



17º
congresso
brasileiro
de engenharia
sanitária
e ambiental

Natal / RN
19 a 23 / 09 / 93

V.2
TRABALHOS TÉCNICOS
TOMO II



TEMA CENTRAL
Saneamento Ambiental
Ação de Saúde Pública

ANAIIS DO 17º CONGRESSO
BRASILEIRO DE ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL

NATAL - RN, 19 a 23 de setembro de 1993

Vol.2 - Trabalhos Técnicos - Tomo II

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

C759a

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (17. : 1993 : Natal, RN)

Anais / do 17. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 2, tomo II ; promoção ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental ; realização ABES Seção Rio Grande do Norte. — Rio de Janeiro : ABES, 1993

Conteúdo: v.2 t.II. Trabalhos técnicos
ISBN 85-7022-110-X

1. Engenharia ambiental - Brasil - Congressos.
2. Engenharia sanitária - Brasil - Congressos. I. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. II. Título.

93-0805

CDD - 628.06081
CDU - 628:061.3(81)

**INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA A
MONTANTE DOS FILTROS NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS
DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL**

Luiz Di Bernardo
Juan Carlos Escobar

(*)
(**)

RESUMO

Os modelos matemáticos existentes para o projeto de sistemas de filtração de taxa declinante variável - SFTDV são, em geral, baseados em resultados obtidos em instalações pilotos. Esse procedimento tem causado alguma confusão com relação a esse método de operação pois, em algumas estações de tratamento de água, há substancial capacidade de armazenamento à montante dos filtros e neles próprios, resultando variações, nas taxas de filtração e nos níveis de água, muito diferentes daquelas observadas em instalações pilotos e previstas pelos modelos matemáticos.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a influência da capacidade de armazenamento à montante dos filtros de uma instalação piloto, utilizando-se tanques para simular o que poderia ocorrer em algumas estações de tratamento de água, especialmente nas instalações de filtração direta descendente com pré-floculação, nas quais se evita a queda de água entre as unidades de floculação e os filtros, para não prejudicar os flocos. A instalação piloto de taxa declinante variável era constituída de quatro filtros, cada um com área A, e de três tanques, conectados à tubulação comum de alimentação dos filtros, de modo que a operação pudesse ser efetuada com as seguintes áreas de armazenamento de água: 4A; 8A; 16A e 32A. A carga hidráulica disponível foi fixada em 1,8 m e a taxa média de filtração em $400 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$. Com base na pesquisa realizada concluiu-se que existe clara diferença entre a operação de um sistema de filtração com taxa declinante variável quando ela é executada com e sem armazenamento adicional de água à montante dos filtros; assim, quanto maior o armazenamento, menores foram as variações de níveis, além das taxa de filtração em cada filtro terem decrescido entre lavagens sucessivas, não permanecendo constantes como assumido por muitos pesquisadores, exigindo-se uma complementação do modelo de Di Bernardo para que se considere o efeito do armazenamento.

0853418

545

SYSNO 0853418
PROD 002347

ACERVO EESC

INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA A
MONTANTE DOS FILTROS NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS
DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL

RESUMO (continuação)

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPESP -
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio à pesquisa
(Proc. 86/3182-3) e pela bolsa de Mestrado do segundo autor (Proc.90/1480-2)
Os autores agradecem, também, ao Serviço de Água e Esgoto de São Carlos.

ENDEREÇO: Escola de Engenharia de São Carlos-EESC/USP
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
13560-250 São Carlos-SP

1 - INTRODUÇÃO

A filtração consiste na principal etapa de uma estação de tratamento de água para consumo humano e, por isso, o sistema deve ser bem projetado e operado de forma eficiente, para que seja produzida água filtrada que atenda o Padrão de Potabilidade em vigor no Brasil. Após a publicação do trabalho pioneiro de Cleasby (4), muitos pesquisadores têm confirmado superioridade da filtração com taxa declinante variável - FTDV em relação à filtração com taxa constante - FTC, com ou sem o uso de equipamento de controle de vazão e nível.

