153,6	203	231,5	1,5	0,03					
44	125,4	128,5	133,3	138,2	144,8	155,5	226,5	266	1,3	0,03					
51,5	125,4	128,5	133,1	137,7	144,1	155,6	241	289	1,4	0,04					
56	125,4	128,5	133,1	137,9	144,7	157	259	316	0,90	0,03					
Médias									1,33	0,04					

A P Ê N D I C E " B "

- Curvas com Valores de Perda de Carga Total e de Turbidez do Afluente e do Efluente, em Função do Tempo, nos Ensaios da Primeira Etapa.

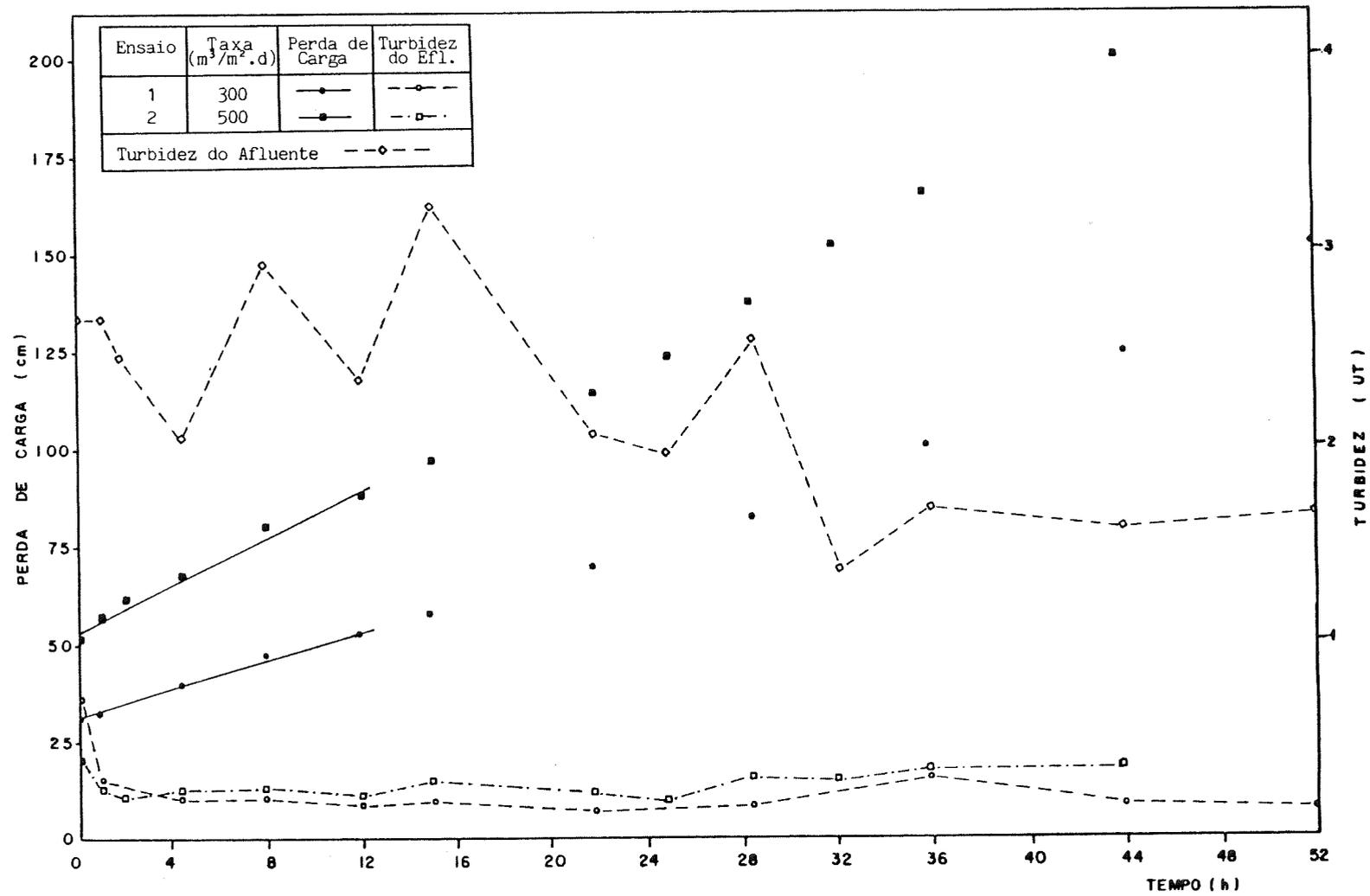


Figura B.1

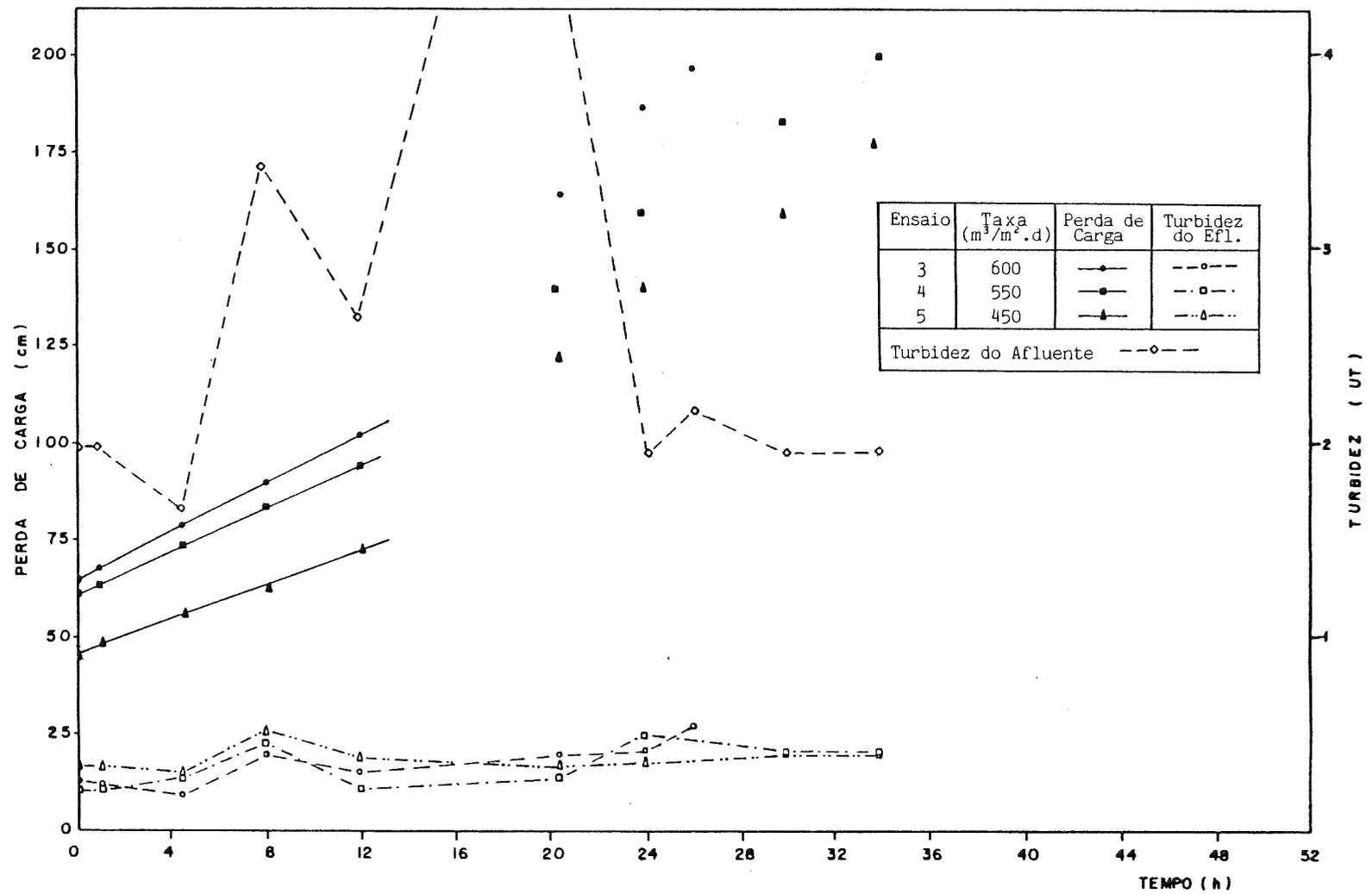


Figura B.2

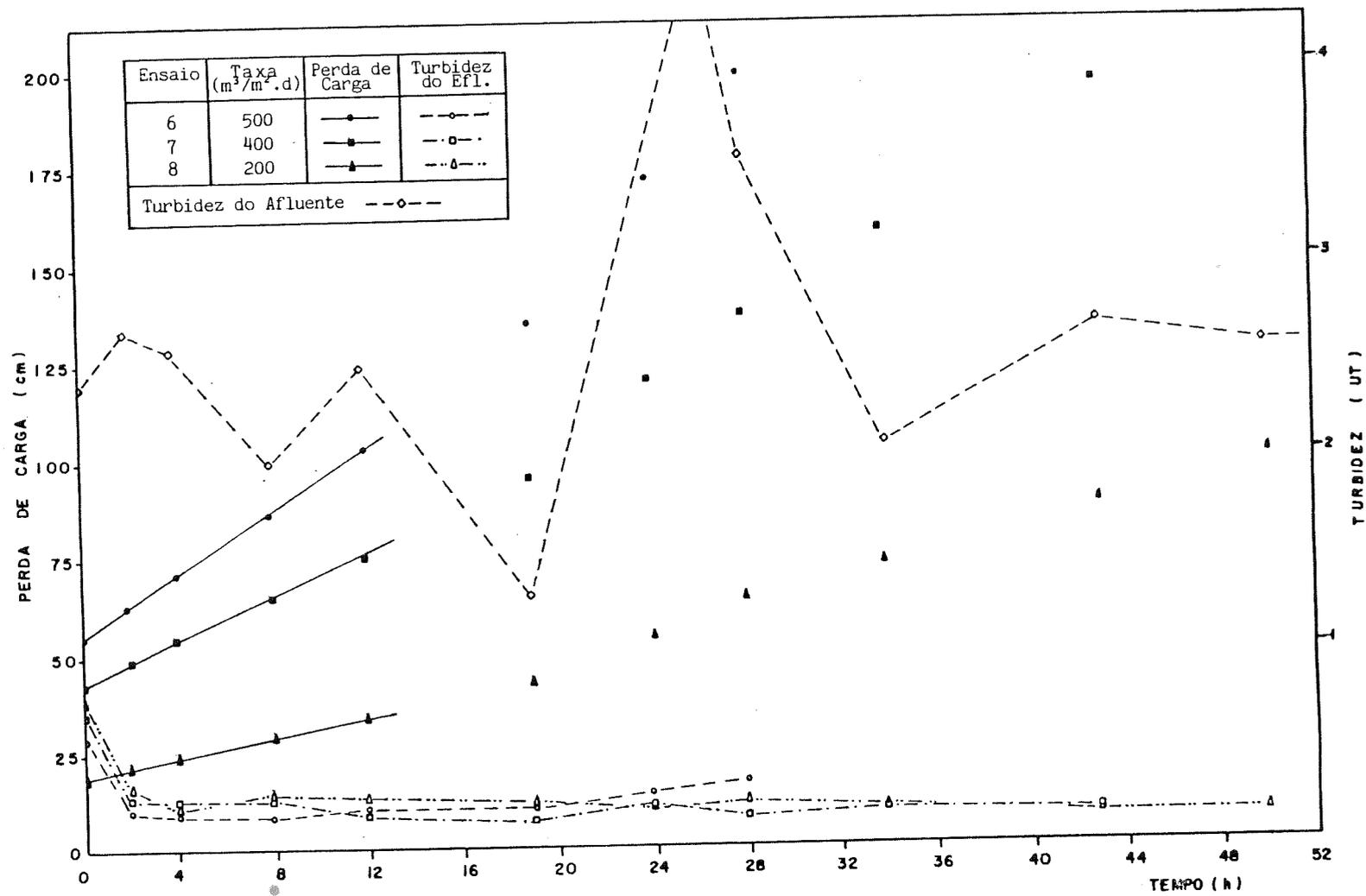