Uma das maiores dificuldades do emprego da FTDV é a complexidade dos cálculos hidráulicos efetuados para se prever as taxas de filtração e níveis no canal comum de alimentação dos filtros - CCAF. Avanços importantíssimos foram obtidos na década de oitenta para o esclarecimento de muitas dúvidas sobre o funcionamento da FTDV. Destacam-se os trabalhos de Di Bernardo e Cleasby (7), Cleasby e Di Bernardo (5), Arboleda e colaboradores (2,3), Hilmoe e Cleasby (14) e Di Bernardo e colaboradores (7,8,9,10,11,12,13). O modelo de Di Bernardo (8,9) tem sido usado em muitos países do Continente Europeu e Americano e no Brasil, para a previsão das taxas de filtração e dos níveis que ocorrem no CCAF. Tal modelo é baseado em resultados de instalação piloto, porém, foram efetuados levantamentos em algumas estações de tratamento de água, os quais comprovaram a sua aplicabilidade para fins práticos, embora algumas diferenças entre as previsões e os resultados obtidos tenham sido observadas.

De acordo com o modelo de Di Bernardo (7,8) é assumida uma situação de equilíbrio em que cada filtro da bateria funciona com uma determinada taxa de filtração, que é constante entre lavagens sucessivas e declina na forma de degraus toda vez que um filtro recém-lavado entra em operação. Algumas questões sobre a influência do número de filtros da bateria, da taxa média de filtração, da perda de carga turbulenta, da carga hidráulica disponível e do posicionamento da crista do vertedor de saída, no desempenho da FTDV, foram estudadas em instalações pilotos por Cleasby e Di Bernardo (5) e Di Bernardo e colaboradores (12,13).

Uma diferença entre os resultados previstos pelo modelo de Di Bernardo e os observados em estações em escala real diz respeito à influência que o armazenamento de água à montante dos filtros pode exercer no comportamento da FTDV. Tal situação pode ser significativa quando se tem a filtração direta descendente com pré-floculação, na qual se evita a queda de água entre as unidades de pré-tratamento e os filtros, caso contrário, há prejuízo aos flocos, o que pode afetar a eficiência da filtração. Desse modo, as unidades de pré-floculação, o canal comum de alimentação e os filtros são submetidos às mesmas variações de nível durante a operação. Imagina-se que as variações de nível no CCAF sejam menores em comparação a

um sistema de FTDV sem armazenamento de água à montante dos filtros e que as taxas possam decrescer continuamente em um filtro, entre lavagens sucessivas, para um sistema de filtração com grande capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros.

Nas Figuras 1 e 2 são mostrados os resultados de operação de dois sistemas de filtração com taxa declinante variável, ambos operados com taxa média de filtração igual a $293 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$. No caso da Figura 1, tem-se as taxas de filtração em uma instalação piloto em que o nível mínimo dinâmico, N_d , é alcançado 40 minutos após o filtro recém-lavado ter entrado em operação, enquanto que, na Figura 2 são mostradas as taxas de filtração e as variações de nível do sistema de filtração de uma Estação de Tratamento de Água, em que se nota que o nível N_d foi atingido duas horas após o filtro recém-lavado ter entrado em operação, o que configura a existência de armazenamento adicional de água em relação à instalação piloto.

Na Figura 3 é mostrado o comportamento idealizado por Di Bernardo (11) quando é grande a capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros. As variações de nível entre lavagens sucessivas podem resultar tão pequenas a ponto de dificultar a operação e requerer a instalação de dispositivos para medição da perda de carga com a finalidade de determinar o exato momento da lavagem do filtro mais sujo da bateria. Segundo o autor, a taxa em cada filtro decresceria continuamente durante a carreira de filtração, ocorrendo taxas médias de filtração diferentes daquela resultante quando não há armazenamento substancial de água à montante dos filtros nos diferentes níveis operacionais. No ponto A a vazão total efluente iguala-se à afluente, resultando a taxa média nominal, que continua a diminuir, pois ocorre armazenamento devido ao aumento de nível de A para B.

Com o objetivo de verificar a influência da capacidade de armazenamento no funcionamento de um sistema de filtração com taxa declinante variável, o presente trabalho foi realizado em uma instalação piloto constituída de quatro filtros e de tanques para aumentar a capacidade de armazenamento à montante dos filtros da bateria.

2 - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA INSTALAÇÃO PILOTO

Na Figura 4 é mostrada a instalação piloto utilizada, que foi montada nas dependências da Estação de Tratamento de Água de São Carlos - ETASC. O afluente à instalação piloto era a água decantada na ETASC, a qual realiza a coagulação da água superficial afluente através de sulfato de alumínio no mecanismo da varredura.

A água decantada na ETASC era bombeada para uma caixa provida de extravasor, de modo que o nível em seu interior permanecia constante, já que

a vazão recalçada era superior àquela afluente à instalação piloto. Dessa caixa, partiam duas tubulações independentes, uma para alimentação do sistema de FTDV com 50 mm de diâmetro e, outra, de 12,7 mm, para alimentação de um turbidímetro de escoamento contínuo. Na tubulação vertical que conduz o afluente aos filtros, existiam duas derivações principais: uma para um sistema composto de três tanques de armazenamento e, outra, que alimentava uma tubulação horizontal, de onde partiam as tubulações individuais de alimentação dos quatro filtros. Dessa forma, o nível de água podia variar na tubulação vertical, acompanhando o nível no interior dos filtros e dos tanques de armazenamento. Na entrada dos tanques de armazenamento foram instaladas válvulas que permitiam a integração ou isolamento dos mesmos ao sistema de FTDV. Na tubulação de alimentação foi instalado um piezômetro para acompanhar as variações de nível que ocorriam durante o funcionamento da instalação piloto.

A medida de vazão afluente à instalação piloto era efetuada por meio de um rotâmetro instalado na tubulação de saída da caixa de nível constante. Na tubulação de saída de cada filtro piloto havia um rotâmetro que permitia, em qualquer instante, a vazão filtrada e a taxa de filtração fossem conhecidas. A turbidez do efluente global e a de um filtro da bateria era medida e registrada continuamente através de turbidímetros de escoamento contínuo.

2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS

Os quatro filtros foram construídos com tubo de acrílico transparente, de 91 mm de diâmetro interno, e altura total de 3,6 m. O sistema de drenagem era composto de placa perfurada, localizada a 10 cm acima do fundo do filtro, sobre a qual era disposta uma tela de aço inoxidável. Na câmara situada abaixo da placa, localizavam-se a entrada de água para lavagem, a saída de água filtrada e a entrada de ar para lavagem auxiliar. Na Figura 5 é apresentado um esquema dos filtros da instalação piloto.

2.3 - CARACTERÍSTICAS DO MEIO FILTRANTE

Foi utilizada somente areia como meio filtrante, com as seguintes características: tamanho do menor grão = 1,25 mm; tamanho do maior grão = 1,65 mm; tamanho efetivo = 1,3 mm; coeficiente de desuniformidade = 1,1; espessura da camada filtrante = 1,1 m; coeficiente de esfericidade = 0,77; Porosidade do meio filtrante limpo = 0,40 - 0,43.

2.4 - LAVAGEM DOS FILTROS

A lavagem de um filtro qualquer da bateria era efetuada nas

seguintes condições: a) insuflação de ar, proveniente de um compressor rotativo, com taxa de aplicação da ordem de 15 l/s m^2 durante 3 minutos; b) lavagem com água, da instalação predial da ETASC, durante 7 minutos com velocidade ascensional de $1,2 \text{ m/min}$.

2.5 - TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Foram construídos três tanques em chapa metálica, de forma cilíndrica com área superficial de 4, 8 e 16 vezes a área de um filtro, em planta. A altura dos tanques era de $1,2 \text{ m}$ e foram dispostos de modo a permitir variações concomitantes de nível em seu interior com o dos filtros.

2.6 - PARÂMETROS DE CONTROLE

A turbidez do afluente, do efluente de um filtro da bateria e do efluente global da instalação era medida e registrada continuamente por meio de turbidímetros de escoamento contínuo. A perda de carga foi medida por meio de piezômetros instalados a cada 20 cm ao longo da espessura da camada filtrante. A vazão afluente à instalação era verificada 4 vezes ao dia, por meio de medição volumétrica.

2.7 - METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados para a taxa média de filtração de $400 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, conforme características de armazenamento mostradas na Tabela 1, com carga hidráulica disponível fixa e igual a $1,8 \text{ m}$.