Figura B.3

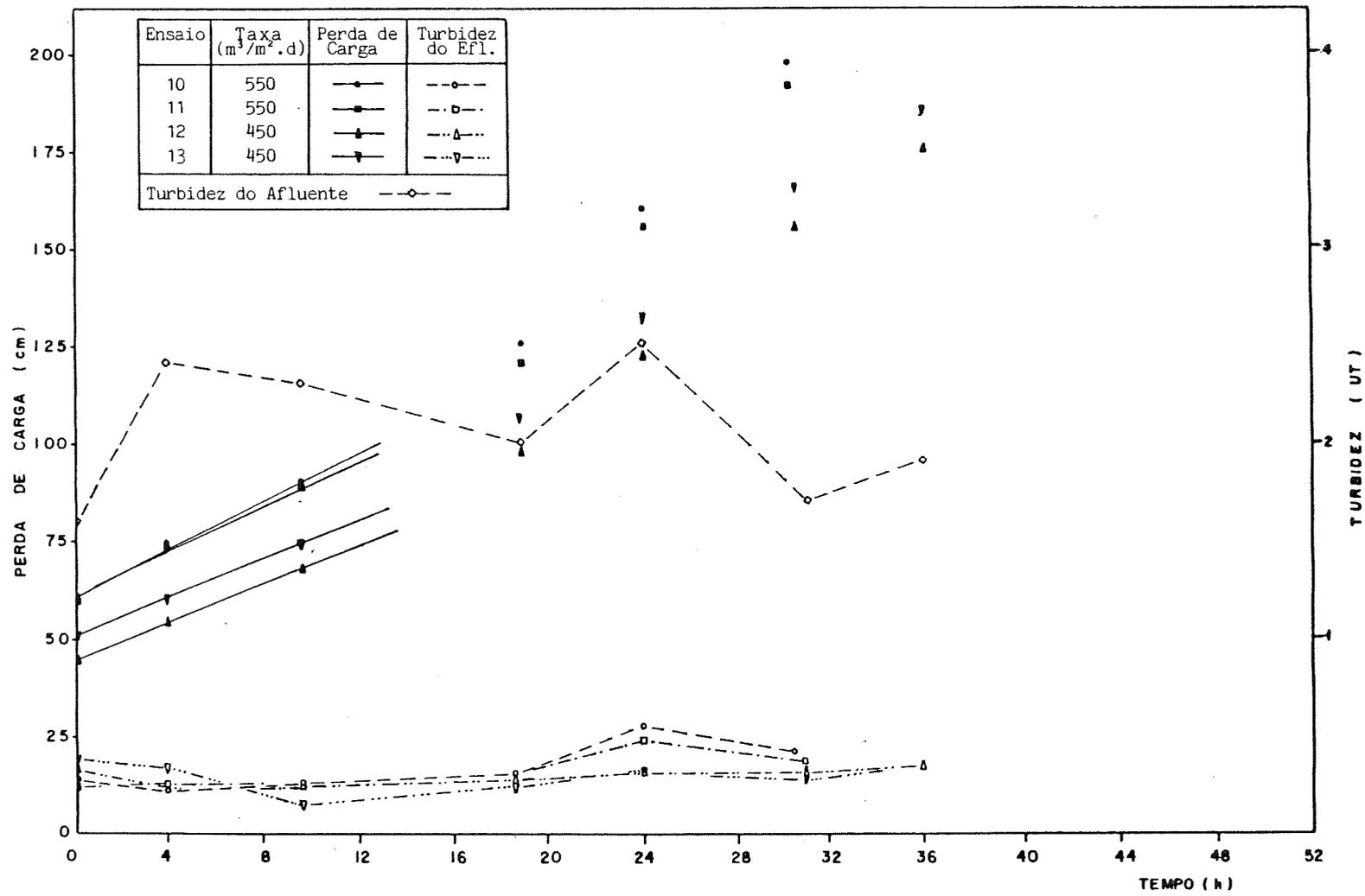


Figura B.4

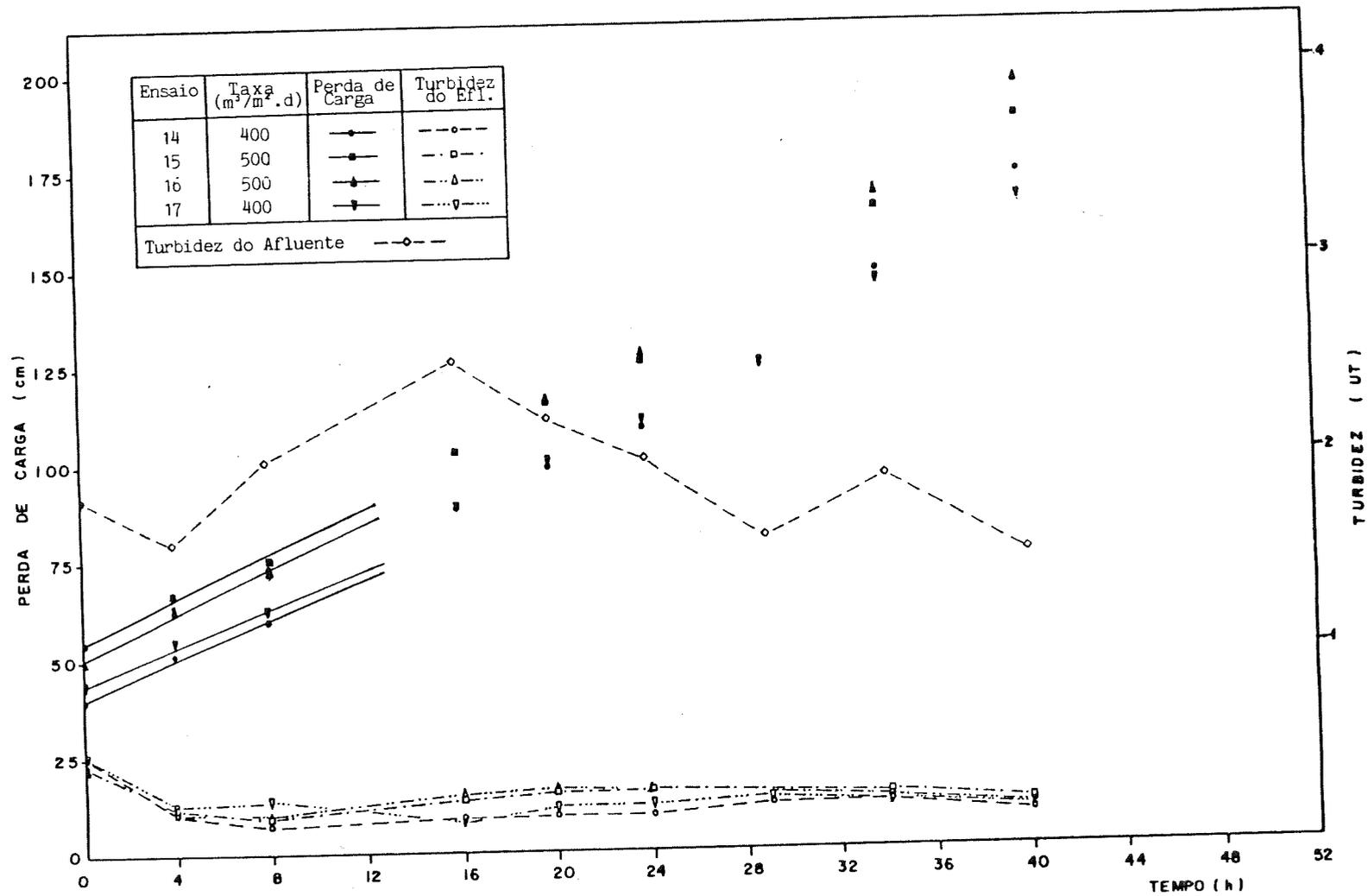


Figura B.5

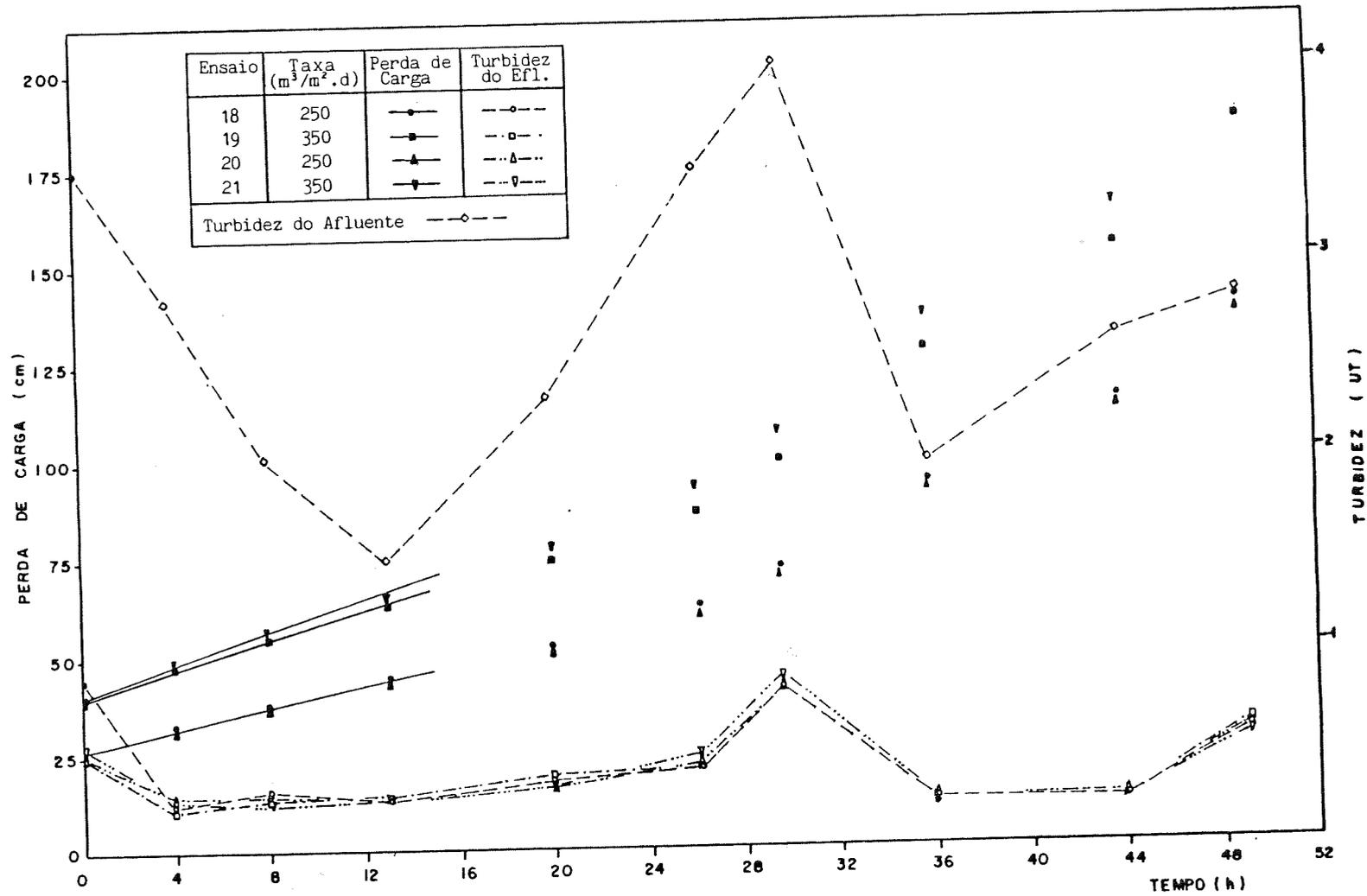


Figura B.6

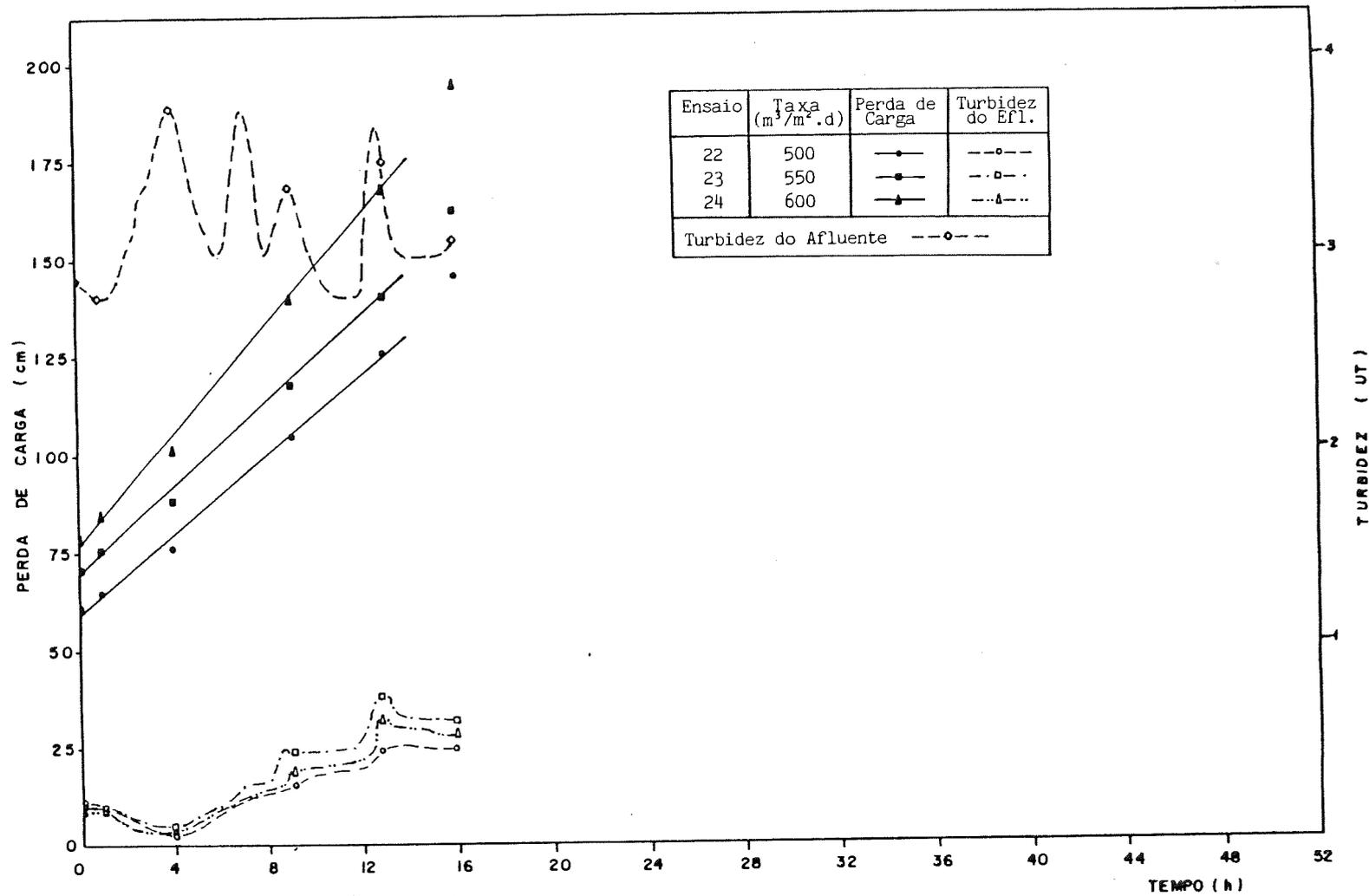


Figura B.7

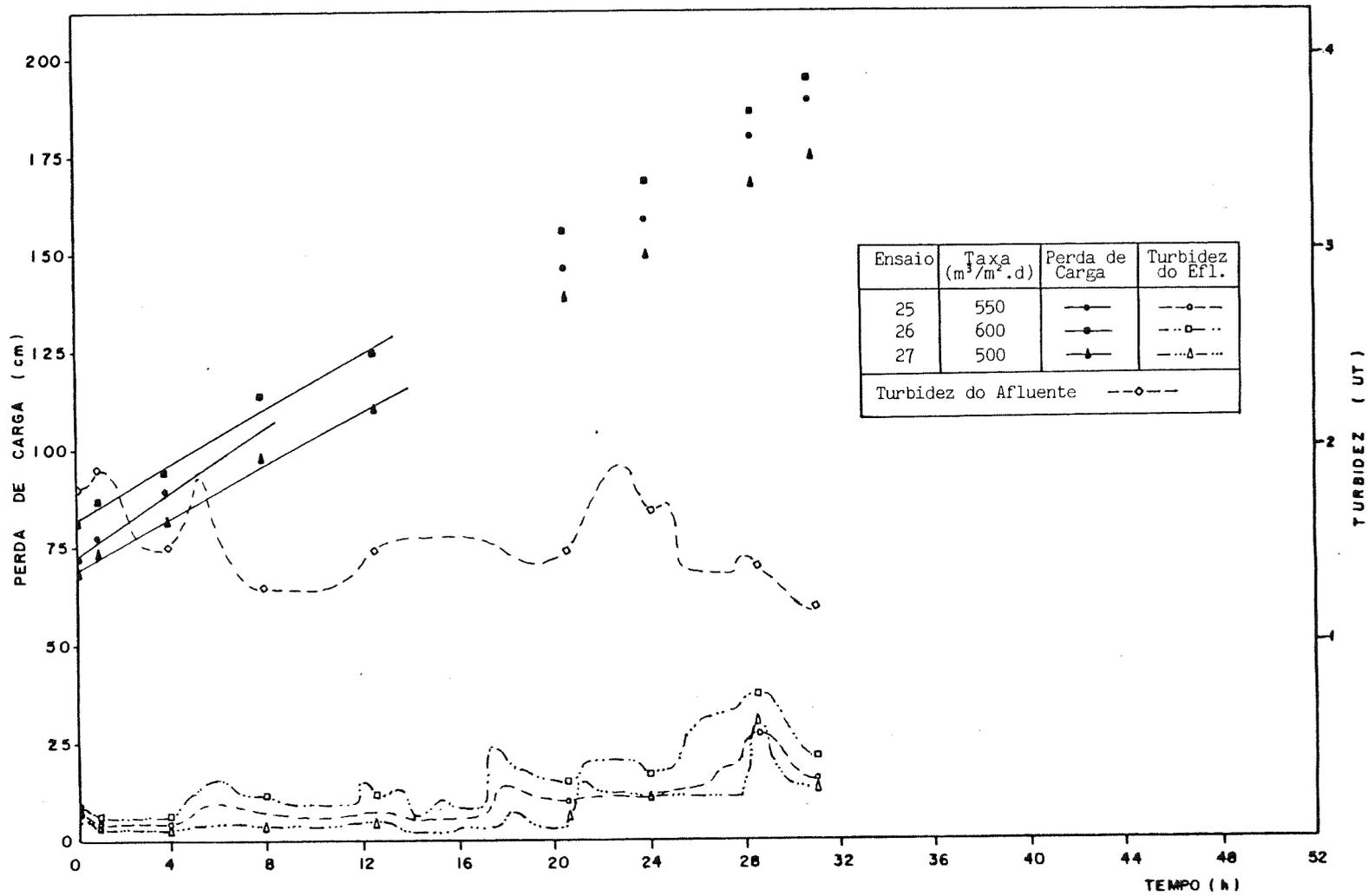


Figura B.8

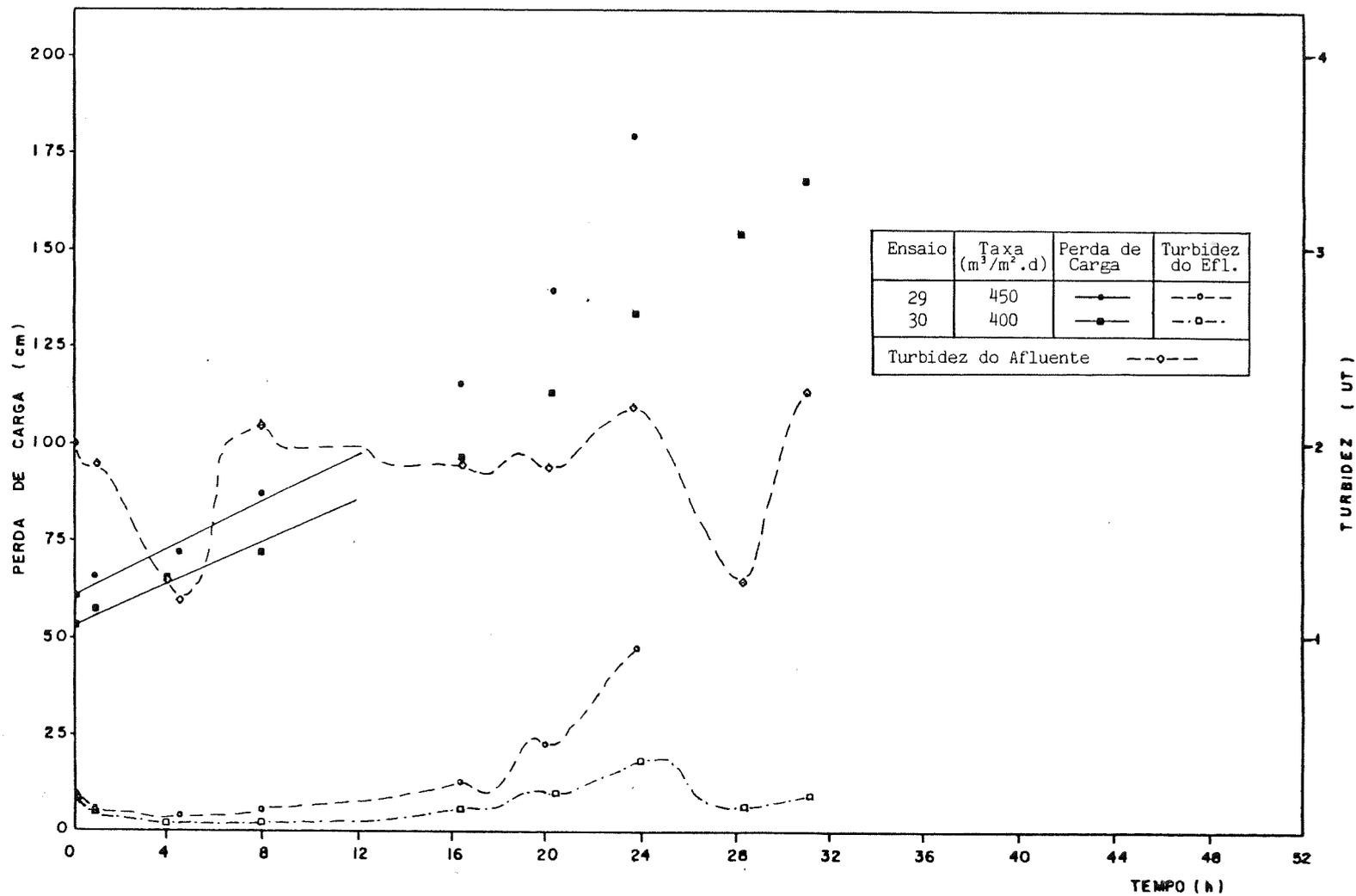


Figura B.9

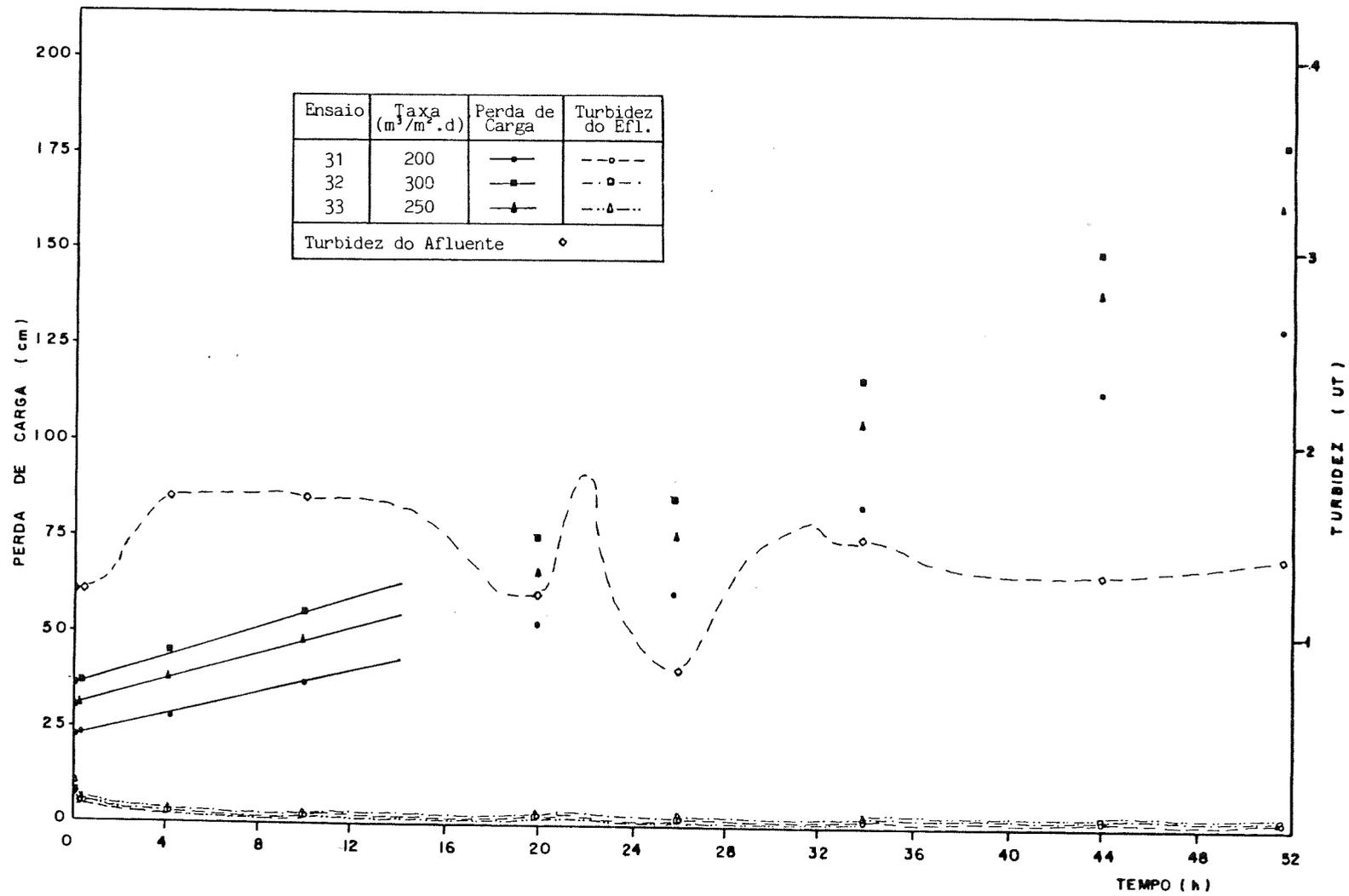


Figura B.10

A P Ê N D I C E " C "

- Curvas com valores das Perdas de Carga ao Longo do Meio Filtrante, em Função do Tempo, nos Ensaios da Primeira Etapa.