Ensaio 1 : para a realização do ensaio 1, foram medidas as perdas de carga no meio filtrante limpo e nas tubulações, no sistema de drenagem, acessórios, etc., resultando as seguintes equações :

- perda de carga no meio filtrante limpo :

$$H_{mfo} = 8,92 \times 10^{-4} T \quad (1)$$

- perda de carga turbulenta :

$$H_{tur} = 3,8 \times 10^{-5} T^{1,50} \quad (2)$$

- perda de carga total :

$$H_t = 8,92 \times 10^{-4} T + 3,8 \times 10^{-5} T^{1,50} \quad (3)$$

em que:

H_{mfo} , H_{tur} , H_t : perda de carga (m)

T : taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$)

Na Figura 6 é mostrada a curva de perda de carga total, as taxas de filtração e os níveis N_1 e N_2 , resultantes da aplicação do modelo de Di Bernardo (7,8), assumindo-se que não haja capacidade de armazenamento. Como

se pode notar nessa figura, a variação de nível $N_a - N_b$ é de 0,51 m e as taxas de filtração, de 578, 443, 332 e 246 $m^3/m^2.d$. A finalidade do uso do modelo de Di Bernardo foi a de fixar a carga hidráulica de modo que a relação entre a taxa máxima de filtração (filtro recém-lavado) e a média, fosse da ordem de 1,5.

A instalação foi inicialmente operada para a situação em que não havia capacidade adicional de área de armazenamento à montante dos filtros, até que fosse obtida a situação repetitiva, isto é, à medida que vão sendo lavados, os filtros substituem uns aos outros, como mostrado na Figura 1.

Ensaio 2 : após a operação do SFTDV sem armazenamento adicional, como no ensaio 1, até que se tivesse a situação repetitiva para, no mínimo, 4 ciclos, foi introduzido o tanque 1 (previamente enchido com água até o nível N_a), logo após a lavagem de um filtro no final do ensaio 1, configurando a condição de área de armazenamento adicional de 4 A. O ensaio 2 foi encerrado somente depois de ter sido constatada a situação repetitiva durante, pelo menos, quatro ciclos.

Ensaio 3 e Ensaio 4 : após o término do ensaio 2, o tanque 1 foi retirado de operação, tendo o SFTDV funcionado sem armazenamento adicional, como foi feito no Ensaio 1. Mais uma vez, o SFTDV foi operado até resultar a situação repetitiva, quando então os tanques 1 e 2 foram introduzidos, configurando o Ensaio 3 para área adicional de armazenamento igual a 12A. No ensaio 4, a área adicional foi de 28 A, com os três tanques conectados à tubulação de afluente.

3 - RESULTADOS. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Na Figura 7 são mostradas as variações do nível de água na tubulação comum de alimentação dos filtros, das taxas de filtração e da turbidez do afluente, efluente global e do efluente do filtro F₄ do SFTDV. São também incluídos os resultados obtidos com o uso do modelo de Di Bernardo. Na Tabela 2 são mostrados os resultados de operação da instalação piloto na situação repetitiva e os resultados obtidos com o modelo de Di Bernardo para efeito de comparação. Nota-se que os dados experimentais são muito próximos daqueles previstos, comprovando, mais uma vez, a aplicabilidade do citado modelo para a previsão do comportamento de sistemas de filtração com taxa declinante variável.

Nas Figuras 8, 9 e 10 são mostradas as variações de nível na tubulação comum de alimentação dos filtros, das taxas de filtração e da turbidez do afluente, do efluente global e do efluente do filtro F₄ do SFTDV, respectivamente, correspondentes à operação sem capacidade adicional de armazenamento (ciclo C₁ a C₂) e com área adicional de armazenamento de 4 A (ciclo C₂ a C₃) - Ensaio 2. Apesar da área adicional de armazenamento, ainda não é muito perceptível a sua influência no comportamento do SFTDV, a menos da variação de nível no CCAF.

Na Figura 11 são mostrados os resultados de operação correspondentes ao Ensaio 3. Nota-se que já é significativa a influência da área de armazenamento adicional, de 12 A, principalmente nas variações de nível, que se tornaram menores.

Na Figura 12 são mostrados os resultados de operação relativos ao Ensaio 3. É evidente a influência da área adicional de armazenamento, de 28 A, especialmente nas variações de nível, embora também se verifique que as taxas passaram a diminuir continuamente.