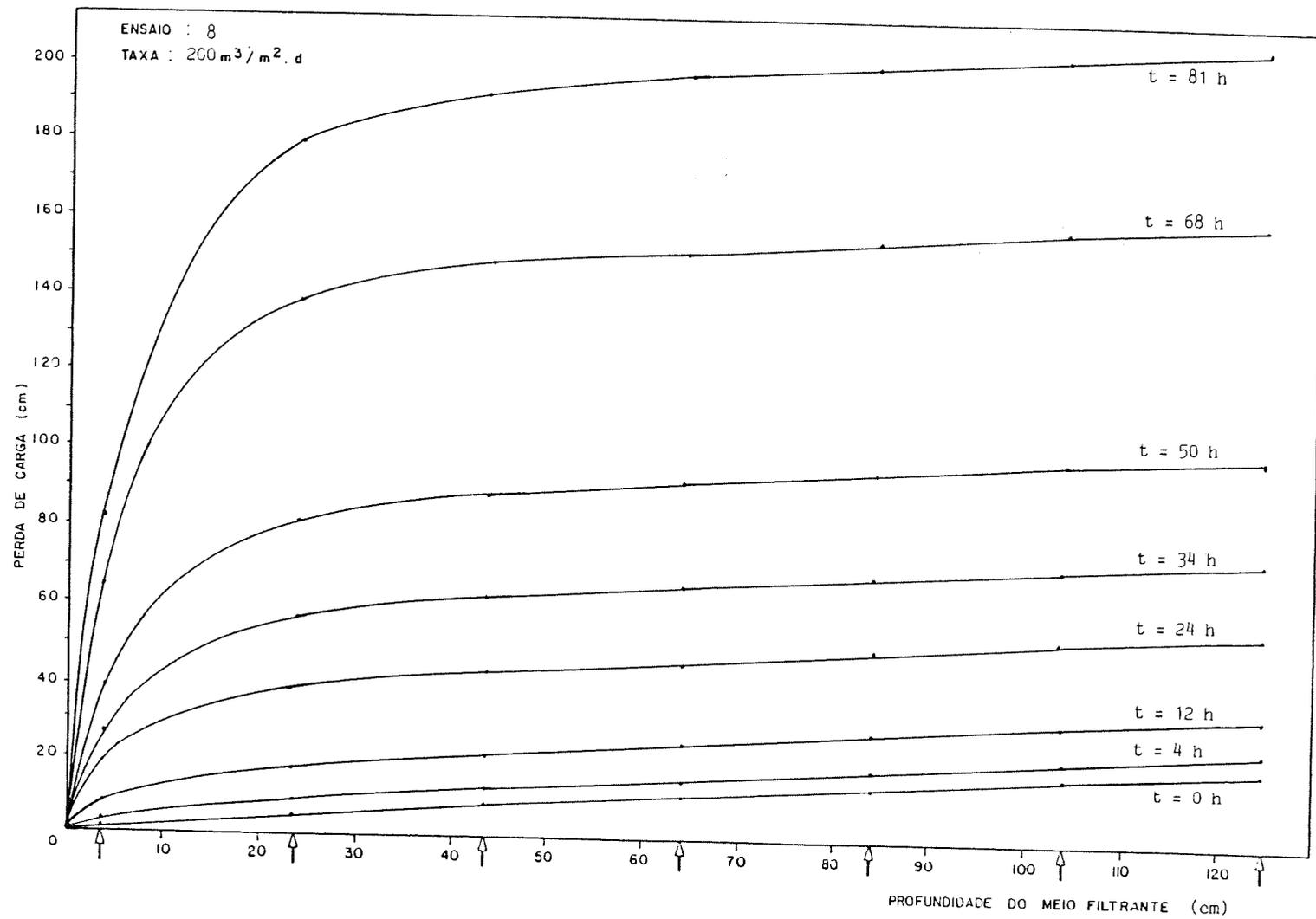


Figura C.1

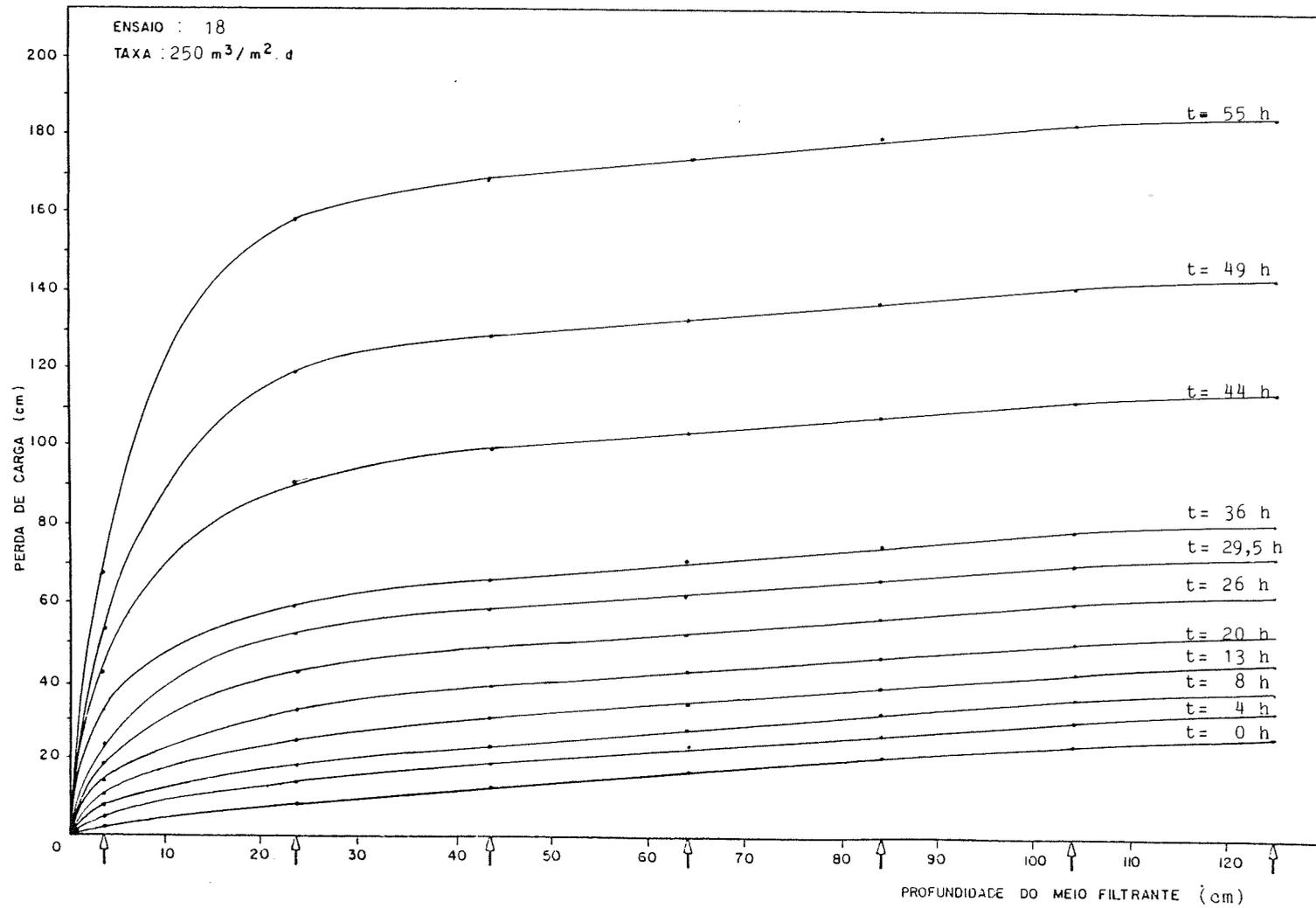


Figura C.2

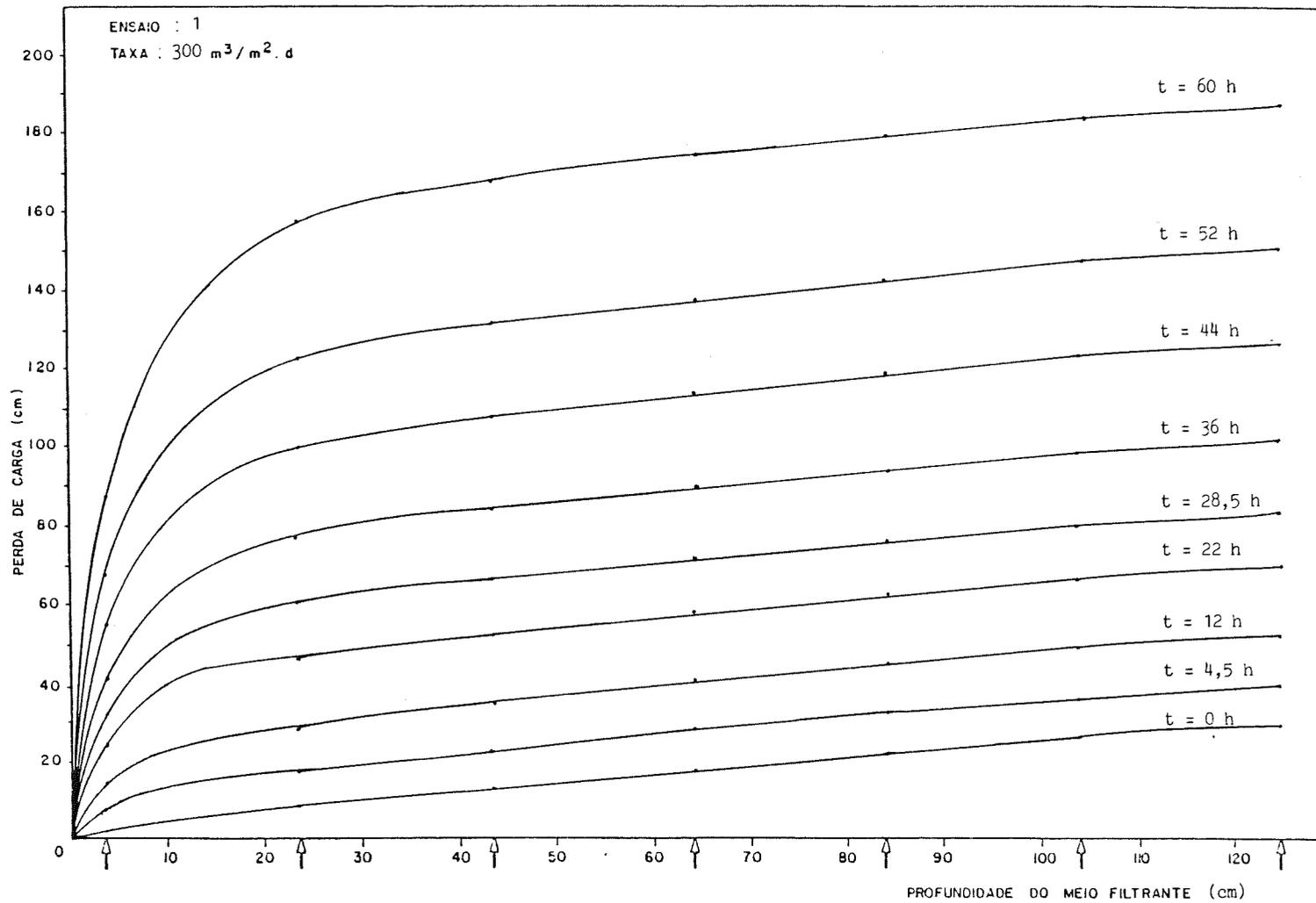


Figura C.3

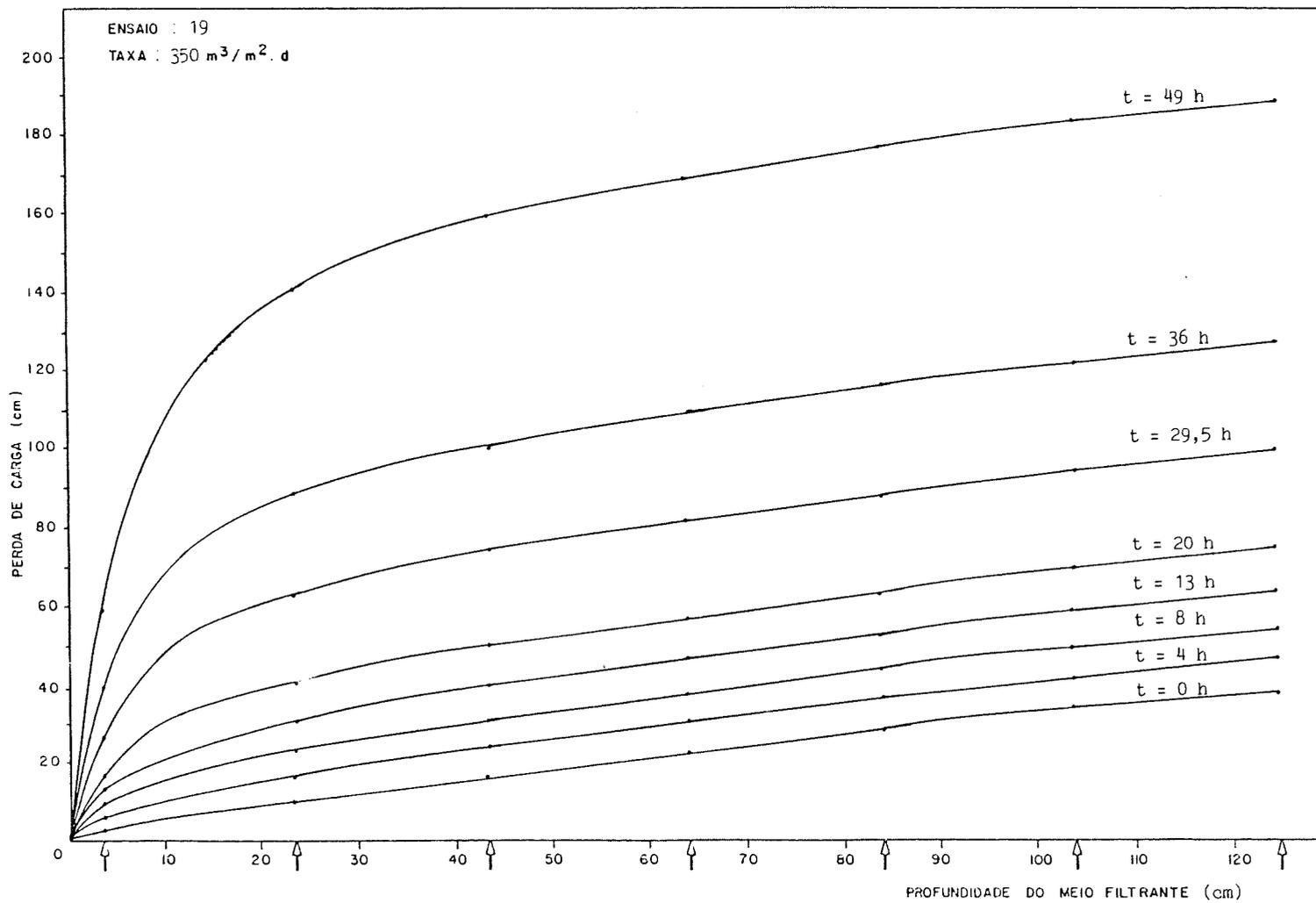


Figura C.4

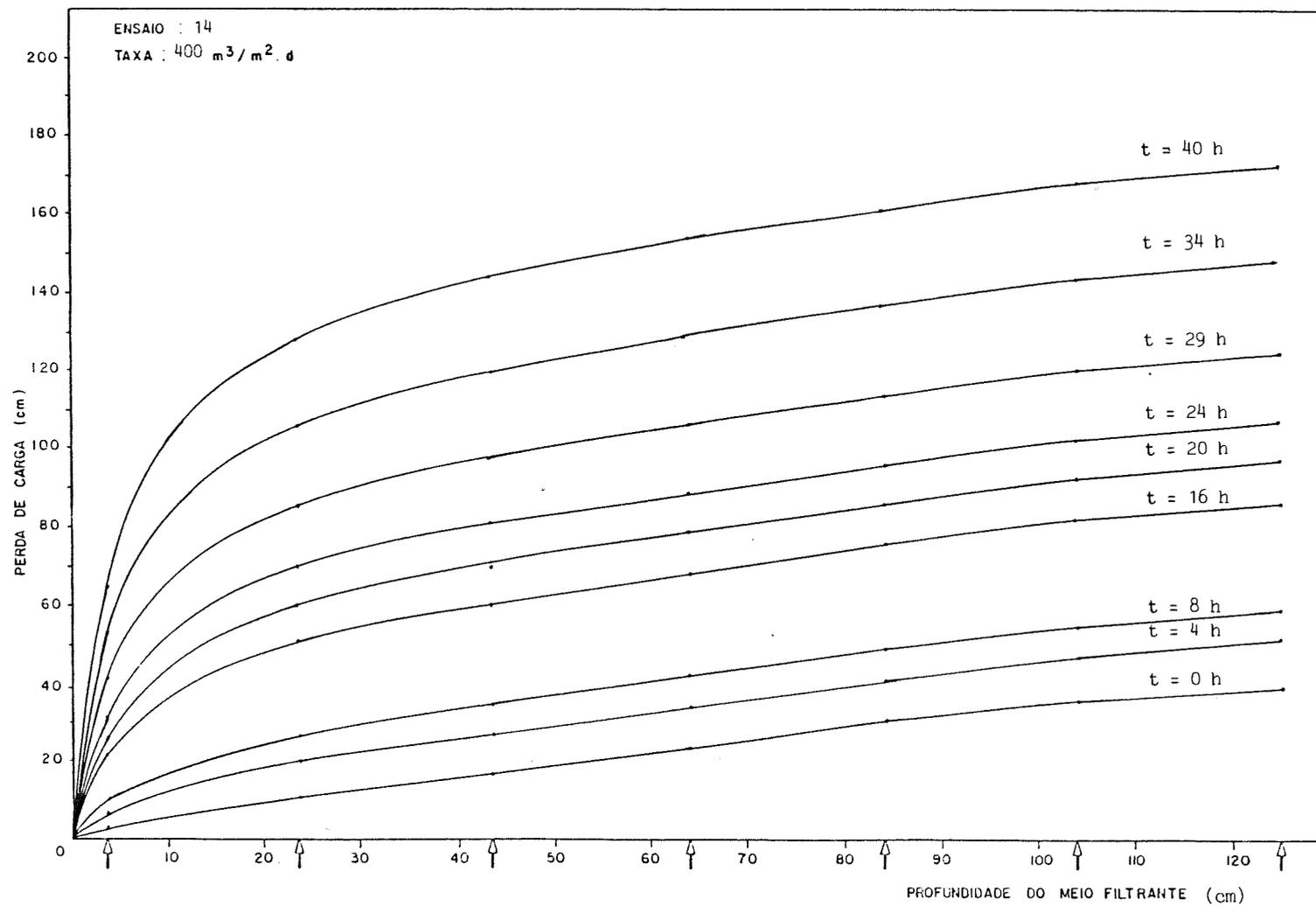


Figura C.5

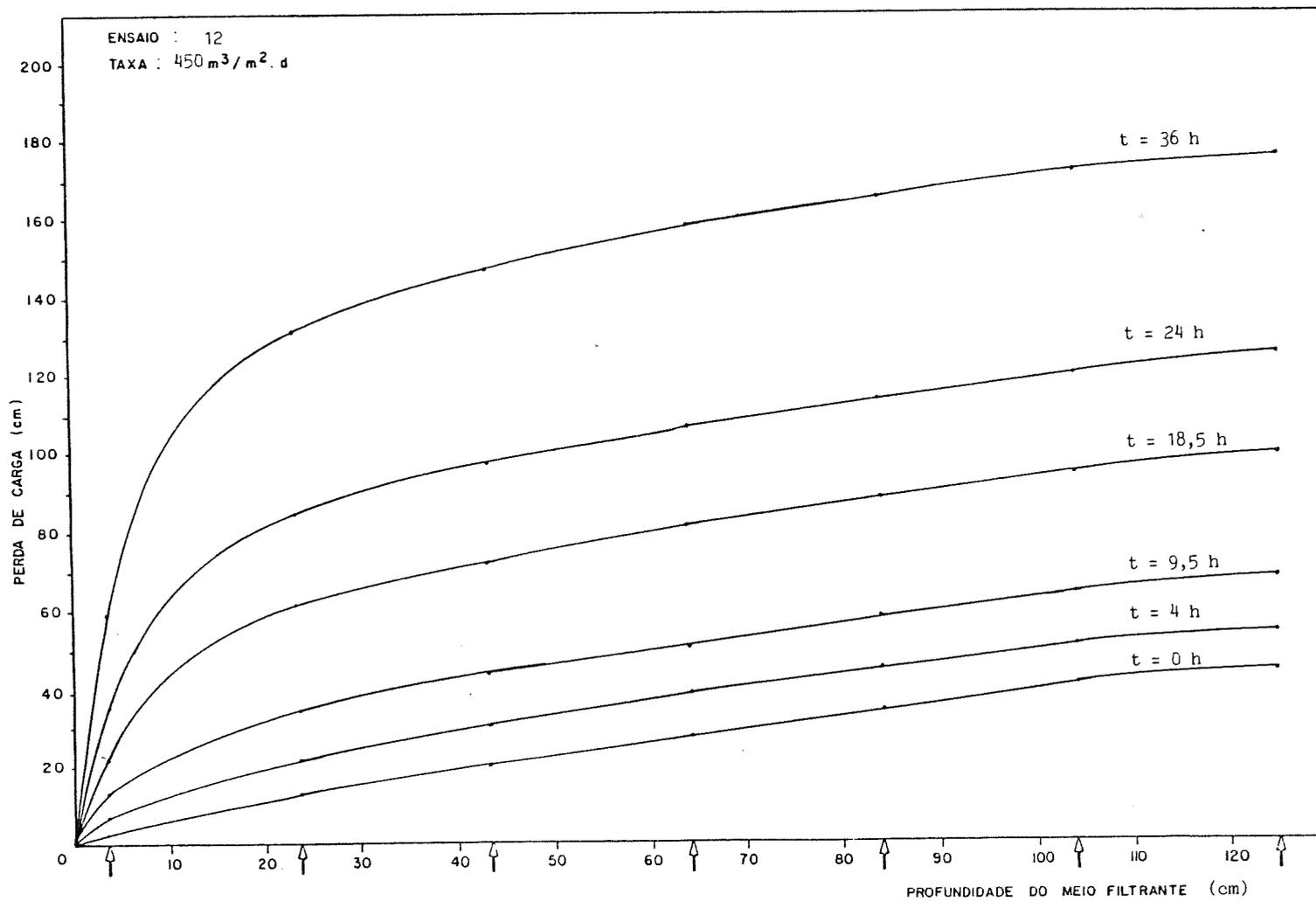


Figura C.6

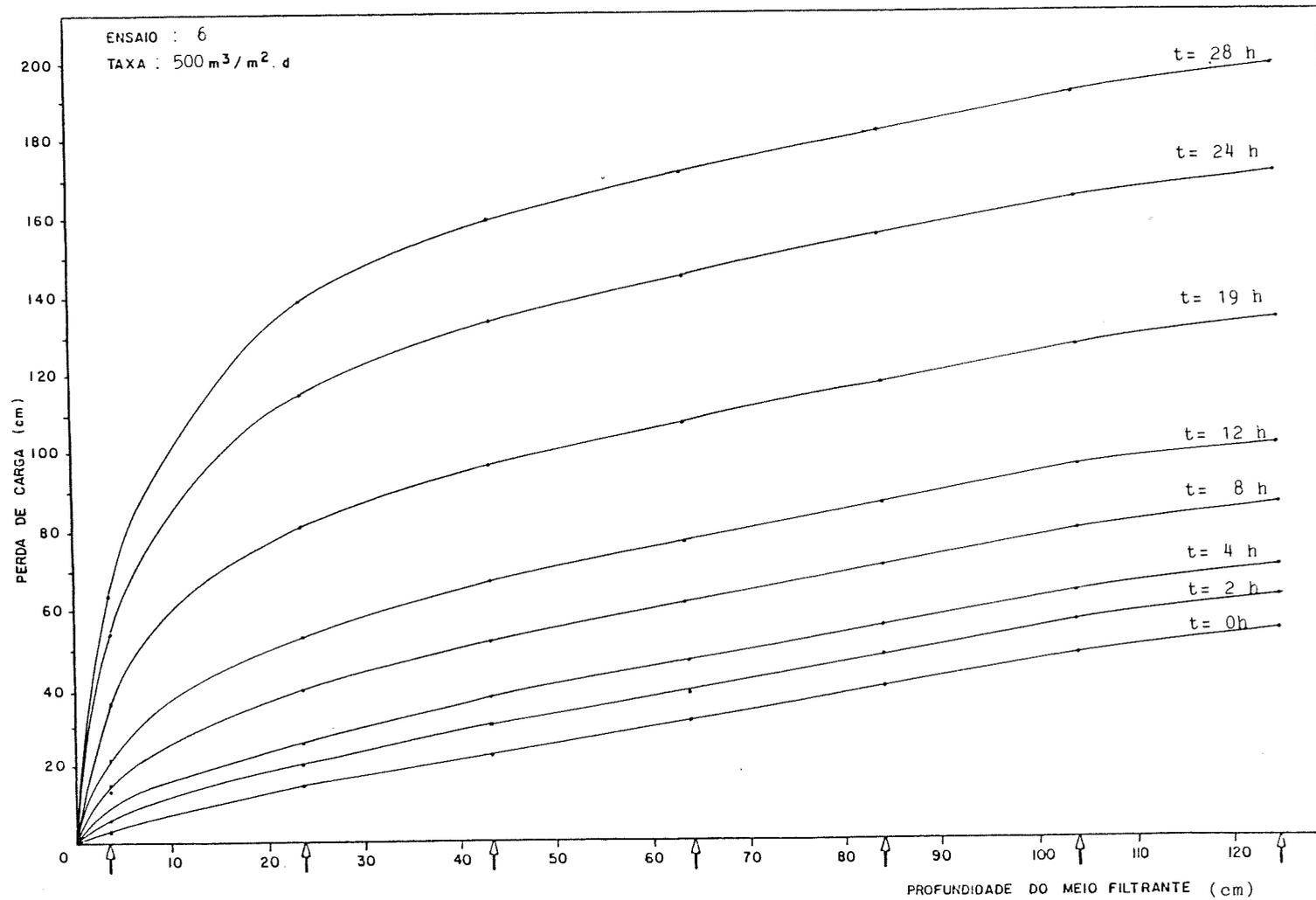


Figura C.7

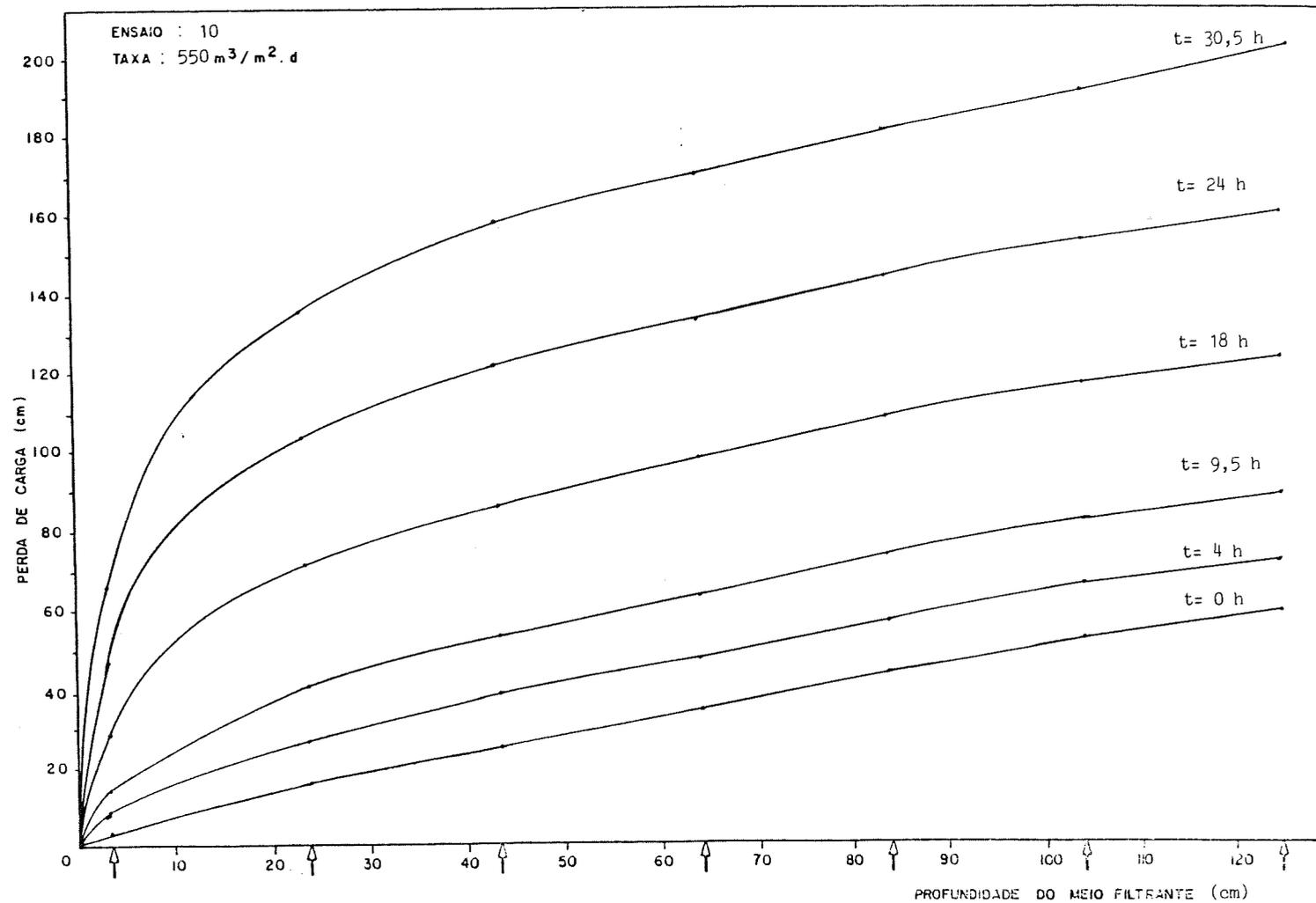


Figura C.8

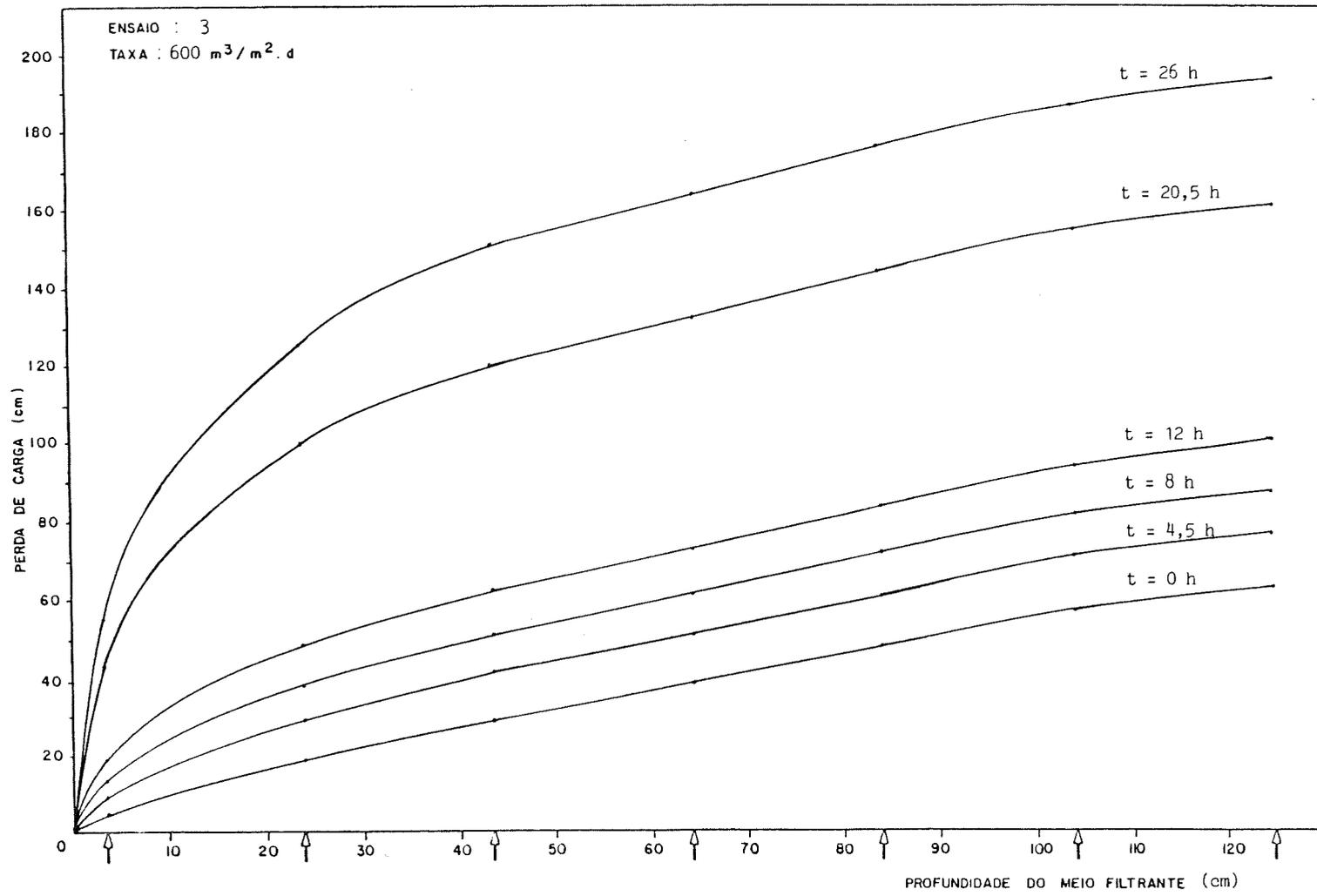


Figura C.9

A P Ê N D I C E " D "

- Resultados de Simulações do Comportamento de um SFTD em Computador.

=====

SISTEMAS DE FILTRACAO COM TAXA DECLINANTE

=====

$$H = 0.0000000000 \cdot T^2 + 0.0001350000 \cdot T^{1.4000} + 0.0000000000 \cdot T^{0.0000} + 0.0000000000 \cdot T^{0.0000} + 0.0311100000 \cdot T + 0.0000000000$$

- Numero de unidades filtrantes : 4
- Taxa media de filtracao (m3/m2.dia) : 250.00
- Carga hidraulica disponivel (s) : 1.20

=====

TAXAS DE FILTRACAO E NIVEIS DE OPERACAO

=====

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	354.20170	0.30647	0.00087	TMAX = 450.28400
2	274.80270	0.23777	0.00198	TMED = 250.00000
3	210.81800	0.41753	0.00343	Coef F = 1.41681
4	160.33080	0.55061	0.00535	Niv. 1 = 0.89353
				Niv. 2 = 1.20000
				N2-N1 = 0.30648

TAXAS E NIVEIS DURANTE A LAVAGEM

=====

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	420.43650	0.30647	0.00087	TMAX = 450.28400
2	328.53570	0.23777	0.00198	TMED2 = 333.33340
3	253.58090	0.41753	0.00343	Coef F = 1.06261
				Niv. 2 = 1.20000
				Niv. 3 = 1.46568
				N3-N2 = 0.26568

 SISTEMAS DE FILTRACAO COM TAXA DECLINANTE

$$H = 0.0000000000 * T^2 + 0.0000338000 * T^{1.6500} + 0.0000000000 * T^{0.0000} \\ + 0.0000000000 * T^{0.0000} + 0.0012600000 * T + 0.0000000000$$

 - Numero de unidades filtrantes : 4
 - Taxa media de filtracao (m3/m2.dia) : 350.00
 - Carga hidraulica disponivel (m) : 1.61

 TAXAS DE FILTRACAO E NIVEIS DE OPERACAO

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	436.94760	0.29098	0.00067	TMAX = 504.53460
2	374.92690	0.24968	0.00144	TMED = 350.00000
3	318.96150	0.45995	0.00235	Coef F = 1.24842
4	269.28630	0.63398	0.00343	Niv. 1 = 1.31902
				Niv. 2 = 1.61000
				N2-N1 = 0.29098

 TAXAS E NIVEIS DURANTE A LAVAGEM

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	534.59330	0.29098	0.00067	TMAX = 504.53460
2	464.13210	0.24968	0.00144	TMED2 = 466.66670
3	398.38350	0.45995	0.00235	Coef F = 0.93632
				Niv. 2 = 1.61000
				Niv. 3 = 2.09965
				N3-N2 = 0.46965

SISTEMAS DE FILTRACAO COM TAXA DECLINANTE

$$H = 0.0000000000T^2 + 0.0000631000T^{1.5400} + 0.0000000000T^{0.0000} \\ + 0.0000000000T^{0.0000} + 0.0014000000T + 0.0000000000$$

- Numero de unidades filtrantes : 4
 - Taxa media de filtracao (m3/m2.dia) : 297.20
 - Carga hidraulica disponivel (m) : 1.61

TAXAS DE FILTRACAO E NIVEIS DE OPERACAO

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	406.60580	0.38286	0.00094	TMAX = 501.29680
2	325.04110	0.30606	0.00212	TMED = 297.20000
3	256.64460	0.54395	0.00361	Coef F = 1.36812
4	200.64160	0.72457	0.00552	Niv. 1 = 1.22714
				Niv. 2 = 1.61000
				N2-N1 = 0.38286

TAXAS E NIVEIS DURANTE A LAVAGEM

FILTRO	TAXAS	PERDAS	RESIST	TMAX/MED E NIVEIS DE OPERACAO
1	454.23020	0.38286	0.00094	TMAX = 501.29680
2	390.82070	0.30606	0.00212	TMED2 = 396.26670
3	311.09140	0.54395	0.00361	Coef F = 1.02609
				Niv. 2 = 1.61000
				Niv. 3 = 1.99444
				N3-N2 = 0.38444

A P Ê N D I C E " E "

- Representação Gráfica dos Resultados de Simulações do Comportamento de SFTD.