Na Tabela 3 são mostrados os valores médios das taxas de filtração correspondentes aos ensaios 2, 3 e 4. Nessa tabela, a vazão afluente deveria ser igual à efluente quando o nível N_2 era atingido. No entanto, ocorreram pequenas diferenças que podem ser atribuídas a desajustes da vazão medida volumetricamente ou mesmo a erros de medição. Já o valor médio da taxa média no nível N_2 diminuiu à medida que aumentou a capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros, confirmando a idealização feita por Di Bernardo (**), mostrada na Figura 3. Dessa forma, deve-se levar a capacidade de armazenamento à montante dos filtros, mediante a introdução, no modelo de Di Bernardo, de uma equação de balanço de vazão, do tipo:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i + (dh/dt) A_t \quad (4)$$

em que:

Q : vazão afluente à instalação (m^3/s)

q_i : vazão efluente de cada filtro (m^3/s)

A_t : área dos filtros que compõem a bateria somada à área de canais e outras unidades de pré-tratamento à montante dos filtros (m^2)

dh : incremento de nível durante um intervalo de tempo (m)

dt : intervalo de tempo no qual é registrado o incremento de nível (s)

Na Tabela 4 são mostrados os valores médios dos níveis de operação correspondentes aos ensaios 2, 3 e 4 e os tempos necessários para o nível de água baixar de N_2 para N_1 . Nessa tabela constata-se que quanto maior a capacidade de água à montante dos filtros, menor o nível N_2 e maiores o nível N_1 e o tempo decorrido para o nível de água baixar de N_2 para N_1 .

Em relação à qualidade do efluente, medida em termos de turbidez, pode-se dizer que o valor médio da turbidez do efluente global resultou praticamente o mesmo, em torno de 0,5 uT, independentemente da existência de capacidade adicional de armazenamento de água à montante dos filtros. Nos momentos em que se registraram aumentos nas taxas de filtração nos filtros remanescentes, por ocasião da lavagem de um filtro, os picos de turbidez no efluente global foram menores nos ensaios com maior capacidade adicional de armazenamento de água à montante dos filtros. No filtro F₄ (cuja turbidez do efluente foi continuamente monitorada), após este ter sido lavado e colocado em operação, a turbidez de seu efluente era pior no início, melhorando ao

longo da carreira de filtração porém, apresentando picos toda vez que um filtro qualquer da bateria era retirado de operação para lavagem. No entanto, os picos de turbidez resultaram menores com o aumento da capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros.

Com respeito à variação de perda de carga no meio filtrante dos quatro filtros, observou-se, através das leituras piezométricas, que houve retenção substancial de impurezas até cerca de 40 cm, fazendo com que as taxas de filtração aumentassem nos filtros mais limpos e diminuíssem nos mais sujos da bateria. Tal comportamento foi semelhante ao observado por Souza (nn) e Teixeira (NN), embora no presente trabalho, o meio filtrante era praticamente uniforme se comparado ao daqueles pesquisadores.

Com base no trabalho experimental realizado, obtiveram-se as seguintes conclusões:

I - Com Relação ao Modelo Matemático de Di Bernardo

a - As diferenças entre os valores teóricos e os experimentais das taxas de filtração diminuem à medida que os filtros vão se tornando sujos.

b - Os valores teóricos das taxas de filtração e das variações de nível são muito próximos dos experimentais obtidos na instalação piloto sem armazenamento adicional de água à montante dos filtros.

II - Com Relação ao Desempenho do SFTDV Operado sem Armazenamento Adicional de Água à Montante dos Filtros

a - As taxas de filtração decrescem na forma de degraus ao longo da carreira de filtração, apresentando picos por ocasião da lavagem de um filtro qualquer da bateria.

b - Nos ciclos (tempo decorrido entre lavagens sucessivas), as taxas de filtração cresceram nos filtros mais limpos e decresceram nos mais sujos, porém as diferenças em relação aos valores médios não foram significativas; tal fenômeno foi atribuído ao fato da penetração de impurezas ter ocorrido, basicamente, em cerca de 40 cm do meio filtrante, resultando variação exponencial da perda de carga com o tempo, especialmente nos filtros mais sujos.

c - A turbidez da água filtrada resultou relativamente baixa, geralmente inferior a 0,5 uT, melhorando do início para o final da carreira de filtração; os picos de turbidez no efluente dos filtros remanescentes em operação ocorriam toda vez que um filtro da bateria era lavado e não foi observada tendência do transpasse durante a carreira de qualquer filtro.