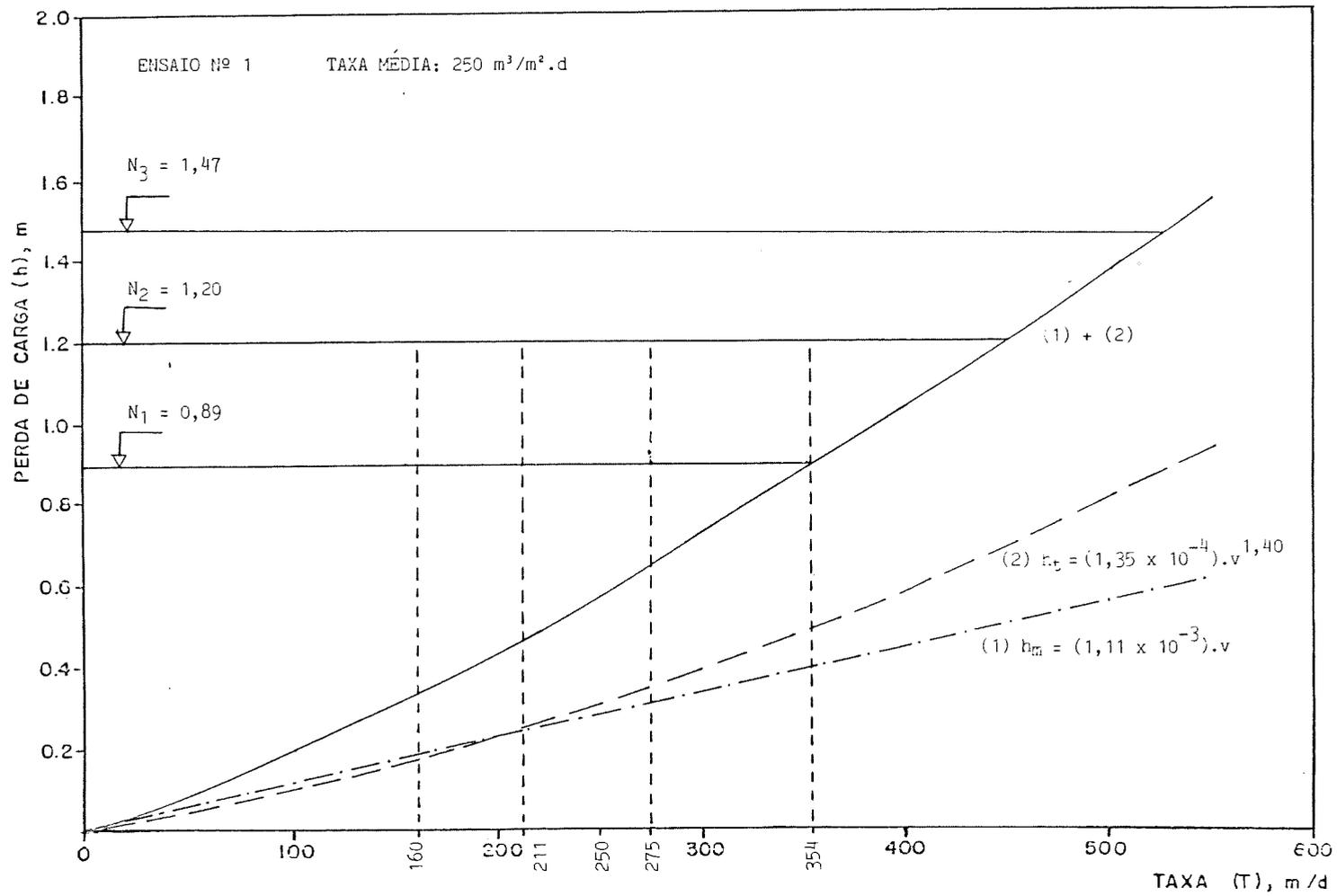


Figura E.1

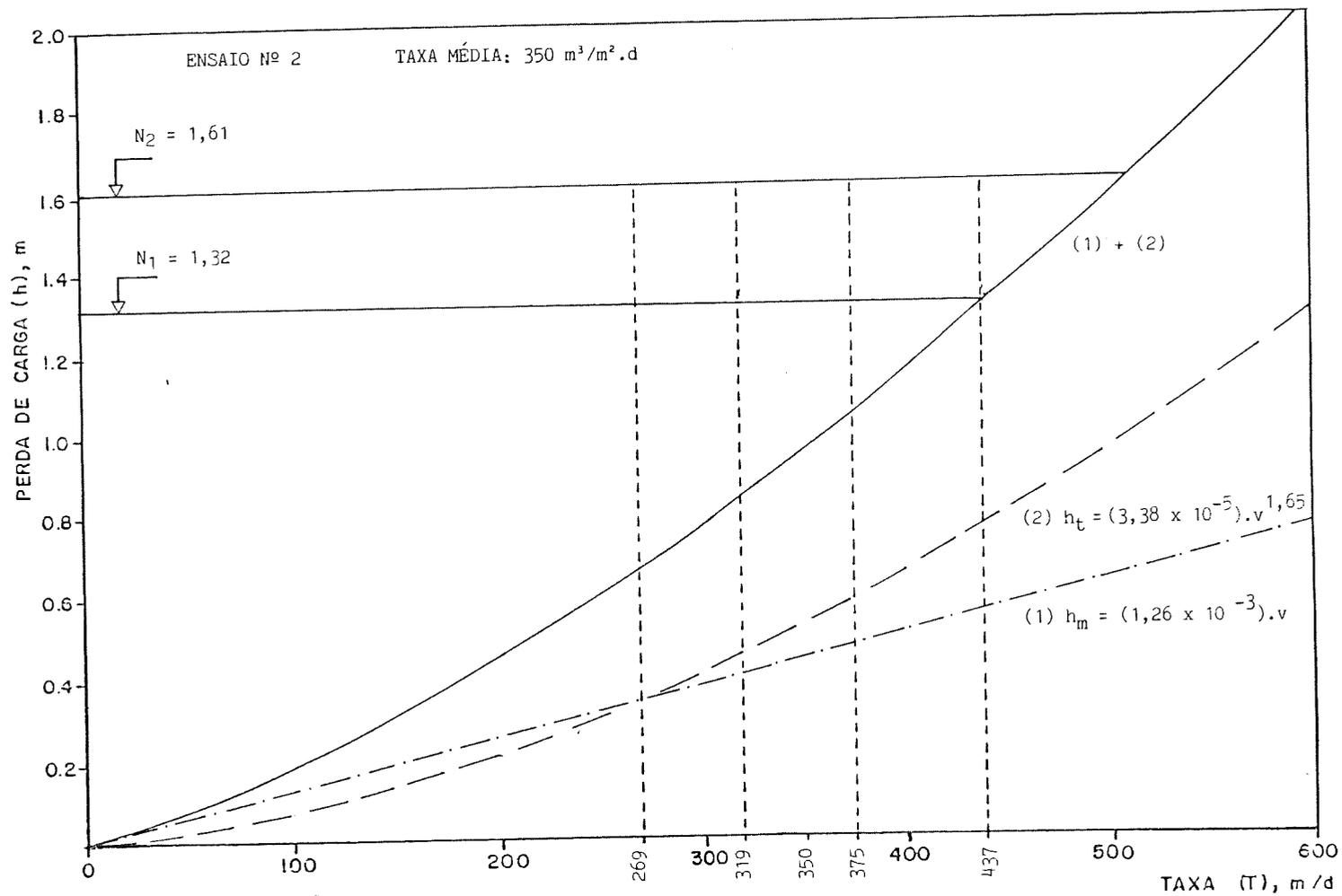


Figura E.2

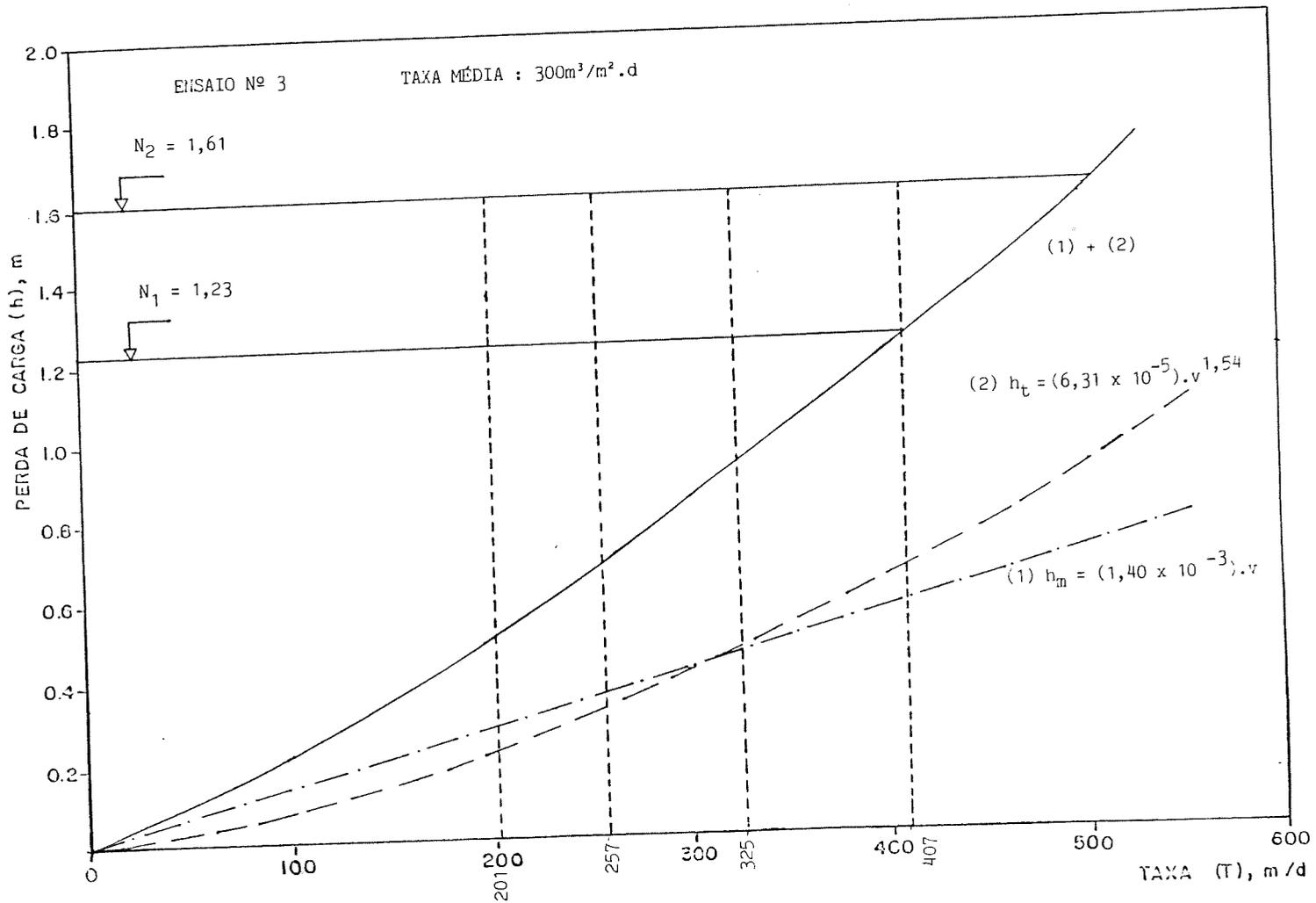


Figura E.3

A P Ê N D I C E " F "

- Quadros com Dados de Perda de Carga Total, Taxas de Filtração e Turbidez dos Ensaio da Terceira Etapa.

QUADRO F.1

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
1º	0:00	57,0	250	250	250	250	250,0	1,20	0,11	0,11	F1
	2:30	58,5	250	250	250	250	250,0	1,33	0,10	0,10	
	7:30	69,0	250	250	250	250	250,0	1,83	0,08	0,07	
2º	0:30	97,0	(340)	-	-	-	-	-	-	-	F2
	1:00	67,0	293	240	240	240	253,3	1,80	0,12	-	
	7:30	80,0	294	233	233	233	248,3	1,36	0,08	0,09	
3º	0:15	104,0	345	(405)	295	295	311,7	1,31	0,09	0,08	F3
	0:45	72,0	273	302	210	213	249,5	1,35	0,11	0,09	
	7:30	86,5	273	303	204	206	246,5	1,15	0,07	0,06	
4º	0:15	110,5	320	370	(450)	270	320,0	1,11	0,28	0,06	F4
	0:45	73,5	236	260	308	182	246,5	0,92	0,10	0,06	
	7:30	88,5	239	266	313	173	247,8	1,24	0,06	0,05	
5º	0:15	108,0	275	310	360	(460)	315,0	1,27	0,38	0,06	F1
	0:45	72,5	196	219	263	306	246,0	1,44	0,12	0,06	
	7:00	89,0	198	220	266	314	249,5	1,30	0,07	0,05	
	17:00	118,0	196	220	266	316	250,0	2,41	0,06	0,04	
6º	0:15	143,0	(490)	270	320	375	321,7	-	0,06	0,62	F2
	0:45	92,0	364	170	207	250	247,8	2,75	0,06	0,19	
	6:00	107,0	368	166	207	250	247,8	3,50	0,24	0,15	
	10:45	120,0	375	162	207	250	248,5	1,97	0,09	0,10	
7º	0:15	142,5	410	(465)	240	288	312,7	2,22	0,10	0,12	F3
	0:45	91,0	300	354	152	194	250,0	2,17	0,11	0,12	
	12:00	120,0	310	368	123	183	246,0	2,64	0,60	0,64	
8º	0:15	137,5	340	410	(465)	210	320,0	2,72	0,71	0,73	F4
	0:45	86,0	233	281	346	128	247,0	2,70	1,17	0,77	
	12:00	122,0	229	296	355	103	245,8	2,08	0,16	0,11	
9º	0:15	137,0	255	325	385	(470)	321,7	2,02	0,17	0,11	F1
	0:30	87,0	161	212	262	351	246,5	1,96	0,32	0,11	
	12:00	-	-	-	-	-	-	20	1	2	
10º	0:30	115,0	(420)	135	175	270	250,0	10	1	1	F2
	3:30	136,0	425	125	173	275	249,5	4,08	0,18	0,20	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
11 ^o	0:15	153,0	450	(500)	204	306	240,0	3,65	0,18	0,18	F3
	0:45	99,5	325	364	120	195	251,0	4,93	0,14	0,34	
	3:45	113,5	324	368	113	188	248,3	3,79	0,24	0,17	
	5:30	119,0	319	369	111	189	247,0	5,97	1,22	1,76	
12 ^o	0:15	135,0	345	410	(470)	223	326,0	15	6,9	7,2	F4
	0:45	90,0	238	285	346	127	249,0	26	15	18	
	7:00	118,0	233	289	355	118	248,8	17	10	10	
13 ^o	0:45	91,5	168	209	259	355	247,8	2,05	0,27	0,17	F1
	2:45	98,0	166	209	259	359	248,3	1,82	0,10	0,08	
	4:45	109,0	165	208	259	363	248,8	2,09	0,13	0,12	
	10:00	120,0	165	208	259	363	248,8	2,24	0,14	0,12	
14 ^o	0:15	150,0	(490)	260	315	420	331,7	2,37	0,32	0,13	F2
	0:45	92,5	361	156	188	283	247,0	2,33	0,10	0,13	
	2:45	98,5	363	150	188	283	246,0	2,14	0,07	0,10	
	7:15	111,0	365	150	188	287	247,5	3,69	0,07	0,10	
	10:15	120,0	367	153	188	288	249,0	2,40	0,08	0,09	
15 ^o	0:30	145,0	406	(500)	220	330	318,7	2,20	0,23	0,10	F3
	1:00	94,5	288	361	142	221	253,0	2,30	0,14	0,06	
	5:00	108,5	288	368	132	217	251,3	3,64	0,06	0,04	
	7:00	113,5	288	370	132	219	252,3	3,19	0,07	0,05	
	10:00	122,0	288	371	132	219	252,5	3,20	0,06	0,05	
16 ^o	0:30	148,0	375	420	(475)	260	351,7	2,30	0,78	0,05	F4
	1:00	94,5	206	283	364	155	252,0	2,20	0,11	0,04	
	5:00	105,5	204	289	365	151	252,3	1,94	0,06	0,04	
	10:30	120,0	203	289	368	148	252,0	1,84	0,05	0,04	
17 ^o	0:30	143,0	260	335	406	(475)	333,7	2,30	0,82	0,10	F1
	1:00	89,5	161	215	276	350	250,5	2,10	0,29	0,08	
	5:00	101,0	151	214	283	355	250,8	1,97	0,11	0,07	
	9:00	111,5	145	215	284	356	250,0	1,89	0,05	0,04	
	12:00	120,0	144	214	284	355	249,3	1,90	0,06	0,04	
18 ^o	0:30	146,0	(480)	262	330	406	332,7	2,24	0,26	0,46	
	1:00	91,5	355	161	211	273	250,0	2,18	0,10	0,20	
	5:30	105,0	364	154	209	274	250,3	2,21	0,06	0,07	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
18 ^o	11:00	120,0	364	154	211	275	251,0	2,15	0,06	0,06	F2
19 ^o	0:30	148,0	415	(488)	255	325	331,7	2,00	0,39	0,06	F3
	1:00	93,5	284	355	158	203	250,0	2,16	0,08	0,04	
	1:30	95,0	283	357	156	202	249,5	2,49	0,05	0,04	
	5:00	107,5	284	365	156	198	250,8	2,79	0,04	0,04	
	9:00	120,0	283	364	152	198	249,3	1,67	0,04	0,04	
20 ^o	0:15	149,5	330	420	(493)	244	331,3	-	-	-	F4
	1:00	94,0	208	283	365	145	250,3	2,40	0,08	0,04	
	1:30	97,0	208	283	365	142	249,5	2,19	0,07	0,04	
	5:30	108,5	206	284	372	138	250,0	1,94	0,04	0,04	
	9:45	120,0	206	283	372	138	250,0	1,87	0,04	0,04	
21 ^o	0:15	130,5	254	318	440	(475)	337,3	2,40	0,21	0,05	F1
	0:45	83,5	151	197	317	332	249,3	2,04	0,13	0,04	
	1:45	88,0	145	193	323	340	250,3	1,74	0,10	0,05	
	6:45	103,5	138	188	326	346	249,6	1,77	0,18	0,08	
	8:45	109,5	134	190	328	348	249,7	3,55	0,36	0,13	
	12:45	120,0	135	189	326	349	249,8	1,91	0,09	0,05	
22 ^o	0:15	138,5	(474)	222	375	392	329,7	1,82	0,26	0,56	F2
	0:45	87,5	355	133	240	265	248,3	2,06	0,14	0,25	
	1:00	89,0	355	131	243	264	248,3	1,98	0,10	0,15	
	9:00	109,5	367	119	245	267	249,6	1,15	0,07	0,06	
	12:30	120,0	368	118	243	267	249,0	2,34	0,07	0,06	
23 ^o	0:15	137,0	405	(470)	275	300	326,7	2,11	0,17	0,06	F3
	0:45	88,0	284	350	180	200	253,5	2,02	0,11	0,06	
	1:00	89,0	281	346	177	194	249,5	1,94	0,08	0,06	
	4:30	100,0	281	355	170	191	249,3	1,73	0,05	0,05	
	6:30	107,0	279	356	171	191	249,4	2,58	0,07	0,07	
	12:00	120,0	274	355	175	192	249,0	1,40	0,04	0,04	
24 ^o	0:15	146,5	320	415	(490)	233	322,7	1,46	0,12	0,05	F4
	1:00	91,5	205	279	367	143	248,5	1,38	0,08	0,04	
	1:30	95,0	205	283	370	143	250,0	1,40	0,06	0,04	
	8:30	115,5	196	286	386	134	250,6	1,15	0,04	0,03	
	10:30	120,0	194	287	383	134	249,0	1,50	0,04	0,03	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
25 ^o	0:15	139,5	225	330	418	(490)	324,3	4,00	0,10	0,03	F1
	0:45	89,0	140	213	295	349	249,3	2,41	0,07	0,05	
	1:00	91,5	133	210	297	356	249,0	2,11	0,06	0,04	
	5:30	106,0	123	209	303	364	249,7	3,28	0,05	0,04	
	8:00	115,0	124	210	301	364	249,9	2,04	0,05	0,04	
	10:00	121,5	124	210	301	364	249,9	1,91	0,04	0,03	
26 ^o	0:15	139,5	(474)	250	340	402	330,7	2,17	0,12	0,41	F2
	0:45	88,0	355	154	220	275	251,0	-	0,11	0,26	
	1:00	89,0	352	155	217	273	249,3	10	0,08	0,19	
	3:00	95,5	355	155	214	275	249,8	1,94	0,06	0,10	
	5:00	105,5	361	158	211	266	249,0	1,77	0,04	0,05	
	10:30	120,0	364	158	210	267	249,5	1,55	0,05	0,06	
27 ^o	0:15	143,5	410	(475)	250	314	324,7	1,41	0,40	0,06	F3
	0:45	91,0	285	350	160	205	250,0	1,25	0,10	0,06	
	1:00	92,5	285	346	158	204	248,2	1,20	0,09	0,06	
	9:00	110,0	290	353	150	198	247,7	0,92	0,05	0,05	
	13:00	140,0	285	355	146	192	244,5	5,0	0,55	0,44	
28 ^o	0:30	164,5	324	406	(504)	225	318,3	3,11	0,30	0,09	F4
	1:00	103,0	202	261	379	132	243,5	2,60	0,10	0,07	
	1:30	106,5	201	261	385	129	244,0	1,98	0,07	0,04	
	5:30	120,0	197	261	399	123	245,0	1,70	0,07	0,05	
29 ^o	0:30	138,5	226	295	432	(465)	317,7	1,43	0,26	0,05	F1
	1:00	88,0	150	195	310	345	250,0	1,57	0,16	0,07	
	1:30	89,5	139	191	313	344	246,8	1,69	0,10	0,05	
	4:30	98,0	132	187	320	350	247,2	1,70	0,06	0,04	
	6:00	104,0	131	186	319	351	246,8	1,74	0,10	0,05	
	11:00	116,5	135	191	319	352	249,5	1,49	0,08	0,05	
	13:00	120,0	135	191	319	352	249,5	1,03	0,08	0,05	
30 ^o	0:15	143,5	(490)	232	365	397	331,3	5,2	0,38	0,86	F2
	0:45	91,5	364	145	235	267	252,8	5,0	0,29	0,52	
	1:00	92,5	359	138	241	266	251,0	3,0	0,20	0,40	
	3:00	99,5	359	134	238	268	250,3	1,45	0,15	0,21	
	8:30	112,5	359	140	238	267	251,0	1,41	0,07	0,07	
	11:30	120,0	357	142	238	266	250,7	1,67	0,04	0,05	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
31º	0:15	145,0	403	(475)	278	303	328,0	-	0,36	0,04	F3
	0:45	93,0	277	354	178	198	251,8	1,12	0,07	0,04	
	1:00	93,5	273	352	174	194	248,1	2,22	0,07	0,04	
	2:00	97,5	275	353	172	194	248,6	1,30	0,06	0,04	
	5:00	105,5	275	360	170	192	248,9	1,43	0,05	0,05	
	8:00	112,5	273	359	171	193	249,0	1,17	0,05	0,05	
	11:30	120,0	271	357	173	193	248,5	1,35	0,04	0,04	
32º	0:15	142,0	308	446	(475)	225	326,3	1,39	0,65	0,05	F4
	0:45	88,0	200	310	345	140	248,8	1,32	0,11	0,04	
	1:00	89,0	195	306	348	137	246,6	1,30	0,10	0,04	
	2:00	90,0	194	310	355	136	248,8	1,49	0,06	0,04	
	5:30	99,0	191	308	359	132	247,5	1,65	0,05	0,03	
	7:30	102,5	192	306	365	132	248,6	1,46	0,04	0,03	
	12:30	116,5	192	299	364	135	247,5	1,71	0,05	0,03	
	13:30	120,0	195	301	366	138	250,0	1,73	0,05	0,04	
33º	0:30	145,0	235	350	408	(480)	331,0	1,46	0,50	0,04	F1
	1:00	90,5	142	222	279	352	248,7	1,67	0,07	0,04	
	1:30	93,5	140	220	281	356	249,3	1,43	0,06	0,04	
	4:30	100,5	135	219	283	360	249,4	1,75	0,16	0,07	
	9:30	114,5	135	216	283	362	249,0	2,10	0,09	0,05	
	12:00	120,0	134	216	283	362	248,8	2,40	0,07	0,04	
34º	0:15	140,0	(472)	265	325	407	332,3	2,06	0,29	0,38	F2
	0:45	86,5	350	158	208	275	247,8	1,17	0,11	0,23	
	1:15	87,5	347	162	209	277	248,8	1,14	0,10	0,18	
	5:15	97,0	361	152	204	281	250,0	2,42	0,05	0,06	
	10:15	107,5	364	150	207	281	250,0	2,82	0,07	0,09	
	15:00	120,0	364	150	207	281	250,0	3,85	0,58	0,73	
35º	0:15	142,0	406	(475)	255	315	325,3	1,90	0,23	0,10	F3
	0:45	90,5	282	355	158	205	250,0	2,68	0,19	0,11	
	1:15	92,5	276	352	158	202	246,9	2,59	0,26	0,17	
	4:15	102,0	279	358	151	198	246,5	2,84	0,13	0,11	
	7:15	110,0	281	364	153	203	250,2	3,06	0,09	0,08	
	11:15	120,0	283	365	155	204	251,8	2,76	0,06	0,05	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
36 ^a	0:30	146,0	330	420	(475)	245	331,7	1,70	0,57	0,05	F4
	1:00	91,5	215	285	355	150	251,2	1,80	0,09	0,04	
	1:30	94,5	210	284	365	150	252,2	1,80	0,07	0,04	
	5:00	103,0	206	285	370	144	251,0	1,97	0,05	0,04	
	8:30	110,5	206	281	364	148	249,5	4,4	0,07	0,05	
	12:00	120,0	206	280	364	150	250,0	1,60	0,05	0,04	
37 ^a	0:15	146,0	250	325	406	(475)	327,0	2,20	0,41	0,04	F1
	0:45	91,5	157	210	275	360	250,2	1,30	0,08	0,05	
	1:00	92,5	151	206	276	359	248,0	1,27	0,07	0,05	
	2:00	96,0	149	204	278	364	248,6	2,05	0,06	0,04	
	5:00	104,5	144	202	281	370	249,3	2,05	0,06	0,04	
	8:30	111,5	148	202	276	371	249,3	1,66	0,06	0,04	
12:00	120,0	150	201	276	371	249,4	1,79	0,04	0,03		
38 ^a	0:15	143,5	(475)	250	317	416	327,7	1,60	0,12	0,38	F2
	0:45	90,5	359	150	204	287	250,0	1,56	0,09	0,17	
	1:00	91,0	356	148	201	287	248,0	1,55	0,07	0,13	
	2:00	94,5	359	145	200	291	248,6	1,60	0,07	0,11	
	5:00	102,0	362	142	197	293	248,4	1,80	0,05	0,07	
	8:30	111,5	362	141	198	294	248,7	1,60	0,04	0,04	
12:00	120,0	358	143	198	293	248,0	1,65	0,04	0,05		
39 ^a	0:15	134,0	400	(465)	260	340	333,3	-	-	-	F3
	0:45	85,0	268	345	156	225	248,5	1,40	0,18	0,08	
	1:15	88,0	265	343	161	225	248,3	1,60	0,09	0,07	
	3:15	95,0	266	350	156	223	248,9	1,43	0,07	0,05	
	7:15	105,5	264	357	153	225	249,7	1,70	0,05	0,04	
	12:45	120,0	261	356	155	225	249,5	1,96	0,05	0,04	
40 ^a	0:30	147,0	310	415	(485)	275	333,3	-	0,20	0,06	F4
	1:00	94,0	200	285	360	170	253,8	2,10	0,12	0,05	
	1:30	96,0	192	281	364	167	251,0	1,88	0,09	0,04	
	5:00	105,0	188	281	370	162	249,9	1,40	0,06	0,04	
	10:30	120,0	186	281	377	164	252,0	1,77	0,10	0,07	
41 ^a	0:15	147,0	233	330	423	(480)	328,7	-	0,33	0,05	
	0:45	93,0	140	214	295	358	251,8	2,26	0,10	0,04	
	1:00	94,0	135	210	295	359	249,7	2,28	0,08	0,04	

QUADRO F.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
41 ^o	4:00	102,0	129	205	297	367	249,5	1,50	0,05	0,03	F1
	12:00	120,0	142	206	294	365	250,6	1,82	0,04	0,03	
42 ^o	0:30	144,0	(475)	254	344	420	339,3	2,22	0,17	0,39	F2
	1:00	89,5	351	145	222	285	250,8	1,99	0,08	0,15	
	9:00	111,0	361	136	221	289	252,0	1,46	0,06	0,07	
	13:30	120,0	364	139	222	287	253,3	1,71	0,07	0,08	
43 ^o	0:15	139,0	406	(466)	260	330	332,0	1,77	0,18	0,08	F3
	1:00	89,5	283	347	162	218	252,6	1,60	0,12	0,07	
	5:30	97,5	285	355	157	212	252,2	1,25	0,06	0,04	
	12:30	120,0	278	348	163	213	250,5	1,56	0,04	0,03	
44 ^o	0:15	133,0	324	395	(450)	250	323,0	1,26	-	0,04	F4
	1:00	85,5	206	299	340	153	249,5	1,72	0,08	0,04	
	3:00	96,0	204	301	352	153	252,5	2,20	0,06	0,04	
	6:00	105,0	206	299	356	145	251,6	1,34	0,06	0,04	
	9:30	113,5	205	295	355	143	249,4	1,62	0,07	0,05	
	12:00	120,0	205	294	359	145	250,7	1,80	0,06	0,05	
45 ^o	0:30	145,0	250	337	403	(480)	330,0	3,00	0,73	0,37	F1
	1:00	92,5	150	220	275	360	251,3	2,27	0,57	0,19	
	1:30	95,0	149	212	272	357	247,6	2,00	0,31	0,12	
	6:00	111,0	141	208	277	364	247,4	2,47	0,49	0,15	
	9:00	124,0	141	206	277	364	247,0	2,20	0,40	0,21	
46 ^o	0:15	152,0	(480)	255	330	415	333,3	1,52	0,40	0,40	F2
	1:00	95,5	362	147	201	276	246,4	1,57	0,07	0,08	
	4:30	107,0	377	142	203	283	251,4	1,68	0,05	0,05	
	10:00	120,0	378	141	203	279	250,3	1,53	0,05	0,05	
47 ^o	0:15	142,0	420	(465)	250	325	331,7	1,22	0,24	0,06	F3
	1:00	89,0	287	342	150	203	245,6	1,34	0,07	0,05	
	4:00	100,0	297	355	145	205	250,3	1,38	0,07	0,05	
	9:00	110,0	294	356	144	204	249,8	1,72	0,07	0,06	
	13:30	120,0	293	356	147	205	250,3	1,44	0,10	0,10	
48 ^o	0:15	143,0	335	410	(468)	245	330,0	2,19	0,62	0,06	F3
	1:00	90,0	219	275	355	150	249,6	1,70	0,09	0,04	
	3:30	100,0	215	278	360	143	249,0	2,00	0,06	0,04	

QUADRO F.1 - conclusão.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
			48 ^a	7:00	108,5	214	281	360	141	249,0	
	12:00	120,0	212	277	356	143	247,2	1,74	0,05	0,04	
49 ^a	0:15	145,0	260	330	406	(475)	332,0	3,00	0,20	0,04	F1
	1:00	93,0	158	211	275	355	249,7	1,87	0,06	0,03	
	4:30	103,0	151	205	275	365	249,0	1,32	0,05	0,03	
	8:00	112,0	148	205	274	367	248,5	1,46	0,04	0,03	
	12:00	120,0	148	204	271	367	247,5	1,44	0,04	0,03	
50 ^a	0:15	149,0	(480)	255	330	420	335,0	2,10	0,17	0,29	F2
	1:00	94,0	362	151	199	288	249,9	1,57	0,06	0,06	
	5:30	106,0	369	143	191	291	248,4	1,17	0,04	0,04	
	12:30	120,0	357	157	194	290	249,5	1,43	0,04	0,04	
51 ^a	0:15	148,0	415	(485)	230	340	328,3	1,94	0,38	0,08	F3
	1:00	93,0	284	355	144	222	250,0	1,59	0,12	0,06	
	6:30	110,0	289	368	128	218	250,8	1,33	0,04	0,03	
	11:00	119,0	291	371	125	218	251,0	1,16	0,04	0,03	
52 ^a	0:15	141,0	327	420	(470)	250	332,3	1,75	0,47	0,04	F4
	1:00	89,0	207	287	350	153	249,4	1,33	0,06	0,03	
	4:30	99,0	202	295	357	144	249,3	1,99	0,06	0,03	
	8:00	109,0	203	298	362	143	251,5	1,48	0,04	0,03	
	12:00	118,0	204	299	364	144	252,8	1,53	0,04	0,03	
53 ^a	0:30	141,0	250	350	406	(475)	251,5	1,19	0,55	0,03	F1
	1:00	89,0	150	230	282	350	253,0	1,06	0,07	0,03	
	1:30	90,5	149	226	277	354	251,5	1,20	0,06	0,03	
	5:00	103,0	135	222	278	362	249,3	1,59	0,04	0,03	
	8:00	109,5	133	224	279	361	249,1	1,13	0,04	0,03	
	12:00	120,0	132	227	282	365	251,3	1,20	0,04	0,03	
54 ^a	0:15	138,0	(460)	280	335	405	340,0	1,49	0,22	0,26	F2
	1:00	89,0	347	169	208	275	249,7	1,28	0,05	0,08	
	3:00	95,0	353	162	201	277	248,0	1,31	0,04	0,05	
	13:00	120,0	361	157	198	282	249,4	1,44	0,04	0,04	
55 ^a	0:15	148,0	410	(480)	225	325	320,0	1,50	-	0,05	Fim
	1:00	96,5	291	356	139	213	249,8	1,36	0,07	0,04	
	10:00	123,0	296	379	115	205	248,7	1,49	0,04	0,04	

QUADRO F.2

TAXA MÉDIA NOMINAL: 350 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
1º	0:00	95,0	358	347	357	357	354,8	-	-	-	F1
	0:30	96,0	355	341	353	352	350,0	2,57	0,58	0,56	
	5:00	107,0	352	340	349	350	347,8	1,34	0,07	0,06	
	11:00	125,0	357	344	352	359	353,0	1,32	0,05	0,04	
2º	1:00	119,0	423	318	324	330	348,7	0,92	0,06	0,11	F2
	6:00	133,0	424	315	321	330	347,4	1,10	0,05	0,05	
3º	0:15	127,0	403	430	284	290	351,6	1,23	0,10	0,06	F3
	6:30	145,5	406	444	268	278	348,9	1,24	0,04	0,04	
4º	0:15	184,0	490	525	(535)	360	458,3	1,31	0,05	0,04	F4
	1:00	122,0	352	379	419	237	346,9	1,35	0,06	0,04	
	7:30	139,5	349	385	429	223	346,5	1,49	0,05	0,04	
	9:00	149,0	350	388	443	215	349,0	1,17	0,04	0,03	
5º	1:00	127,0	275	315	370	430	347,5	1,43	0,13	0,03	F1
	7:30	151,5	268	310	375	449	350,6	1,33	0,05	0,03	
	11:00	160,0	268	311	371	452	350,5	1,58	0,05	0,03	
6º	0:15	197,0	(575)	354	420	520	431,0	2,45	0,46	0,87	F2
	1:00	139,0	466	248	303	394	352,7	2,51	0,50	0,87	
	8:30	170,0	474	235	293	404	351,6	1,40	0,04	0,04	
7º	0:30	137,0	400	460	225	330	353,8	1,40	0,08	0,05	F3
	1:00	138,5	396	457	219	323	348,7	1,32	0,07	0,05	
	7:00	161,0	397	468	207	324	349,1	1,52	0,04	0,03	
8º	0:30	127,0	315	387	439	254	348,9	1,22	0,03	0,06	F4
	3:30	138,5	315	392	447	251	351,2	1,48	0,06	0,04	
	7:00	150,0	313	392	451	249	351,2	1,16	0,05	0,04	
	10:30	160,0	311	393	457	248	352,3	1,60	0,08	0,05	
9º	0:15	195,0	378	460	534	(550)	457,0	3,50	0,18	0,06	F1
	1:00	133,0	245	325	384	447	350,2	3,75	0,11	0,05	
	7:00	155,0	233	321	388	458	350,0	1,82	0,05	0,04	
	9:00	162,5	234	323	390	462	352,2	1,76	0,05	0,04	
10º	0:15	199,0	(540)	395	460	535	463,3	1,73	0,17	0,40	F2
	1:00	133,5	452	259	317	384	353,0	2,26	0,10	0,21	
	9:00	167,0	467	243	309	387	351,6	2,39	0,09	0,10	

QUADRO F.2 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 350 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
11 ^o	0:15	198,0	535	(540)	375	450	453,3	2,39	0,09	0,10	F3
	1:00	138,5	387	446	232	311	344,0	1,98	0,13	0,09	
	2:00	143,5	393	453	234	314	348,3	2,10	0,08	0,06	
	5:00	154,0	395	456	225	311	346,5	2,10	0,06	0,05	
	7:00	161,0	401	458	228	314	350,0	2,12	0,05	0,04	
12 ^o	0:15	198,0	470	540	(570)	385	465,0	2,16	-	0,05	F4
	1:00	132,0	330	390	439	249	352,0	2,20	0,08	0,04	
	7:00	151,5	318	386	443	230	344,0	2,50	0,04	0,03	
	8:30	160,0	318	386	443	230	344,0	-	-	-	
13 ^o	0:15	199,0	375	455	530	(570)	453,3	2,10	0,06	0,04	F1
	1:00	135,0	246	314	384	444	347,0	2,10	0,10	0,03	
	3:30	148,0	246	317	391	454	352,2	2,06	0,05	0,03	
	7:00	160,0	244	315	393	457	351,9	1,90	0,05	0,03	
14 ^o	0:15	205,0	(585)	380	470	550	467,0	-	0,08	-	F2
	1:00	134,5	443	244	319	388	348,6	2,07	0,10	0,16	
	6:00	160,0	457	229	317	397	349,8	2,21	0,07	0,07	
15 ^o	0:15	197,0	535	(520)	390	470	465,0	2,05	0,59	0,06	F3
	1:00	136,0	390	440	246	333	352,2	1,65	0,07	0,03	
	7:00	160,0	393	454	231	327	351,3	1,86	0,07	0,04	
16 ^o	0:15	194,0	460	535	(560)	395	463,3	1,78	0,16	0,04	F4
	1:00	132,0	324	387	437	259	351,8	1,92	0,09	0,03	
	9:00	160,0	317	392	446	239	348,5	2,00	0,09	0,04	
17 ^o	0:15	205,0	390	475	535	(580)	466,7	-	0,18	-	F1
	1:00	137,0	257	327	383	446	353,3	2,08	0,11	0,04	
	6:30	161,0	244	324	382	452	350,5	2,43	0,10	0,03	
18 ^o	0:15	198,0	(580)	395	455	530	460,0	2,46	0,17	0,20	F2
	1:00	132,0	441	264	316	384	351,3	3,35	0,09	0,08	
	7:30	160,0	451	257	307	388	350,9	2,12	0,13	0,07	
19 ^o	0:15	206,0	540	(560)	390	470	466,7	1,29	0,13	0,05	F3
	1:00	135,5	384	439	257	325	351,1	1,11	0,07	0,04	
	8:30	160,0	387	451	239	321	349,6	1,31	0,05	0,03	

QUADRO F.2 - conclusão.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 350 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
20 ^a	0:15	197,0	456	532	(555)	388	458,7	1,42	0,18	0,07	
	1:00	134,0	310	384	437	256	346,7	1,75	0,11	0,06	
	7:00	155,0	304	391	443	246	346,1	1,15	0,05	0,03	
	8:30	160,5	300	390	447	246	345,6	1,40	0,04	0,03	F4
21 ^a	0:15	210,0	390	465	540	(580)	465,0	1,54	-	0,03	
	1:00	139,0	228	325	382	444	344,7	1,60	0,06	0,03	Fim

QUADRO F. 3

TAXA MÉDIA NOMINAL: 300 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
1º	0:00	75,0	296	294	297	295	295,5	1,55	0,14	0,12	F1
	1:00	77,5	295	296	298	295	296,0	1,32	0,08	0,07	
	9:00	93,5	294	299	299	298	297,5	1,33	0,05	0,04	
	12:30	101,5	296	299	300	300	299,0	1,54	0,06	0,05	
2º	0:15	138,0	(456)	390	390	390	390,0	1,62	0,16	0,25	F2
	0:45	94,0	347	277	277	277	294,5	1,68	0,09	0,17	
	11:30	122,5	347	279	276	276	294,0	1,70	0,05	0,05	
3º	0:30	161,0	430	(490)	360	360	383,3	1,70	0,14	0,05	F3
	1:00	109,0	308	377	248	247	295,0	1,87	0,08	0,04	
	7:00	132,0	308	384	244	241	294,3	3,00	0,04	0,04	
	12:00	152,0	304	388	248	240	295,0	2,28	0,05	0,04	
4º	0:15	192,0	380	470	(530)	310	386,6	2,50	0,14	0,07	F4
	1:00	124,5	248	324	414	192	294,5	2,40	0,07	0,04	
	11:15	160,0	245	330	420	185	295,0	1,12	0,08	0,06	
5º	0:15	188,0	295	385	470	(530)	383,3	1,10	0,22	0,06	F1
	0:45	124,0	193	262	338	411	301,0	1,14	0,16	0,06	
	3:15	137,0	179	257	340	415	297,5	2,50	0,11	0,06	
	9:30	160,5	181	257	332	414	296,0	1,76	0,08	0,05	
6º	0:15	205,0	(550)	305	395	490	397,5	2,52	0,22	0,57	F2
	0:45	138,0	430	184	248	340	300,5	2,46	0,12	0,33	
	3:45	150,5	434	180	247	337	299,5	2,25	0,18	0,27	
	4:15	153,5	436	180	247	338	300,3	1,88	0,22	0,30	
	5:30	159,5	440	185	255	345	306,3	1,62	0,13	0,17	
7º	0:15	192,0	520	(535)	300	405	408,3	1,63	0,37	0,12	F3
	0:45	121,5	352	402	185	262	300,3	1,74	0,18	0,11	
	2:15	128,5	356	403	180	260	299,8	1,60	0,10	0,08	
	8:15	148,5	361	410	172	261	301,0	2,32	0,06	0,04	
	10:00	160,0	356	411	166	249	295,5	2,23	0,05	0,04	
8º	0:15	187,0	410	475	(525)	295	393,3	2,19	-	0,04	F4
	0:45	121,0	277	330	403	187	298,8	2,00	0,08	0,04	
	5:45	139,5	277	332	402	178	297,3	2,12	0,07	0,05	
	12:00	160,5	277	333	402	180	298,0	2,68	0,11	0,09	

QUADRO F.3 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 300 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
9 ^o	0:15	190,0	325	395	460	(525)	393,3	2,68	0,41	0,08	F1
	0:45	123,5	211	257	317	404	297,3	2,48	0,17	0,07	
	10:45	155,5	211	254	313	395	293,3	1,58	0,06	0,05	
	11:45	160,5	211	257	316	398	295,5	1,70	0,04	0,03	
10 ^o	0:15	191,0	(530)	310	380	460	383,3	1,69	-	0,32	F2
	1:00	128,0	412	198	249	327	296,5	1,81	0,06	0,11	
	6:00	151,0	421	195	247	327	297,5	1,77	0,05	0,05	
	8:30	160,5	419	196	248	326	297,3	2,00	0,05	0,06	
11 ^o	0:15	197,0	495	(530)	290	375	386,7	1,93	-	0,04	F3
	1:00	129,5	342	415	183	248	297,0	1,78	0,06	0,04	
	4:30	140,0	343	415	179	251	297,0	1,49	0,06	0,04	
	9:45	160,0	341	417	179	249	296,5	2,00	0,04	0,04	
12 ^o	0:15	195,0	390	490	(550)	290	390,0	1,52	-	0,06	F4
	0:45	125,0	259	331	411	181	295,5	2,76	0,13	0,06	
	4:15	138,5	251	335	414	174	293,5	2,34	0,18	0,14	
	10:15	165,0	246	338	412	174	292,5	2,54	0,04	0,04	
13 ^o	0:15	195,0	275	375	460	(530)	370,0	2,12	0,21	0,04	F1
	1:00	128,5	173	249	324	417	290,8	1,68	0,09	0,03	
	1:30	134,0	169	253	330	427	294,8	1,61	0,08	0,03	
	8:45	160,5	162	253	332	428	293,8	2,45	0,18	0,08	
14 ^o	0:15	193,0	(540)	285	380	490	385,0	1,53	-	-	F2
	1:00	127,0	411	177	249	344	295,3	1,38	0,06	0,09	
	2:15	132,0	415	174	249	347	296,3	1,15	0,05	0,06	
	7:45	150,0	420	169	251	349	297,3	1,80	0,05	0,06	
	10:45	161,0	423	169	253	351	299,0	1,50	0,05	0,06	
15 ^o	0:15	197,0	490	(540)	285	400	391,7	-	0,20	0,06	F3
	1:00	129,0	340	411	179	266	299,0	1,62	0,08	0,06	
	4:45	140,0	349	416	169	263	299,3	1,51	0,07	0,07	
	10:15	162,0	350	425	160	260	298,8	2,21	0,05	0,04	
16 ^o	0:15	200,0	395	490	(540)	295	393,3	1,98	0,48	0,07	F4
	1:15	131,0	264	336	424	177	300,3	1,97	0,17	0,09	
	2:15	137,0	263	338	427	173	300,3	2,10	0,12	0,08	
	9:15	162,0	265	342	431	163	300,3	2,18	0,05	0,04	

QUADRO F.3 - conclusão.

TAXA MÉDIA NOMINAL: 300 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m.											
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA (cm)	TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/dia)					TURBIDEZ (UT)			LAV.
			F1	F2	F3	F4	MÉDIA	AFL.	EFL. TOTAL	EFL. F1	
17 ^a	0:15	193,0	300	395	490	(540)	395,0	2,91	0,16	0,04	F1
	0:45	126,0	192	260	342	408	300,5	1,74	0,07	0,03	
	7:00	143,5	182	262	345	408	299,3	1,70	0,04	0,03	
	12:00	160,0	186	263	346	405	300,0	1,75	0,05	0,03	
18 ^a	0:15	198,0	(530)	300	400	470	390,0	-	0,16	0,26	F2
	1:00	131,0	419	189	270	328	301,5	2,29	0,05	0,09	
	7:00	151,0	423	178	273	333	301,8	1,94	0,08	0,10	
	10:15	164,0	421	174	275	335	301,3	1,76	0,05	0,06	
19 ^a	0:15	202,0	490	(550)	310	390	396,7	2,73	0,34	0,04	F3
	0:45	131,5	334	415	196	249	298,5	2,39	0,06	0,04	
	8:45	161,0	327	416	193	247	295,8	1,84	0,04	0,04	
20 ^a	0:15	200,0	380	485	(540)	285	383,3	3,07	0,22	0,13	Fim
	0:45	129,0	249	334	421	179	295,8	2,40	0,19	0,12	
	9:00	169,0	239	335	423	168	291,3	2,14	0,04	0,03	

A P Ê N D I C E " G "

- Curvas com Valores da Perda de Carga Total e das Taxas de Filtração, em Função do Tempo, nos Ensaios da Terceira Etapa.

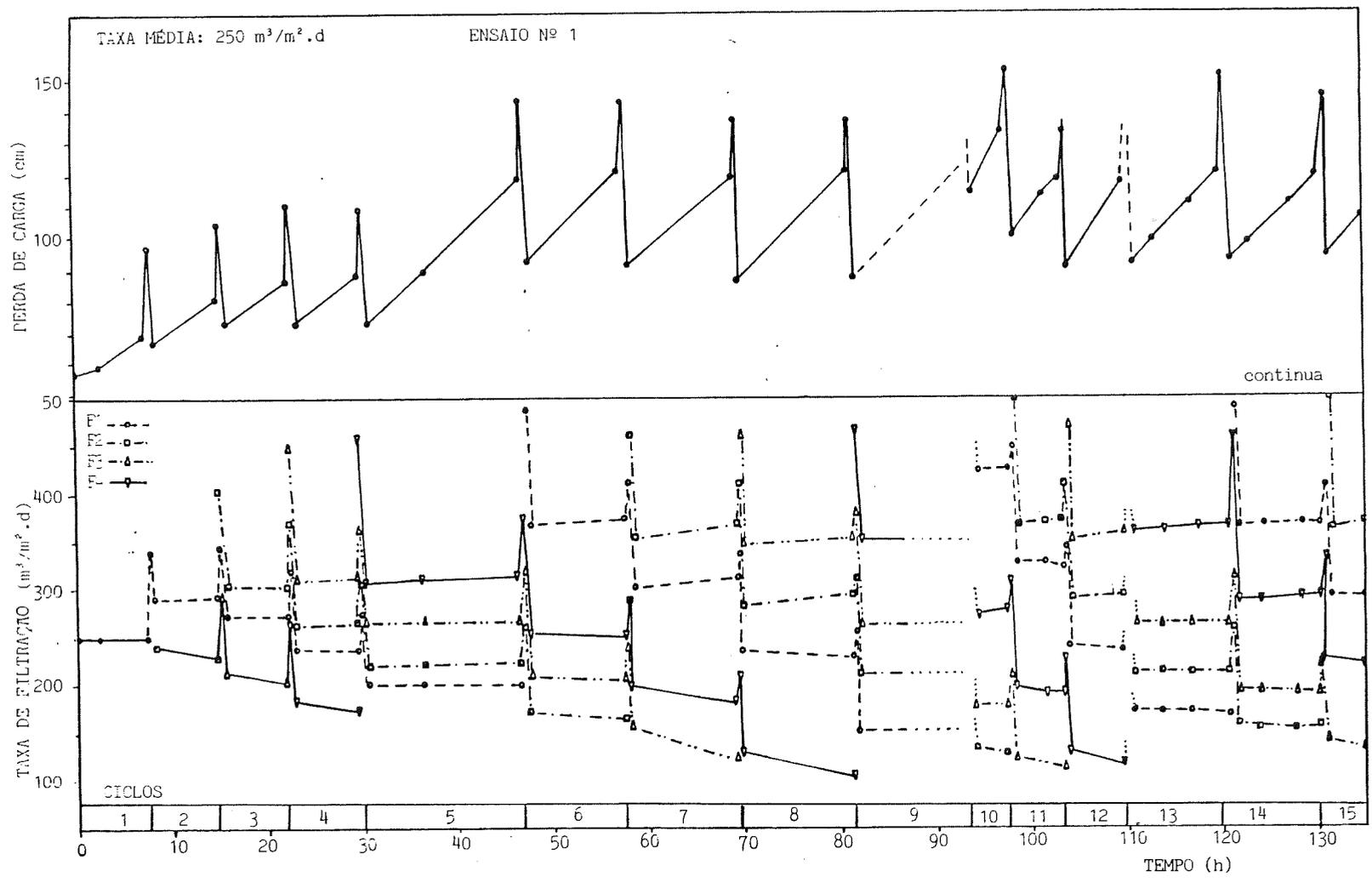


Figura G.1

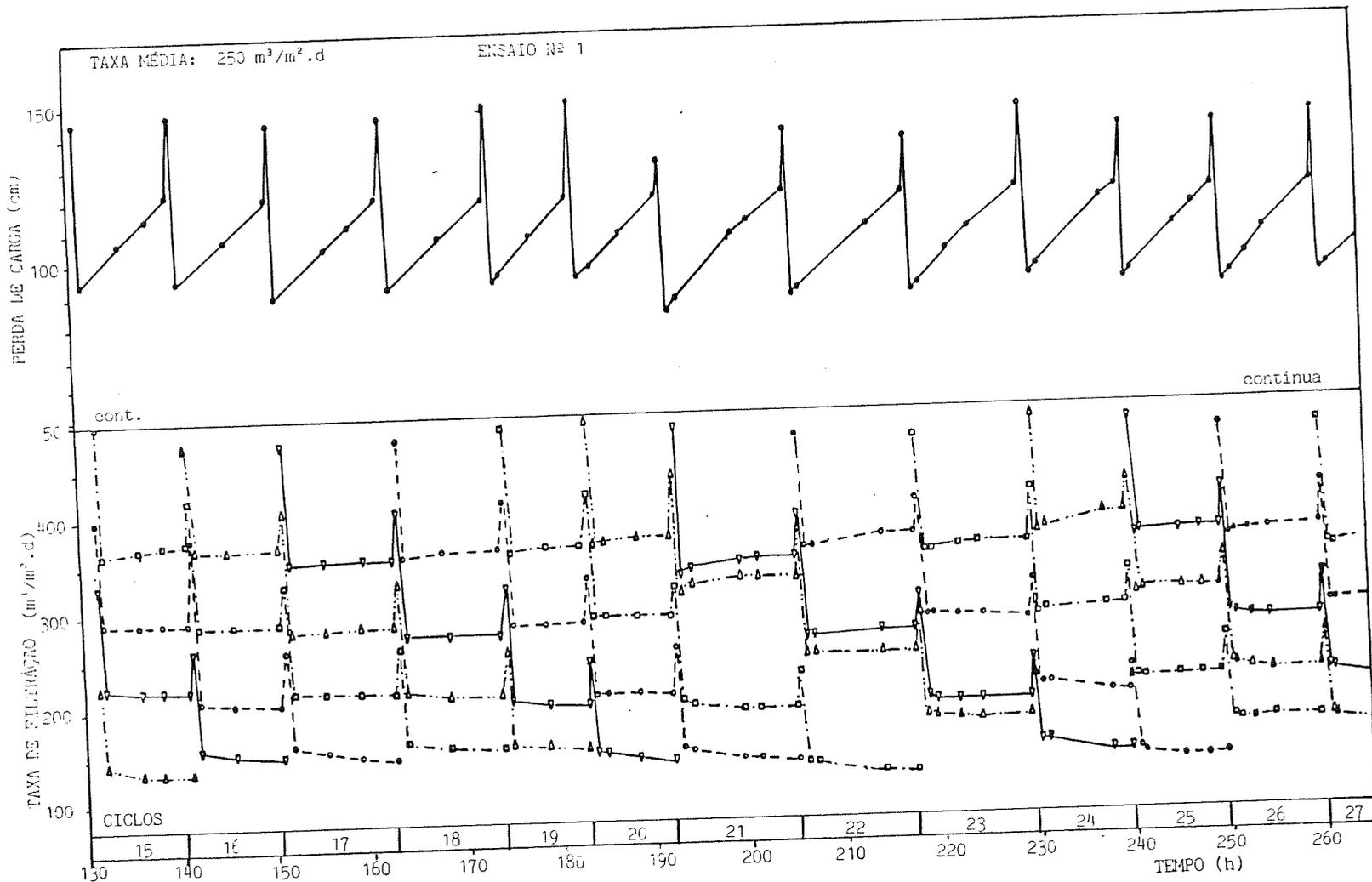


Figura G.1 (cont.)