III - Com Relação ao Desempenho do SFTDV com Capacidade Adicional de Armazenamento de Água à Montante dos Filtros

a - A taxa de filtração em cada filtro decresce continuamente durante os ciclos, sendo tal comportamento mais acentuado à medida que se aumentou a capacidade de armazenamento à montante dos filtros.

b - No momento em que se atingia o nível Nz, quando um filtro era retirado de operação para lavagem, a taxa média de filtração resultou menor que a

nominal, devido ao armazenamento ocorrido durante o aumento do nível de água de N_1 para N_2 ; quanto maior a capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros, maior foi a diferença entre a taxa média de filtração nominal e a resultante da medida de vazão efetuada na saída dos filtros.

c - As taxas de filtração nos filtros diminuíram continuamente durante os ciclos de operação, resultando em um comportamento semelhante ao observado em Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Verdadeira, sendo este fato mais marcante nos filtros mais sujos da bateria e com maior capacidade adicional de armazenamento de água à montante dos filtros.

d - Quanto maior a capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros, menores foram os picos de vazão por ocasião da lavagem de um filtro qualquer da bateria.

e - À medida que se aumentou a capacidade de armazenamento de água à montante dos filtros, menores foram as variações de nível $N_1 - N_2$, $N_3 - N_4$ e $N_2 - N_4$ e, maior, o tempo necessário para o nível baixar de N_1 para N_2 ; tais resultados diferem consideravelmente daqueles previstos pelo modelo de Di Bernardo, o que exige a introdução de uma função de balanço de vazão no equacionamento proposto pelo autor.

4 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION Comparison of Alternative Systems for Controlling Flow Through Filters - Committee Report JAWWA, Vol. 76, n.º 1, p: 91 - 95, Jan. 1 984, USA
- 2 - ARBOLEDA, J. V. Hydraulic Control Systems of Constant and Decling Flow Rate in Filtration JAWWA, vol. 66, n. 2, p: 87 - 94, Feb. 1 984, USA
- 3 - ARBOLEDA, J. V., GIRARDO, R. & SNEL, H. Hydraulic Behavior os Declining Rate Filtration JAWWA, vol. 77, n. 12, p: 67 - 74, Dec. 1 985, USA
- 4 - CLEASBY, J. L. Filter Rate Control Without Rate Controllers JAWWA, vol. 61, n. 4, p: 181 - 185, Apr. 1 969, USA
- 5 - CLEASBY, J. L. & DI BERNARDO, L. Hydraulic Considerations in Declining Rate Filtration JEED - PROC. ASCE, vol. 106, n. EE6, p: 1 043 - 1 055, Dec. 1 980, USA
- 6 - CLEASBY, J. L. Declining-Rate Filtration JAWWA, vol. 73, n. 9, p: 484 - 489, Sept. 1 981, USA
- 7 - DI BERNARDO, L. & CLEASBY, J. L. Declining-Rate versus Constant-Rate Filtration JEED - PROC. ASCE, vol. 106, n. EE6, p: 91 023 - 1 041, Dec. 1 980, USA
- 8 - DI BERNARDO, L. A Rational Method to the Design of Declining-Rate Filters WORLD FILTRATION CONGRESSIV Ostend, Belgiun, Jul. 1 986
- 9 - DI BERNARDO, L. Hidráulica da Filtração com Taxa Declinante REVISTA DAE, vol. 43, n. 135, p: 30 - 36, Set. 1 986, Brasil