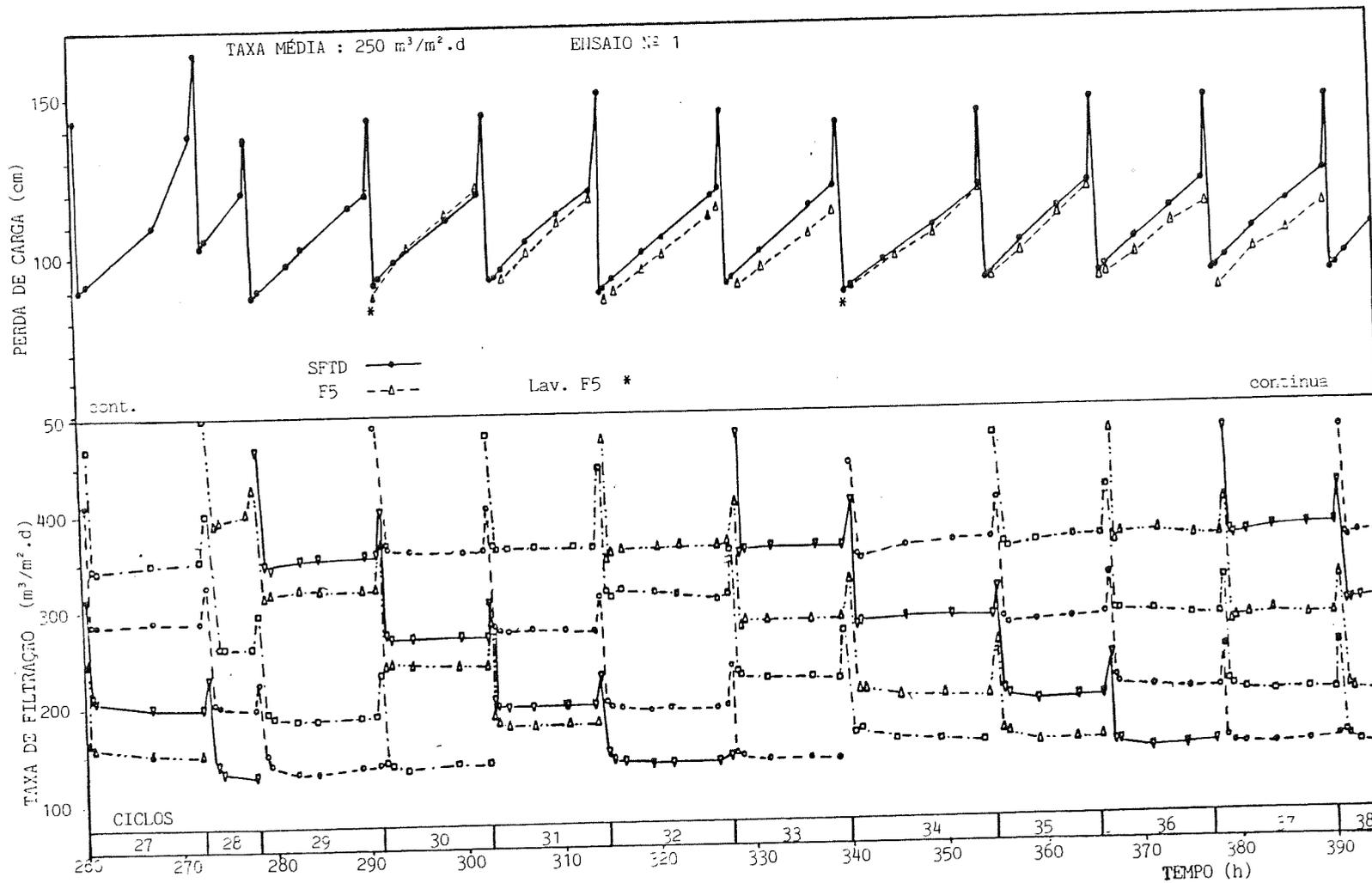


Figura G.1 (cont.)

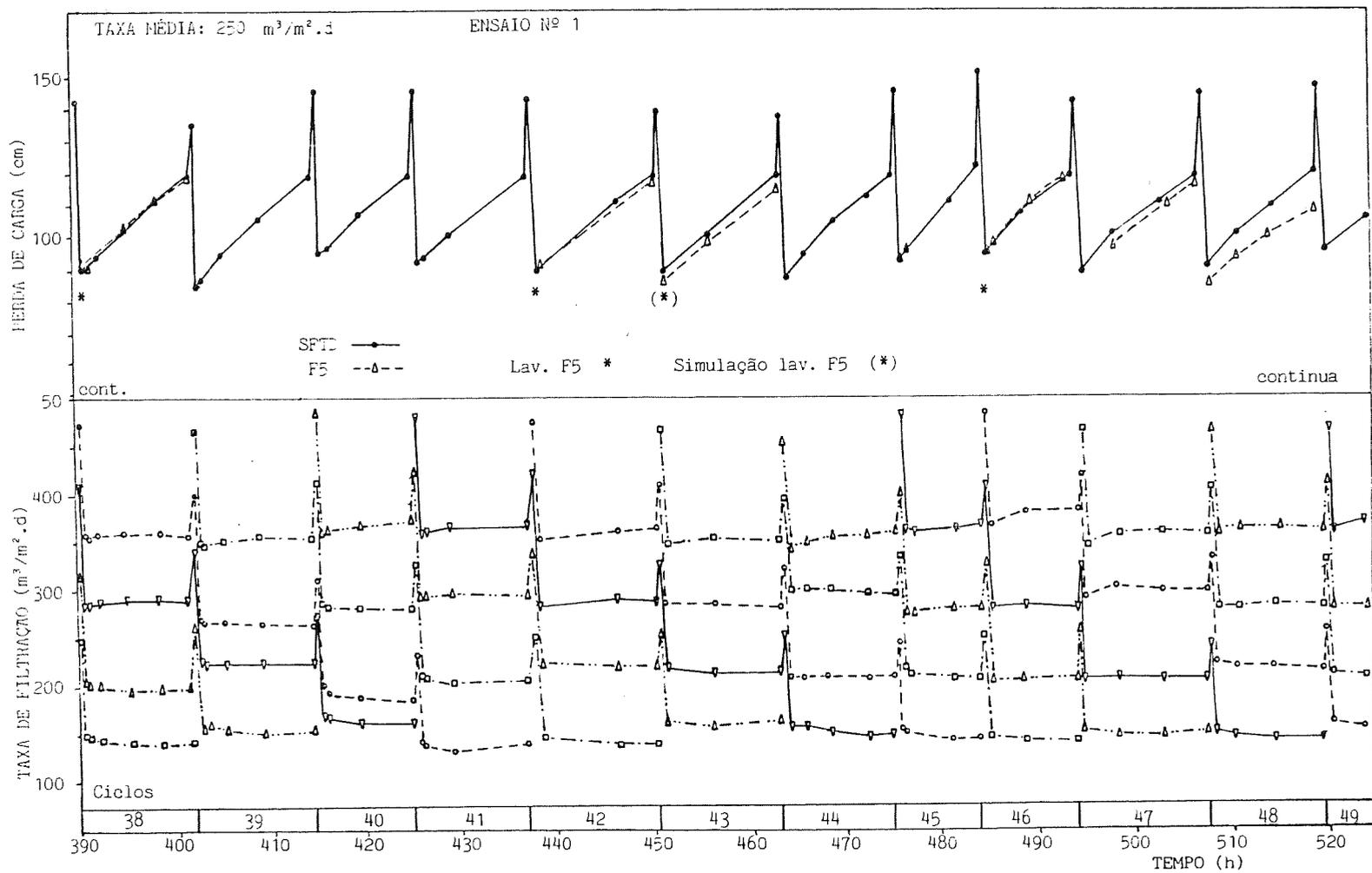


Figura G.1 (cont.)

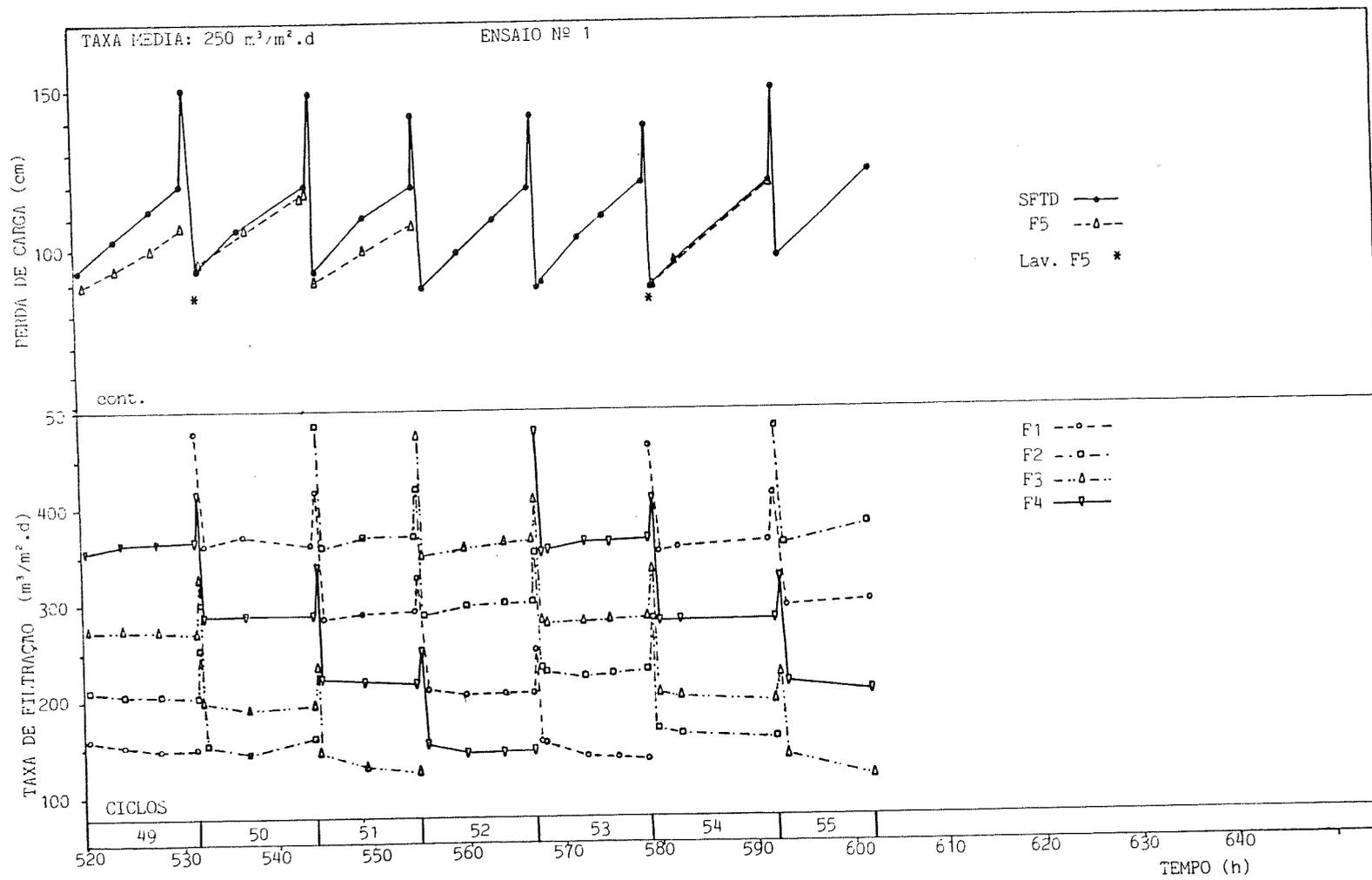


Figura G.1 (conclusão)

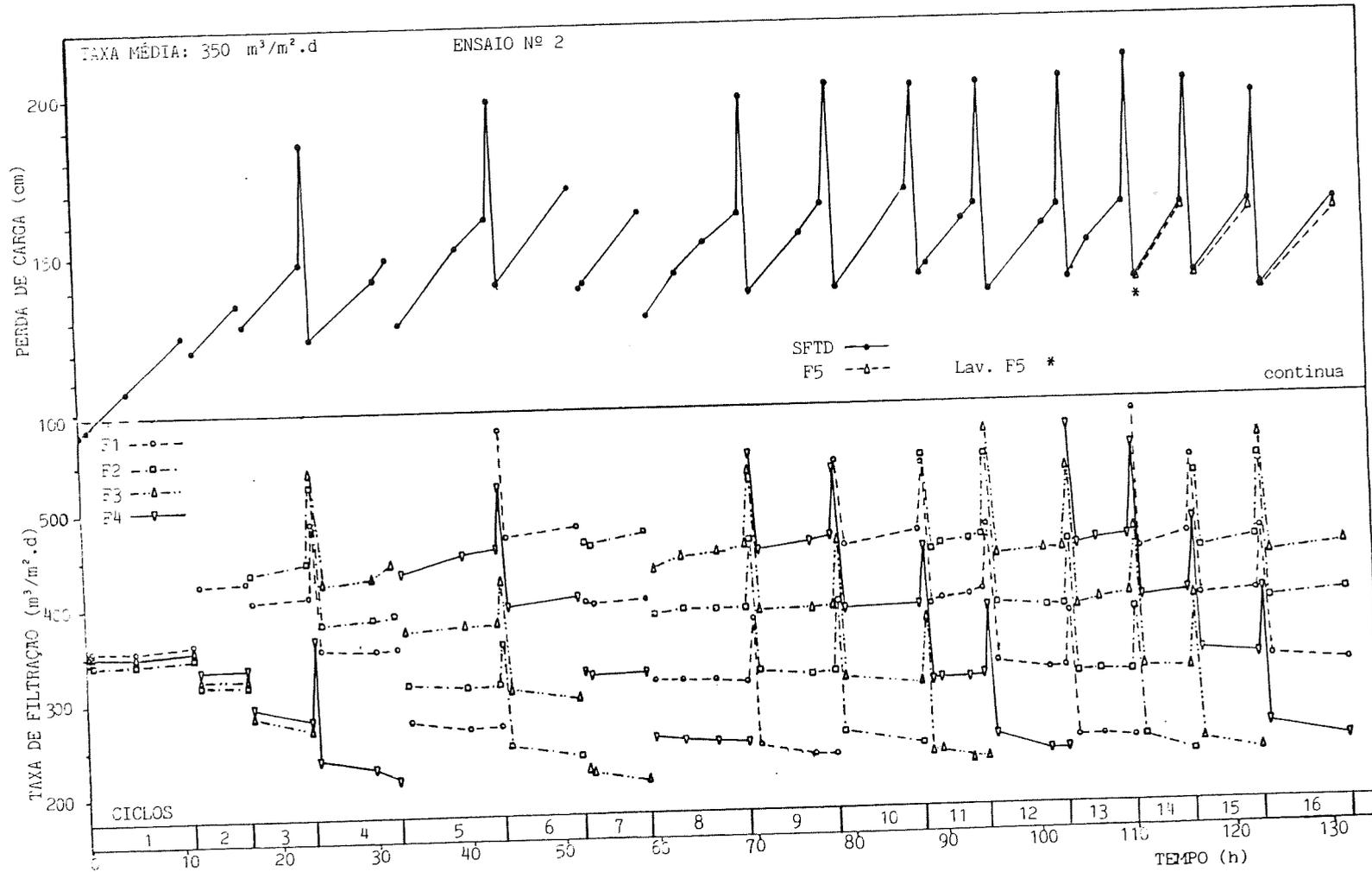


Figura G.2

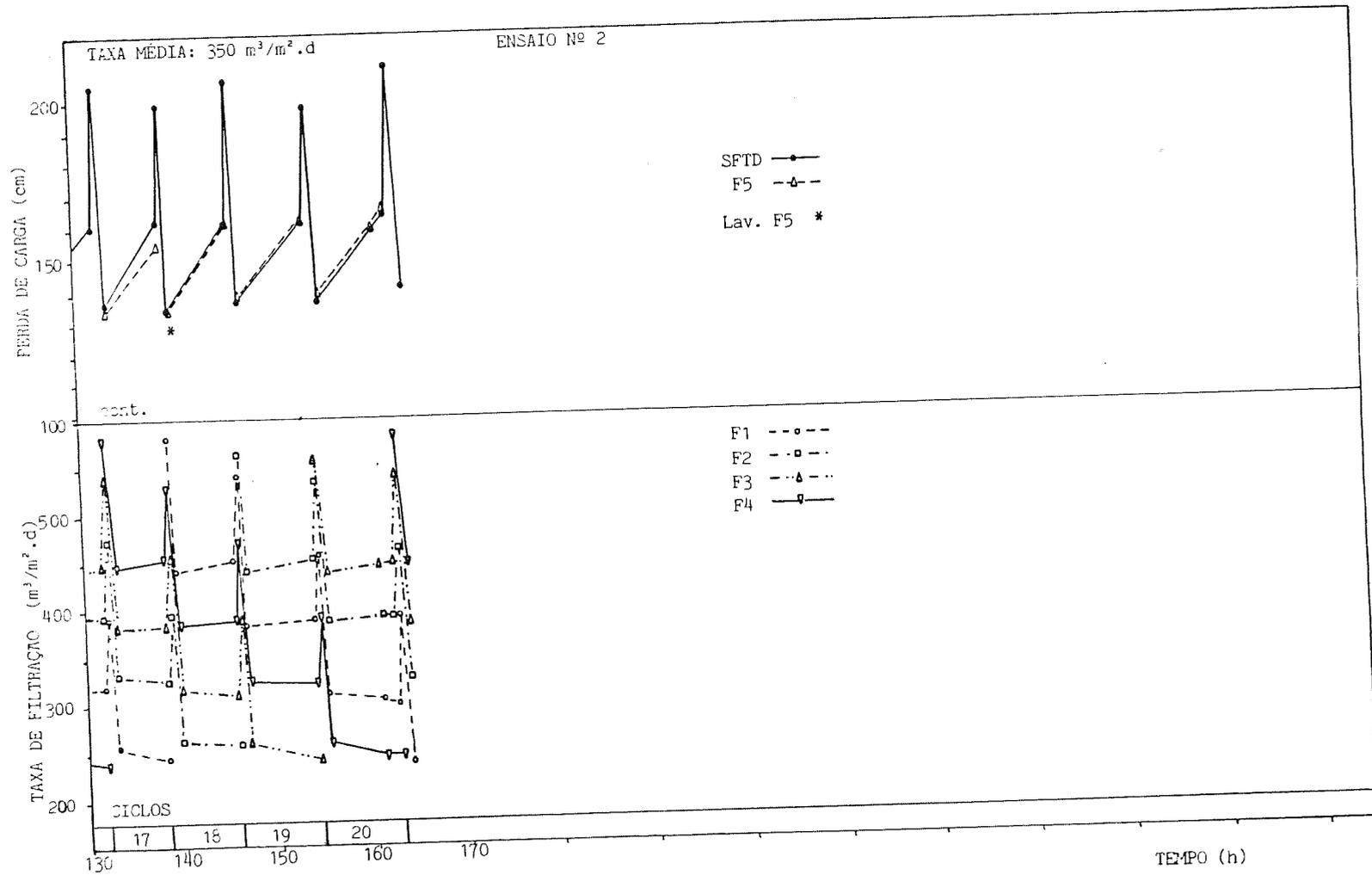


Figura G.2 (conclusão)

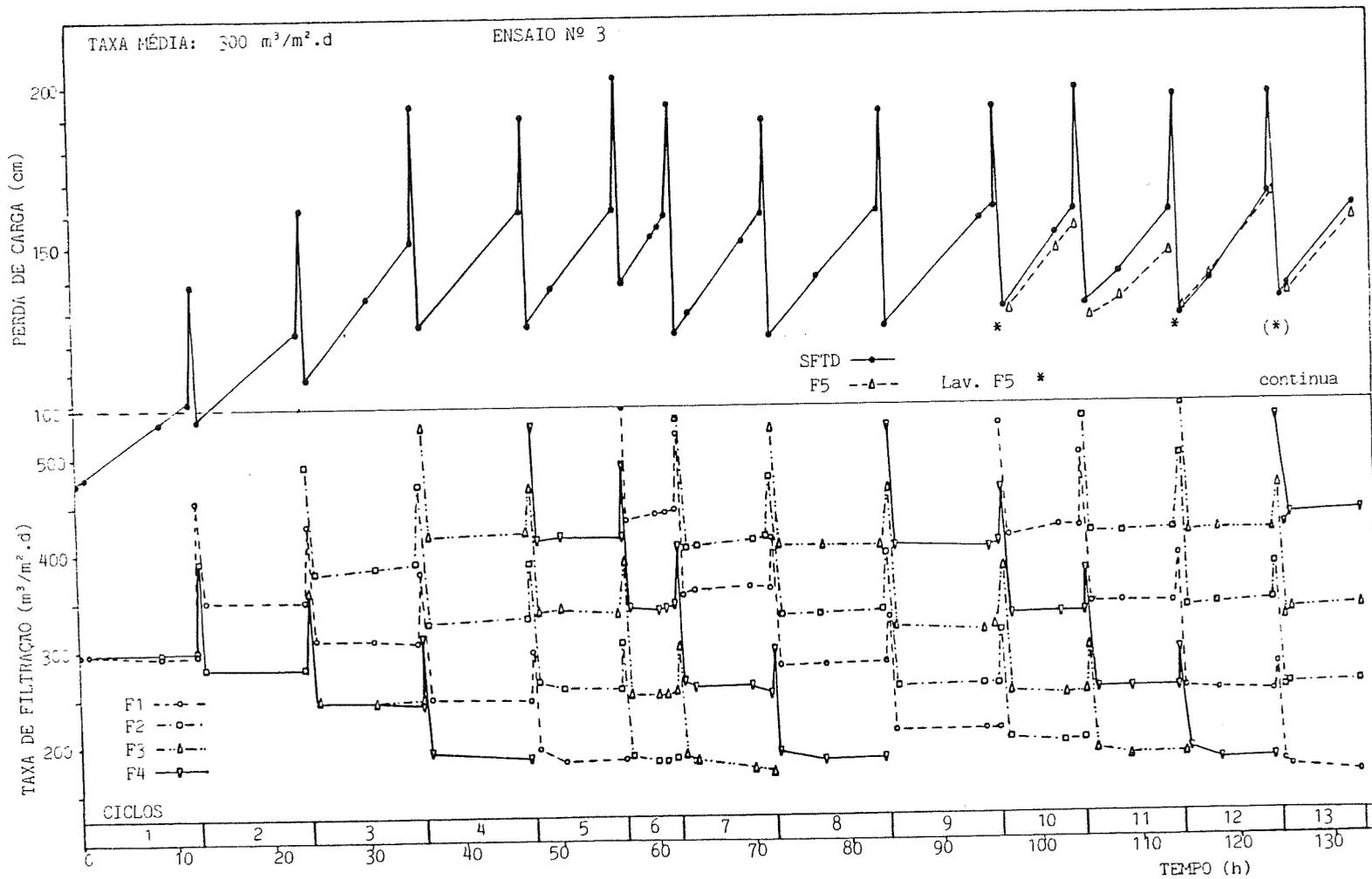


Figura G.3

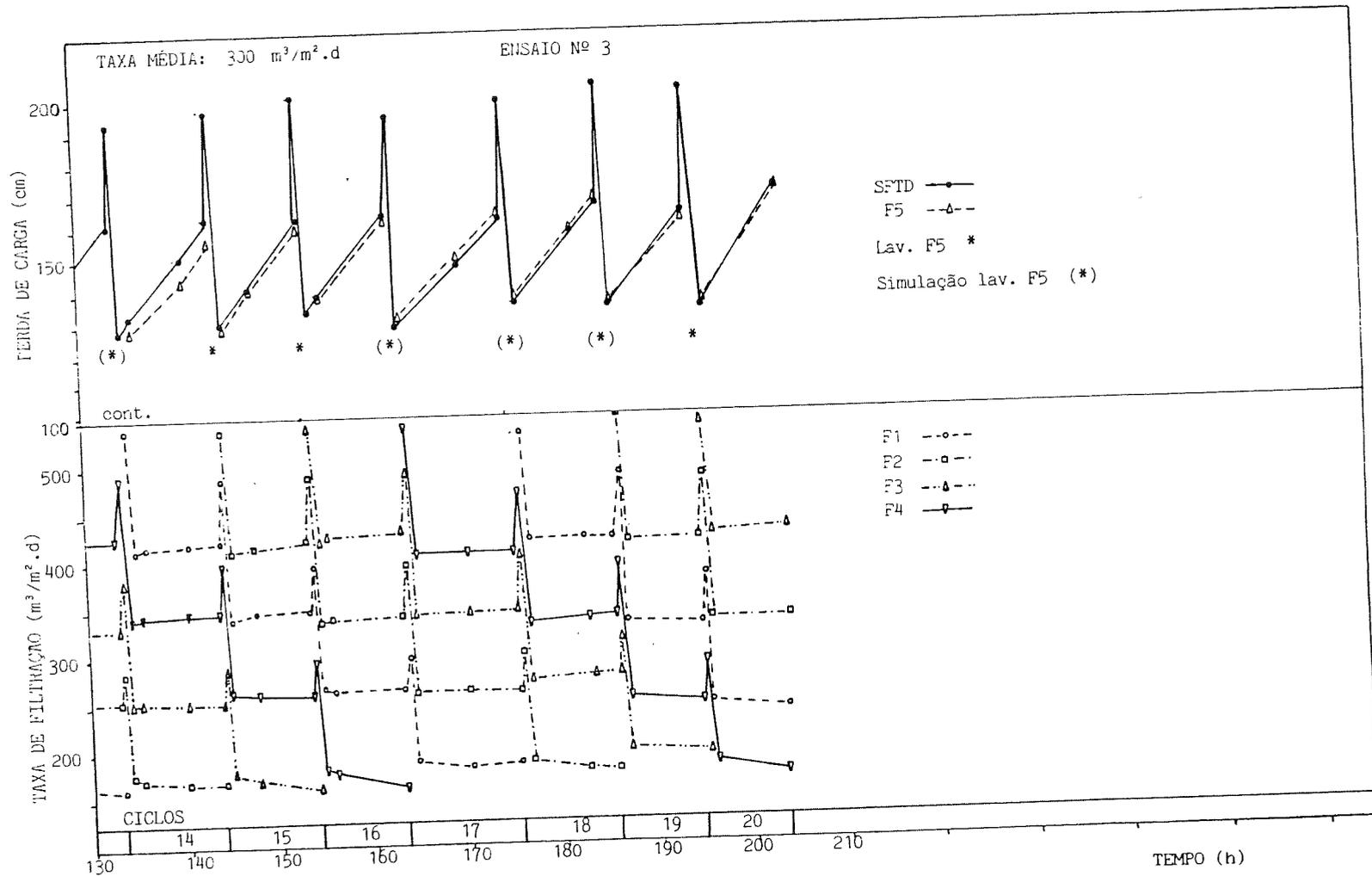


Figura G.3 (conclusão)

A P Ê N D I C E " H "

- Quadros com Valores das Taxas de Filtração em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa.

QUADRO H.1

TAXA MÉDIA		NOMINAL: 250 m ³ /m ² .d									CARGA HIDRÁULICA TOTAL: 1,20 m			
CICLO	FILTRO LAVADO	TAXAS DE FILTRAÇÃO (I=inicial,F=final,M=média) (m ³ /m ² .d)												
		Max.			T 2			T 3			Min.			Média
		I	F	M	I	F	M	I	F	M	I	F	M	
16	F3	364	368	366	283	289	288	206	203	204	155	148	151	252,3
17	F4	350	355	354	276	284	282	215	214	214	161	144	150	250,0
18	F1	355	364	362	273	275	274	211	211	210	161	154	156	250,5
19	F2	355	364	362	284	283	283	203	198	199	158	152	155	249,8
20	F3	365	372	370	283	283	283	208	206	207	145	138	139	249,8
26	F1	355	364	360	275	267	269	220	210	212	154	158	157	249,5
27	F2	350	355	351	285	285	287	205	192	199	160	146	156	248,3
33	F4	352	362	360	279	283	283	222	216	218	142	134	136	249,3
34	F1	350	364	359	275	281	280	208	207	206	158	150	153	249,5
35	F2	355	365	360	282	283	280	205	204	202	158	155	154	249,0
36	F3	355	364	366	285	280	284	215	206	206	150	150	147	250,8
37	F4	360	371	369	275	276	278	210	201	203	157	150	148	249,5
38	F1	359	358	360	287	293	293	204	198	198	150	143	143	248,5
42	F1	351	364	358	285	287	287	222	222	222	145	139	139	251,5
43	F2	347	348	350	283	278	282	218	213	213	162	163	160	251,3
44	F3	340	359	354	299	294	298	206	205	205	153	145	147	251,0
45	F4	357	364	362	272	277	275	212	206	209	149	141	144	247,5
46	F1	362	378	374	276	279	280	201	203	203	147	141	143	250,0
47	F2	342	356	354	287	293	294	203	205	204	150	147	146	249,5
48	F3	355	356	359	275	277	279	219	212	214	150	143	143	248,8
49	F4	355	367	364	275	271	274	211	204	206	158	148	151	248,8
50	F1	362	357	364	288	290	290	199	194	193	151	157	149	249,0
51	F2	355	371	365	284	291	288	222	218	219	144	125	132	251,0
52	F3	350	364	358	287	299	295	207	204	204	153	144	145	250,5
53	F4	354	365	361	282	282	279	226	227	224	149	132	137	250,3
54	F1	347	361	356	275	282	279	208	198	202	169	157	161	249,5
Médias		354	363	361	281	283	283	211	207	208	153	146	148	249,8

Médias (26 ciclos)

- . Taxa Máxima : (361 ± 6) m³/m².d (c.v.= 1,6 %)
- . Taxa 2 : (283 ± 7) m³/m².d (c.v.= 2,5 %)
- . Taxa 3 : (208 ± 8) m³/m².d (c.v.= 3,7 %)
- . Taxa Mínima : (148 ± 8) m³/m².d (c.v.= 5,1 %)

QUADRO H.2

TAXA MÉDIA NOMINAL: 350 m ³ /m ² .d		CARGA HIDRÁULICA TOTAL: 1,60 m												
CICLO	FILTRO LAVADO	TAXAS DE FILTRAÇÃO (I=inicial, F=final, M=média) (m ³ /m ² .d)												
		Max.			T 2			T 3			Min.			Média
		I	F	M	I	F	M	I	F	M	I	F	M	
9	F4	447	462	454	384	390	387	325	323	323	245	234	238	350,5
10	F1	452	467	460	384	387	386	317	309	313	259	243	251	352,5
11	F2	446	458	455	387	401	395	311	314	313	232	228	229	348,0
12	F3	439	443	441	390	386	388	330	318	323	249	230	238	347,5
13	F4	444	457	453	384	393	390	314	315	316	246	244	245	351,0
14	F1	443	457	450	388	397	393	319	317	318	244	229	237	349,5
15	F2	440	454	447	390	393	392	333	327	330	246	231	239	352,0
16	F3	437	446	441	387	392	390	324	317	321	259	239	249	350,3
17	F4	446	452	449	383	382	383	327	324	326	257	244	251	352,3
18	F1	441	451	446	384	388	386	316	307	312	264	257	261	351,3
19	F2	439	451	445	384	387	386	325	321	323	257	239	248	350,5
20	F3	437	447	441	384	390	388	310	300	306	256	246	250	346,3
Médias		443	454	449	386	391	389	321	316	319	251	239	245	350,1

Médias (12 ciclos)

- . Taxa Máxima : (449 ± 6) m³/m².d (c.v.= 1,4 %)
- . Taxa 2 : (389 ± 3) m³/m².d (c.v.= 0,9 %)
- . Taxa 3 : (319 ± 7) m³/m².d (c.v.= 2,2 %)
- . Taxa Mínima : (245 ± 9) m³/m².d (c.v.= 3,5 %)

QUADRO H.3

TAXA MÉDIA NOMINAL : 300 m ³ /m ² .d · CARGA HIDRÁULICA TOTAL: 1,60 m														
CICLO	FILTRO LAVADO	TAXAS DE FILTRAÇÃO (I=inicial, F=final, M=média) (m ³ /m ² .d)												
		Máx.			T 2			T 3			Min.			Média
		I	F	M	I	F	M	I	F	M	I	F	M	
4	F3	414	420	417	324	330	327	248	245	247	192	185	189	295,0
5	F4	411	414	414	338	332	337	262	257	258	193	181	182	297,8
7	F2	402	411	407	352	356	358	262	249	260	185	166	176	300,0
8	F3	403	402	402	330	333	332	277	277	277	187	180	181	297,8
9	F4	404	398	399	317	316	315	257	257	256	211	211	211	295,2
10	F1	412	419	418	327	326	327	249	248	248	198	196	196	297,3
11	F2	415	417	416	342	341	342	248	249	250	183	179	180	297,0
12	F3	411	412	413	331	338	335	259	246	251	181	174	175	293,5
13	F4	417	428	427	324	332	331	249	253	253	173	162	166	294,3
14	F1	411	423	418	344	351	348	249	253	250	177	169	171	296,8
15	F2	411	425	418	340	350	347	266	260	263	179	160	168	299,0
16	F3	424	431	429	336	342	340	264	265	264	177	163	169	300,5
17	F4	408	405	407	342	346	344	260	263	262	192	186	186	299,8
18	F1	419	421	421	328	335	332	270	275	272	189	174	181	301,5
19	F2	415	416	416	334	327	331	249	247	248	196	193	195	297,5
20	F3	421	423	422	334	335	335	249	239	244	179	168	174	293,8
Médias		412	417	415	334	337	336	258	255	256	187	178	181	297,0

Médias (13 ciclos)

- . Taxa Máxima : (415 ± 8) m³/m².d (c.v. = 1,9 %)
- . Taxa 2 : (336 ± 10) m³/m².d (c.v. = 3,0 %)
- . Taxa 3 : (256 ± 9) m³/m².d (c.v. = 3,5 %)
- . Taxa Mínima : (181 ± 12) m³/m².d (c.v. = 6,6 %)

A P Ê N D I C E " I "

- Quadros com Valores de Turbidez Média do Afluente e dos Efluentes em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa.

QUADRO I.1

TAXA MÉDIA: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,2 m				
CICLO	FILTRO LAVADO	TURBIDEZ MÉDIA (UT)		
		AFLUENTE	EFLUENTE TOTAL	EFLUENTE F1
16	F3	2,01	0,07	0,04
17	F4	1,84	0,10	0,05
18	F1	2,07	0,07	0,10
19	F2	2,36	0,05	0,04
20	F3	1,85	0,05	0,04
26	F1	2,21	0,06	0,06
27	F2	1,19	0,07	0,06
33	F4	1,97	0,17	0,07
34	F1	2,46	0,07	0,11
35	F2	2,87	0,13	0,10
36	F3	1,89	0,07	0,04
37	F4	1,74	0,06	0,04
38	F1	1,68	0,05	0,07
42	F1	1,68	0,06	0,08
43	F2	1,40	0,06	0,04
44	F3	1,75	0,06	0,04
45	F4	2,41	0,34	0,21
46	F1	1,42	0,06	0,06
47	F2	1,42	0,07	0,06
48	F3	1,84	0,07	0,03
49	F4	1,48	0,05	0,03
50	F1	1,44	0,04	0,05
51	F2	1,22	0,06	0,04
52	F3	1,50	0,05	0,03
53	F4	1,31	0,04	0,03
54	F1	1,49	0,04	0,05

QUADRO I.2

TAXA MÉDIA: 350 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,6 m				
CICLO	FILTRO LAVADO	TURBIDEZ MÉDIA (UT)		
		AFLUENTE	EFLUENTE TOTAL	EFLUENTE F1
9	F4	2,14	0,07	0,04
10	F1	2,51	0,10	0,16
11	F2	1,99	0,07	0,06
12	F3	2,25	0,06	0,04
13	F4	1,62	0,06	0,03
14	F1	2,20	0,09	0,11
15	F2	1,73	0,07	0,04
16	F3	1,73	0,09	0,03
17	F4	2,85	0,11	0,04
18	F1	2,29	0,11	0,08
19	F2	1,18	0,06	0,04
20	F3	1,44	0,07	0,04

QUADRO I.3

TAXA MÉDIA: 300 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,6 m				
CICLO	FILTRO LAVADO	TURBIDEZ MÉDIA (UT)		
		AFLUENTE	EFLUENTE TOTAL	EFLUENTE F1
4	F3	1,81	0,07	0,05
5	F4	1,95	0,11	0,06
7	F2	1,73	0,09	0,07
8	F3	2,34	0,08	0,06
9	F4	1,90	0,09	0,06
10	F1	2,53	0,05	0,07
11	F2	1,95	0,05	0,04
12	F3	2,21	0,13	0,10
13	F4	1,84	0,13	0,04
14	F1	1,52	0,05	0,06
15	F2	1,65	0,07	0,06
16	F3	2,01	0,08	0,05
17	F4	1,60	0,05	0,03
18	F1	1,64	0,05	0,07
19	F2	1,78	0,04	0,04
20	F3	2,42	0,17	0,13

A P Ê N D I C E " J "

- Curvas de Medição Contínua de Turbidez do Afluente e dos Efluentes, em Alguns Ciclos do SFTD Experimental da Terceira Etapa.

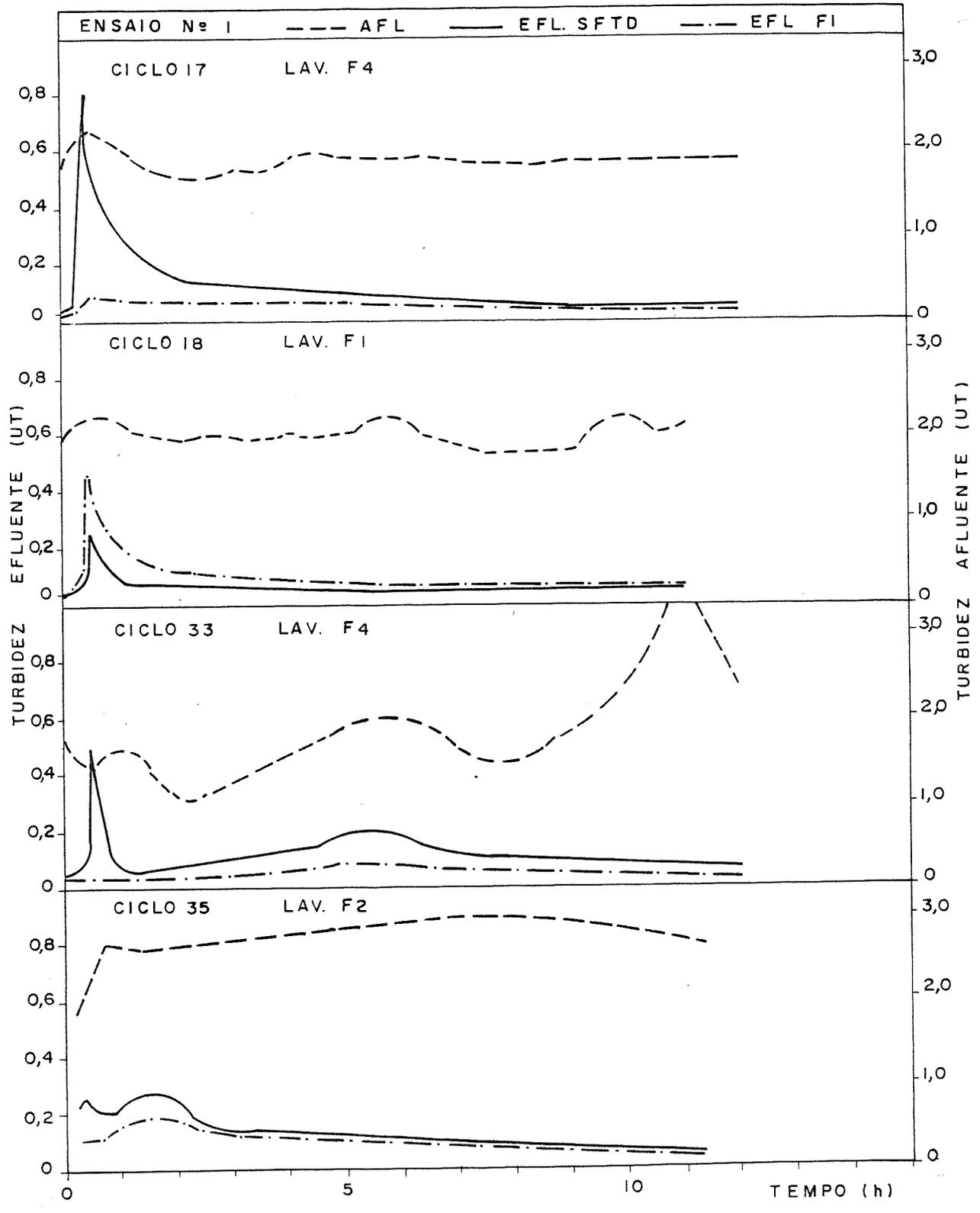


Figura J.1

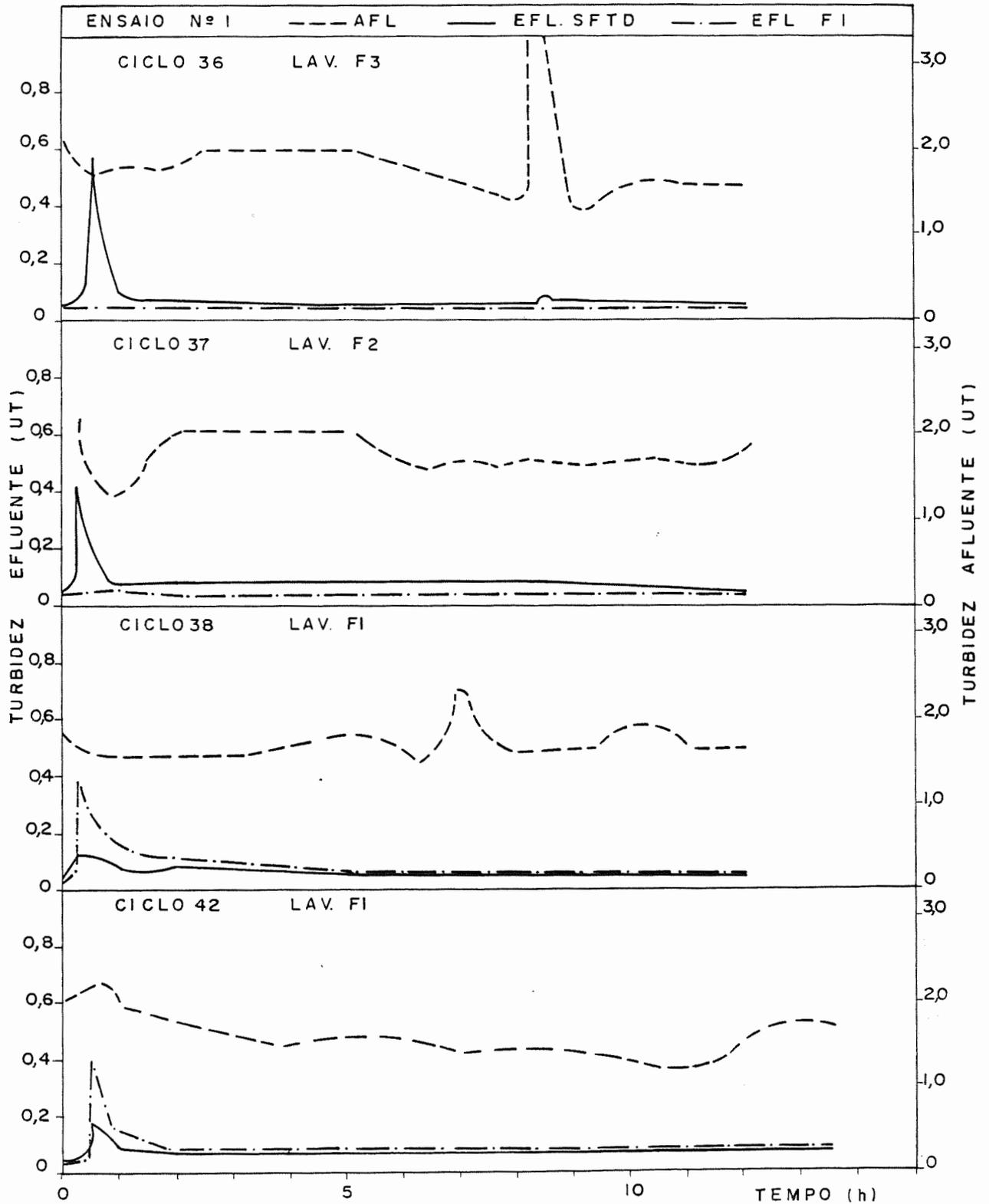


Figura J.2

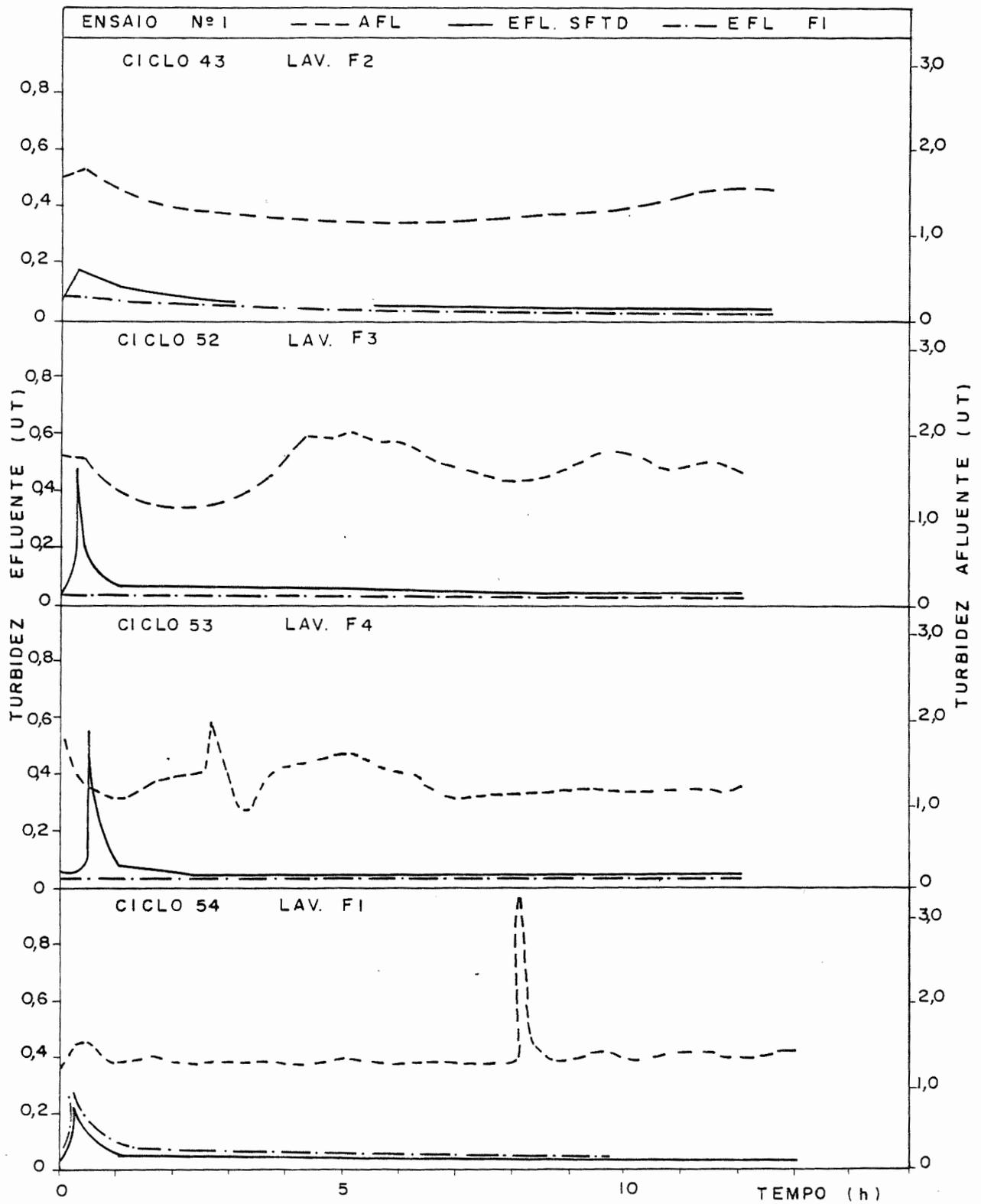


Figura J.3

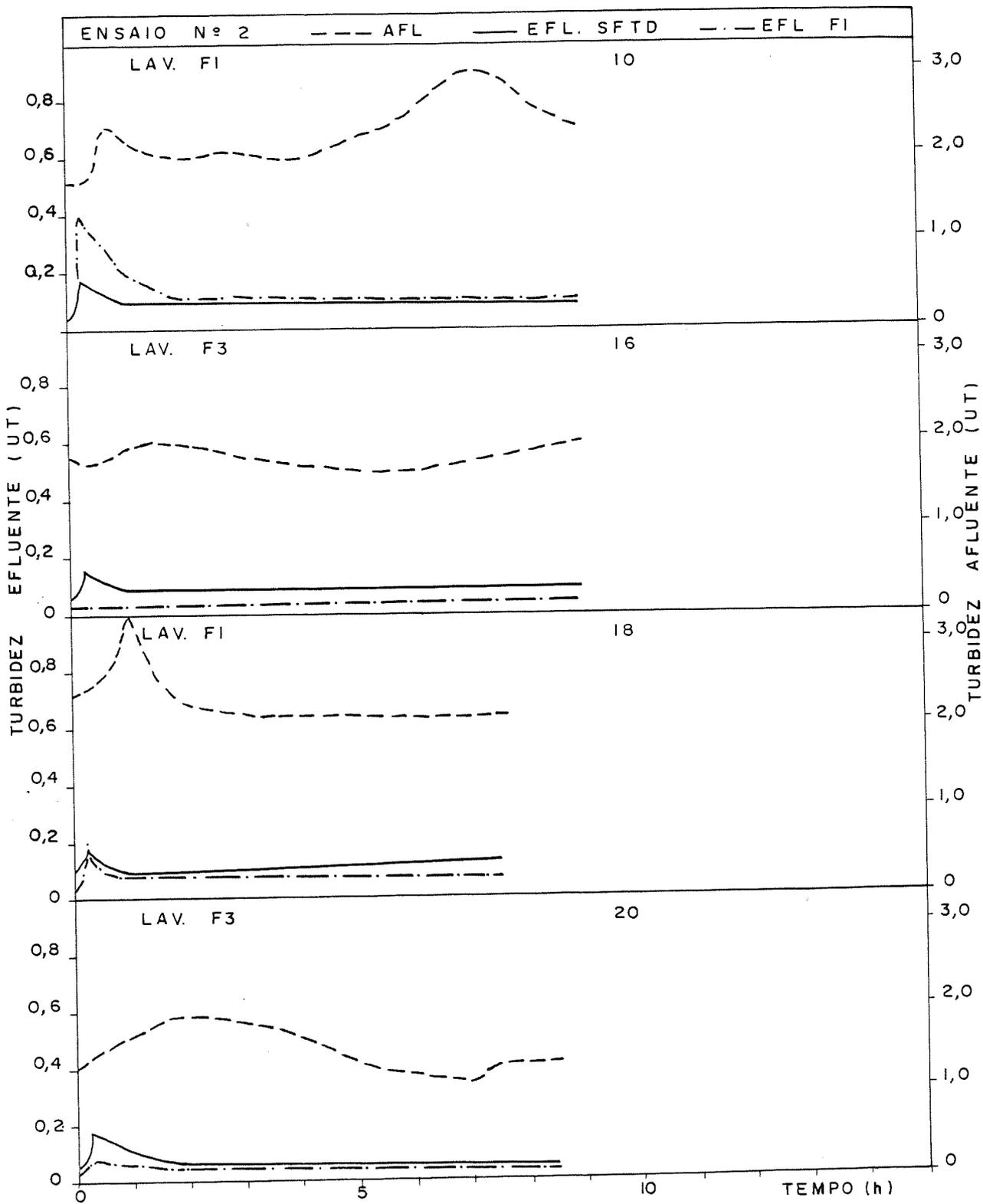


Figura J.4

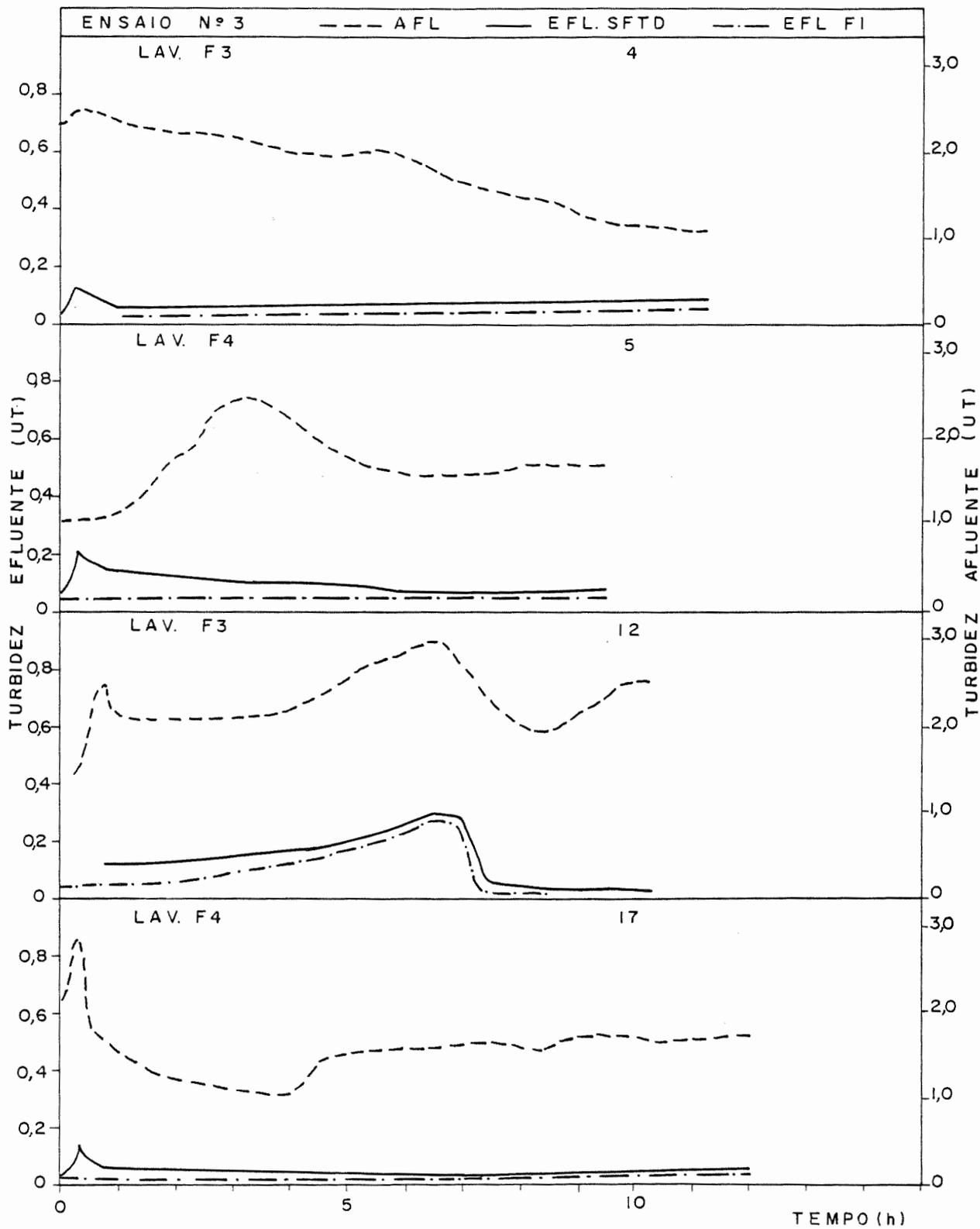


Figura J.5

A P Ê N D I C E " L "

- Curvas com Valores das Perdas de Carga ao Longo do Meio Filtrante, em Função do Tempo, em Alguns Ciclos da Terceira Etapa.