- 10 - DI BERNARDO, L. Hidráulica da Filtração com Taxa Declinante Variável
XIII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
Guatemala, Nov. 1 986
- 11 - DI BERNARDO, L. Projeto e Operação de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE MEJORAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA
Cali, Colombia, 1 987
- 12 - DI BERNARDO, L. & SOUZA, P. R. Posicionamento da Crista do Vertedor de Saída em Sistemas de Filtração com Taxa Declinante 16^O CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL Goiânia, GO, Set. 1 991, Brasil
- 13 - DI BERNARDO, L. & TEIXEIRA, B. A. N. Previsão da Duração da Carreira de Filtração em Sistemas de Filtração com Taxa Declinante XXXIII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL La Havana, Cuba, Nov. 1 992
- 14 - HILMOE, D. J. & CLEASBY, J. L. Comparing Constant-Rate and Declining-Rate Direct Filtration of a Surface Water JAWWA, vol. 78, n. 9, p: 26 - 34, Dec. 1 986, USA
- 15 - PREZOTTI, J. C. Influência da Taxa de Filtração no Desempenho de Filtros Rápidos de Areia Praticamente Uniforme - Dissertação de Mestrado ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP São Carlos - SP, Brasil, 1 991
- 16 - SOUZA, P. R. Influência do Posicionamento do Vertedor de Saída nos Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Variável Dissertação de Mestrado ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP, São Carlos - SP, Brasil, 1 990
- 17 - TEIXEIRA, B. A. N. Proposição de um Método para Obtenção de Parâmetros de Projeto e Operação de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Tese de Doutorado ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP, São Carlos - SP, Brasil, 1 991

TABELA 1 - ENSAIOS REALIZADOS NO TRABALHO EXPERIMENTAL

ENSAIO	ÁREA DE ARMAZENAMENTO	
	A ₁	A ₂
1	--	4 A
2	4 A	8 A
3	12 A	16 A
4	28 A	32 A

A : área de 1 filtro

A₁ : área adicional à montante dos filtros

A₂ : área total, levando em conta a área dos filtros

TABELA 2 - RESULTADOS DE OPERAÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO SEM CAPACIDADE ADICIONAL DE ARMAZENAMENTO NA SITUAÇÃO REPETITIVA E RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MODELO DE DI BERNARDO

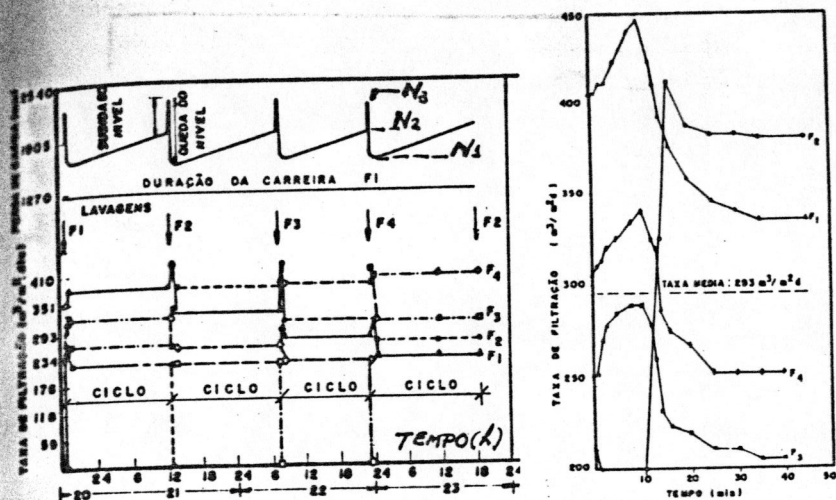
CONDIÇÃO	TAXA DE FILTRAÇÃO (m/d)					NÍVEIS DE OPERAÇÃO (m)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{med}	N ₁	N ₂	N ₂ - N ₁
Modelo	579	433	332	246	400	1,29	1,80	0,51
Experimental	579	452	327	231	397	1,31	1,80	0,49
Variação (%)	0	2,0	1,5	6,1	0,8	1,6	--	3,9

TABELA 3 - VALORES MÉDIOS DAS TAXAS MÉDIAS DE FILTRAÇÃO RESULTANTES NOS ENSAIOS COM CAPACIDADE ADICIONAL DE ARMAZENAMENTO

ENSAIO	CICLO	VALOR MÉDIO DA TAXA MÉDIA DE FILTRAÇÃO (m/d)	
		No Nível N ₁	No Nível N ₂
2 (8A)	9 - 16	403 ± 3	399 ± 3
3 (16A)	9 - 16	404 ± 4	393 ± 6
4 (32A)	9 - 16	406 ± 4	387 ± 4