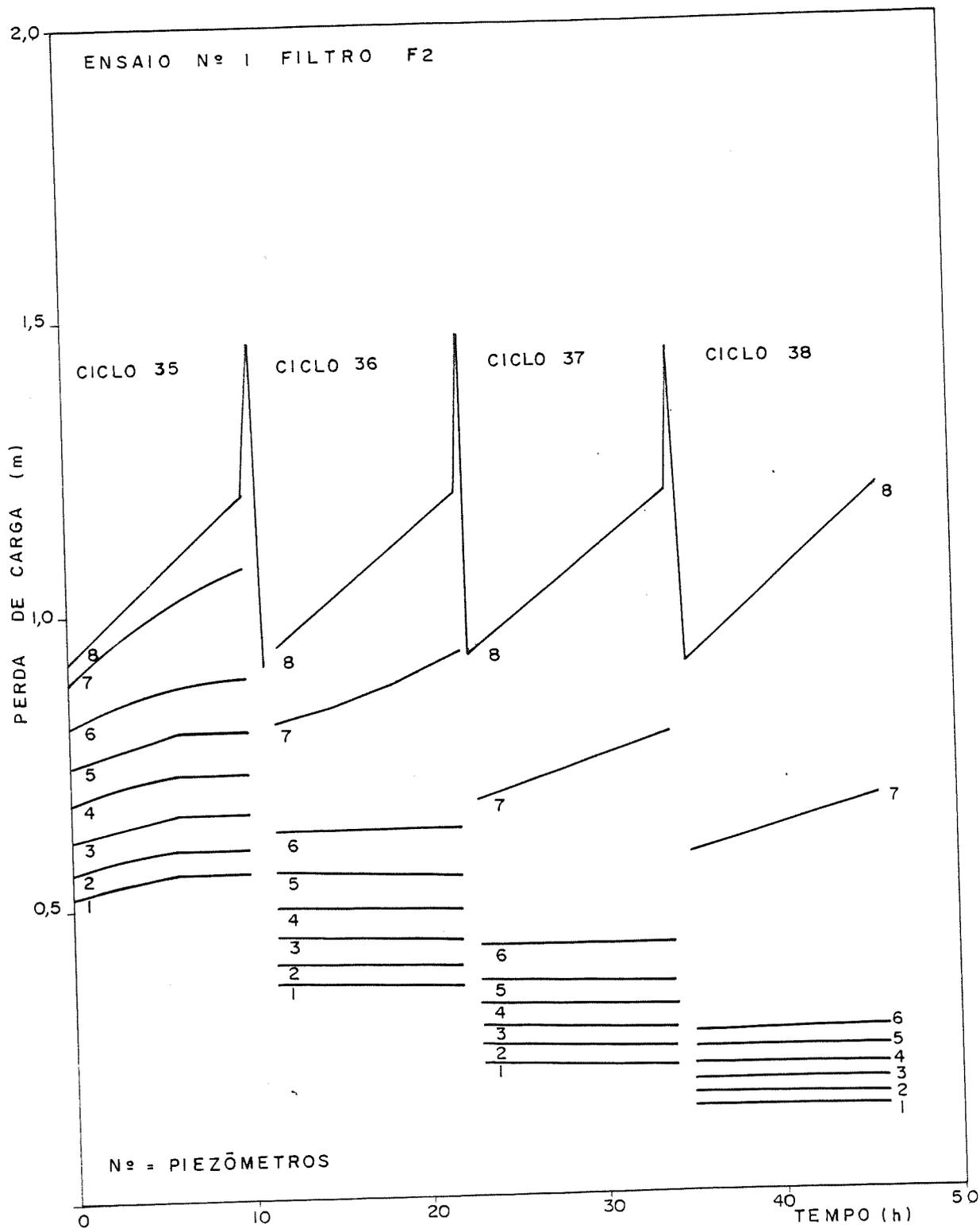


Figura L.1

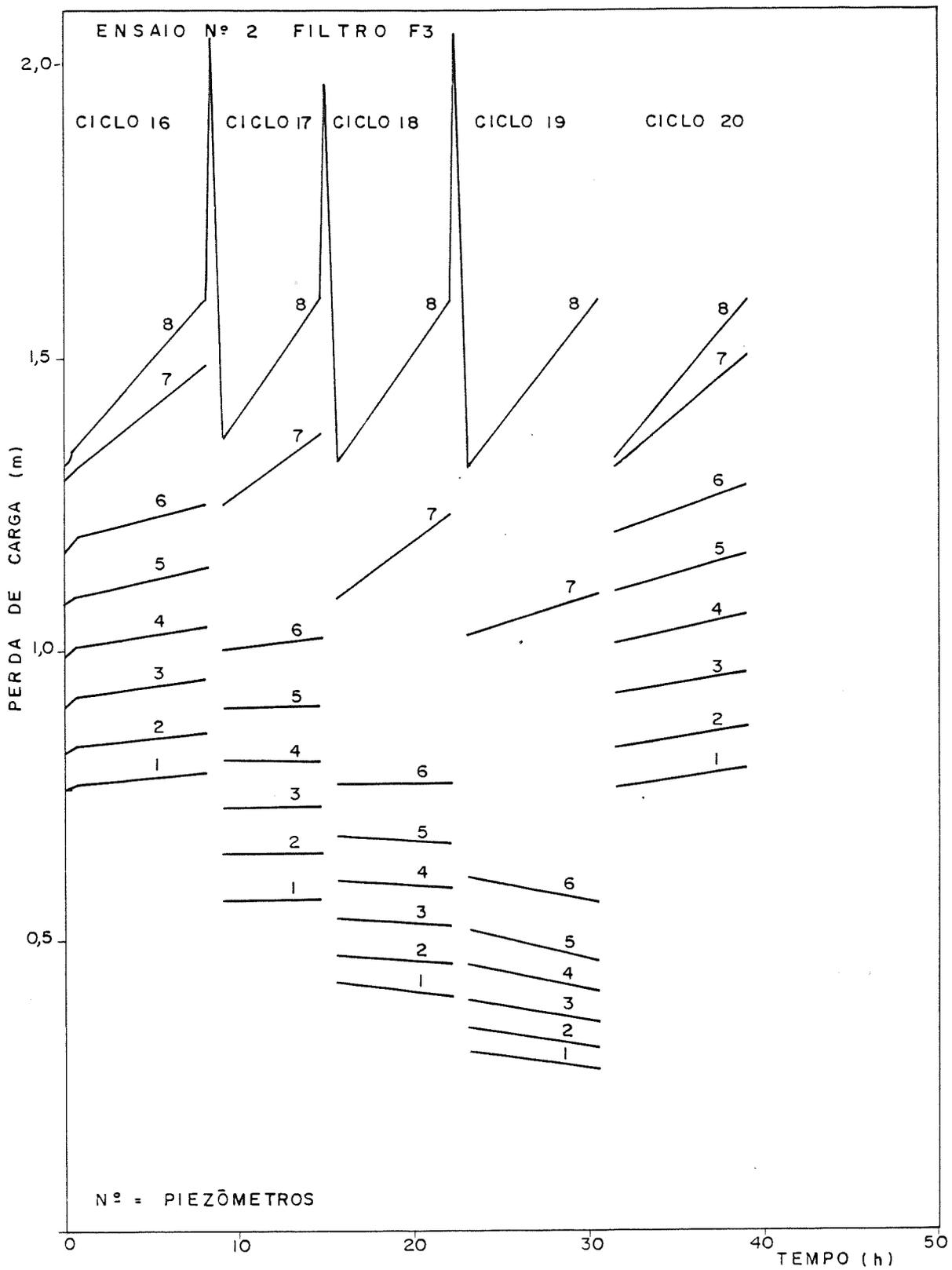


Figura L.2

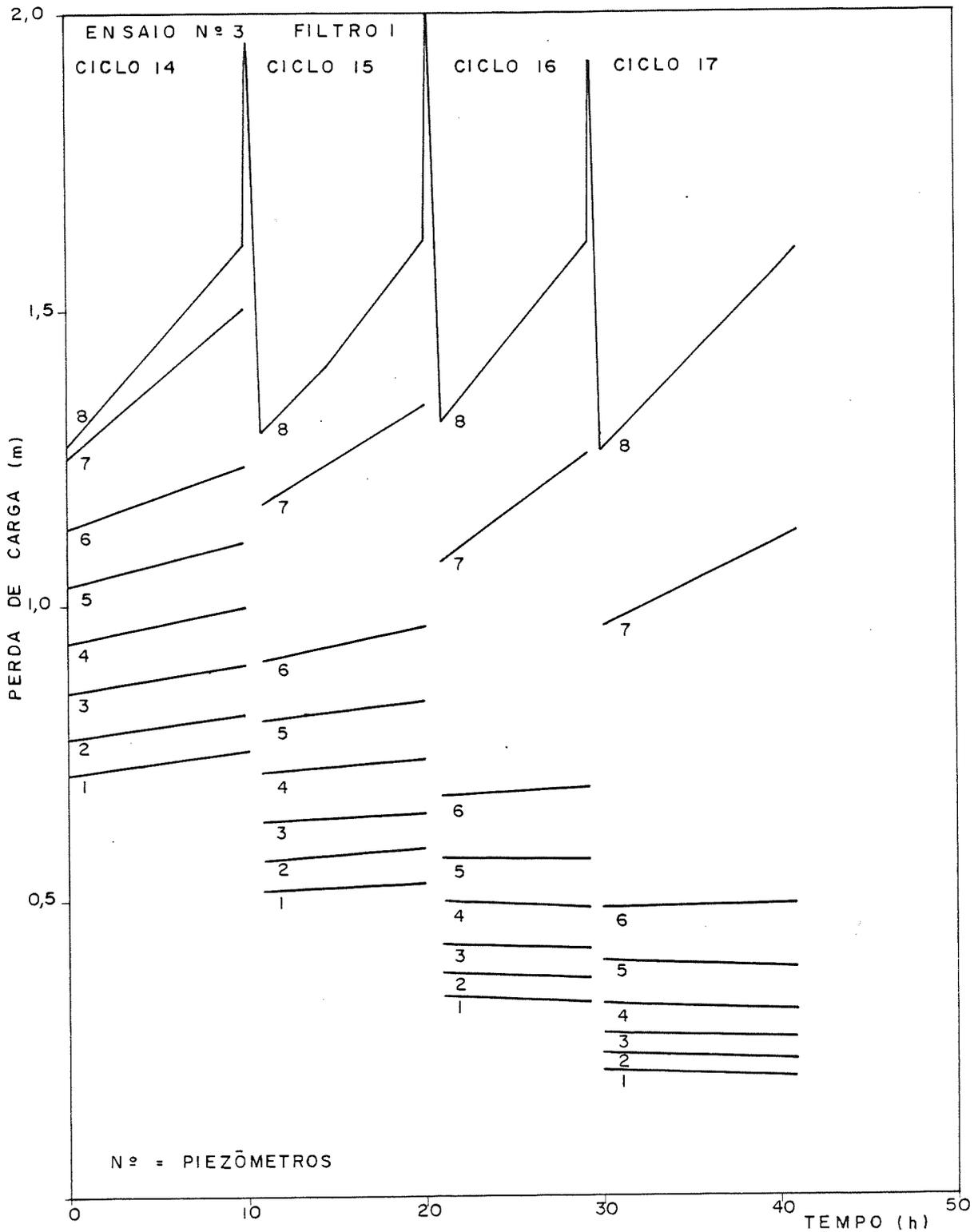


Figura L.3



A P Ê N D I C E " M "

- Quadros com Valores de Perda de Carga Total, Taxas de Filtração e Turbidez do Efluente do Filtro Independente Operado na Terceira Etapa.

QUADRO M.1.

TAXA MÉDIA NOMINAL NO SFTD: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m							
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA TOTAL (cm)		TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/d)		TURBIDEZ EFL. F5 (UT)	OBSERVAÇÕES
		F5	SFTD	F5	SFTD		
30º	0:00	85,0	92,5	333	364	0,42	Lav. F1 e F5; F5 acompanha F1
	2:00	100,5	99,5	359	359	0,26	
	7:30	113,5	112,5	359	359	0,10	
	10:30	121,5	120,0	357	357	0,10	
31º	1:00	92,0	97,5	274	275	0,05	Lav. F2
	4:00	101,0	105,5	274	275	0,05	
	7:00	109,5	112,5	275	273	0,06	
	10:30	118,5	120,0	276	271	-	
32º	0:30	86,5	89,0	200	200	-	Lav. F3
	1:00	87,5	90,0	196	195	-	
	5:00	93,5	99,0	191	191	0,12	
	7:00	99,5	102,5	195	192	0,11	
	12:00	108,0	116,5	191	192	0,11	
	13:00	112,5	120,0	191	195	0,11	
33º	1:00	90,0	93,5	141	140	0,05	Lav. F4
	3:30	94,5	100,5	139	135	0,05	
	8:30	104,0	114,5	137	135	0,05	
	11:00	108,5	120,0	137	134	-	
34º	0:30	87,5	87,5	347	347	0,21	Lav. F1 e F5
	5:15	98,5	-	356	-	0,07	
	9:30	104,5	107,5	357	364	0,11	
	14:15	120,0	120,0	-	364	0,98	
35º	0:30	91,5	92,5	273	276	0,20	Lav. F2
	3:30	99,0	102,0	277	279	0,16	
	6:30	108,0	110,0	283	281	0,13	
	10:30	118,0	120,0	283	283	0,05	
36º	0:00	90,0	91,5	219	215	0,05	Lav. F3
	0:30	93,5	94,5	222	210	0,04	
	4:00	97,0	103,0	205	206	0,05	
	7:30	105,5	110,5	207	206	0,07	
	11:30	112,0	-	207	-	0,07	
37º	1:00	89,0	96,0	151	149	0,05	Lav. F4
	4:30	97,0	103,0	151	144	0,04	
	8:00	102,5	111,5	151	148	0,05	
	11:30	110,0	120,0	153	150	0,07	

QUADRO M.1 - cont.

TAXA MÉDIA NOMINAL NO SFTD: 250 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,20 m							
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA TOTAL (cm)		TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/d)		TURBIDEZ EFL. F5 (UT)	OBSERVAÇÕES
		F5	SFTD	F5	SFTD		
38º	0:15	92,0	91,0	356	356	0,18	Lav. F1 e F5
	1:00	93,5	94,5	356	359	0,13	
	4:30	103,0	102,0	362	362	0,07	
	8:00	111,5	111,5	364	362	0,05	
	11:30	118,5	120,0	359	358	0,05	
42º	0:30	90,5	89,5	348	351	-	Lav. F1 e F5
	13:00	118,0	120,0	364	364	0,09	
43º	0:15	86,5	89,5	283	283	-	Lav. F2; simu- lação de lav. em F5.
	5:00	95,5	97,5	284	285	0,06	
	12:30	116,0	120,0	285	278	0,03	
46º	0:00	95,0	95,0	365	365	0,12	Lav. F1 e F5
	0:30	96,0	95,5	363	362	0,09	
	5:00	110,5	-	378	-	0,05	
	8:30	117,0	-	377	-	0,06	
47º	3:30	96,5	100,0	289	297	0,05	Lav. F2
	9:00	109,0	-	297	-	0,09	
	13:00	117,5	120,0	295	293	0,09	
48º	0:15	85,5	90,0	219	219	0,05	Lav. F3
	2:15	92,5	-	217	-	0,04	
	5:45	99,5	-	215	-	0,04	
	11:15	108,5	120,0	214	212	0,04	
49º	0:30	88,0	93,0	161	158	-	Lav. F4
	3:30	94,0	103,0	158	151	0,03	
	7:00	99,5	112,0	156	148	0,03	
	11:30	107,5	120,0	157	148	0,03	
50º	0:30	96,0	94,0	361	362	0,07	Lav. F1 e F5
	5:30	107,0	-	367	-	0,05	
	10:30	114,5	-	365	-	0,04	
	11:45	117,0	120,0	365	357	-	
51º	0:30	90,0	93,0	288	284	-	Lav. F2
	6:00	99,5	110,0	289	289	0,04	
	10:00	107,5	119,0	295	291	0,04	
54º	0:00	88,5	88,0	346	350	-	Lav. F1 e F5
	2:30	95,0	95,0	352	353	0,06	
	8:00	109,0	-	361	-	0,05	
	12:00	119,0	120,0	362	361	0,04	

QUADRO M.2

TAXA MÉDIA NOMINAL NO SFTD: 350 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m							
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA TOTAL (cm)		TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/d)		TURBIDEZ EFL. F5 (UT)	OBSERVAÇÕES
		F5	SFTD	F5	SFTD		
14º	0:15	134,5	134,5	443	443	0,18	Lav. F1 e F5
	5:30	159,5	160,0	457	457	0,08	
15º	0:15	135,0	136,0	388	390	0,04	Lav. F2
	6:15	157,5	160,0	392	393	0,05	
16º	0:45	136,0	136,0	388	390	0,04	Lav. F3
	8:15	158,0	160,0	321	317	0,04	
17º	0:15	135,0	137,0	256	257	0,05	Lav. F4
	5:45	154,0	161,0	244	244	0,03	
18º	0:15	132,0	132,0	440	441	0,09	Lav. F1 e F5
	6:45	160,0	160,0	450	451	0,05	
19º	0:15	137,0	135,5	384	384	-	Lav. F2
	7:45	160,0	160,0	384	387	0,03	
20º	0:30	136,0	134,0	308	310	-	Lav. F3
	6:30	156,0	155,0	305	304	0,04	
	7:30	162,0	160,5	307	300	0,03	

QUADRO M.3

TAXA MÉDIA NOMINAL NO SFTD: 300 m ³ /m ² .d CARGA HIDRÁULICA: 1,60 m							
CICLO	TEMPO (h:min)	PERDA DE CARGA TOTAL (cm)		TAXAS DE FILTRAÇÃO (m/d)		TURBIDEZ EFL. F5 (UT)	OBSERVAÇÕES
		F5	SFTD	F5	SFTD		
10º	1:00	128,0	-	415	-	0,10	Lav. F1 e F5; F5 acompanha F1
	5:30	144,5	151,0	415	421	0,05	
	8:00	154,0	160,5	419	419	0,06	
11º	1:00	126,5	-	342	-	0,04	Lav. F2
	4:00	131,5	140,0	342	343	0,05	
	9:30	147,5	160,0	346	341	0,04	
12º	0:45	128,5	-	415	-	-	Lav. F3 e F5; F5 acompanha F3
	3:45	139,5	138,5	416	414	0,33	
	10:15	163,5	-	415	-	0,06	
13º	1:15	131,5	134,0	330	330	0,04	Lav. F4; F5 si- mula lavagem.
	8:15	156,5	160,5	331	332	0,20	
14º	1:45	127,5	132,0	248	249	-	Lav. F1; F5 si- mula lavagem.
	7:15	142,5	150,0	243	251	0,04	
	10:15	154,5	161,0	249	253	0,04	
15º	0:30	127,0	129,0	411	411	-	Lav. F2 e F5; F5 acompanha F2.
	4:15	139,5	140,0	421	416	0,11	
	10:00	158,0	162,0	421	425	0,05	
16º	1:45	136,5	137,0	425	427	-	Lav. F3 e F5; F5 acompanha F3.
	8:45	159,0	162,0	424	431	0,06	
17º	0:45	128,5	-	338	-	0,04	Lav. F4; F5 si- mula lavagem.
	6:45	146,5	143,5	343	345	0,03	
	11:15	162,5	160,0	346	346	0,03	
18º	0:45	132,0	131,0	268	270	0,03	Lav. F1; F5 si- mula lavagem.
	6:45	152,0	151,0	273	273	0,06	
	9:45	166,5	164,0	275	275	0,04	
19º	0:30	133,0	131,5	190	196	0,03	Lav. F2; F5 si- mula lavagem.
	8:30	158,0	161,0	182	193	0,03	
20º	0:30	131,5	129,0	421	421	-	Lav. F3 e F5 Fim
	8:30	168,5	169,0	419	423	0,05	

A P Ê N D I C E " N "

- Testes de Significância das Diferenças entre os Valores Médios do Coeficiente a.

. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MÉDIOS DE a OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Foi testada a significância da diferença entre duas médias amostrais, \bar{X}_1 e \bar{X}_2 , com σ desconhecido, através da distribuição de t, com os seguintes parâmetros:

. tamanhos das amostras: n_1 e n_2

. médias das amostras: \bar{X}_1 e \bar{X}_2

. desvios-padrões das amostras: s_1 e s_2

. graus de liberdade: $\nu = n_1 + n_2 - 2$

. estimativa de σ : $s = \sqrt{\frac{(n_1-1) \cdot s_1^2 + (n_2-1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$

. $s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$

. $|t| = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}}$

O Quadro N.1 apresenta os valores calculados para as diversas comparações, considerando os seguintes valores médios de a:

. a_1 (1ª etapa) : $(4,3 \pm 0,2) \times 10^{-5}$

. a_2 (3ª etapa, ensaio nº 1): $(4,5 \pm 0,8) \times 10^{-5}$

. a_3 (3ª etapa, ensaio nº 2): $(4,3 \pm 0,7) \times 10^{-5}$

. a_4 (3ª etapa, ensaio nº 3): $(4,7 \pm 0,7) \times 10^{-5}$

Quadro N.1. Testes da significância das diferenças entre valores médios de a.

Comparação	n_1	n_2	ν	\bar{X}_1	\bar{X}_2	s_1	s_2	s	$s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}$	$ t $	$P t $
$a_1 \times a_2$	8	12	18	4,3	4,5	0,2	0,8	0,64	0,29	0,69	0,50
$a_1 \times a_3$	8	6	12	4,3	4,3	0,2	0,7	0,48	0,29	0,16	0,85
$a_1 \times a_4$	8	6	12	4,3	4,7	0,2	0,7	0,48	0,26	1,69	0,12
$a_2 \times a_3$	12	6	16	4,5	4,3	0,8	0,7	0,77	0,39	0,52	0,61
$a_2 \times a_4$	12	6	16	4,5	4,7	0,8	0,7	0,77	0,39	0,52	0,61
$a_3 \times a_4$	6	6	10	4,3	4,7	0,7	0,7	0,70	0,40	1,19	0,27

O parâmetro de probabilidade $P|t|$ foi obtido numa tabela de distribuição de t , a partir dos valores de ν e $|t|$. Os valores resultantes, todos maiores que 0,05, indicam que, a um nível de 5%, os valores médios do coeficiente a não diferem significativamente entre si.

O teste em questão foi aplicado segundo o método apresentado na seguinte referência:

KARMEL, P.H. & POLASEK, M. Estatística geral e aplicada para economistas. São Paulo, Ed. Atlas/EDUSP, 1972.