TABELA 4 - VALORES MÉDIOS DOS NÍVEIS DE OPERAÇÃO N₁ E N₂ E OS TEMPOS NECESSÁRIOS PARA O NÍVEL DE ÁGUA BAIXAR DE N₂ PARA N₁

ENSAIO	CICLO	NÍVEL N ₂ (cm)	NÍVEL N ₁ (cm)	TEMPO N ₂ - N ₁ (h)
2 (8A)	1 - 8	212,3 ± 4,0	134,7 ± 3,1	0,39 ± 0,09
	9 - 16	203,2 ± 2,5	140,6 ± 4,8	0,65 ± 0,04
3 (16A)	1 - 8	206,6 ± 13,6	132,2 ± 8,1	0,42 ± 0,09
	9 - 16	194,1 ± 3,4	151,5 ± 6,3	1,08 ± 0,11
4 (32A)	1 - 8	207,5 ± 9,5	134,0 ± 6,8	0,36 ± 0,06
	9 - 16	187,9 ± 2,2	156,1 ± 7,9	1,34 ± 0,23



a) Durante a Carreira de Filtração do F1 b) Durante a Lavagem do F2

FIGURA 1 - DADOS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE TAXA DECLINANTE VARIÁVEL
INSTALAÇÃO PILOTO (7)

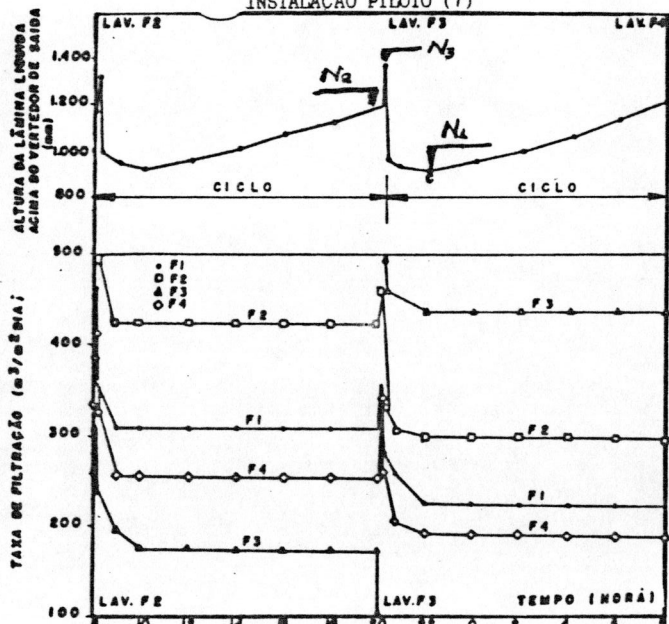


FIGURA 2 - DADOS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE TAXA DECLINANTE VARIÁVEL
INSTALAÇÃO PROTÓTIPO (11)

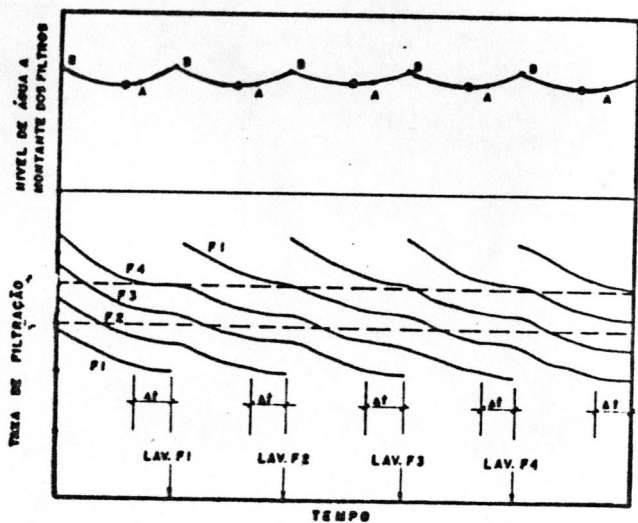


FIGURA 3 - OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE FILTRAÇÃO DE TAXA DECLINANTE VARIÁVEL COM ARMAZENAMENTO DE ÁGUA A MONTANTE DOS FILTROS - SITUAÇÃO HIPOTÉTICA (11)

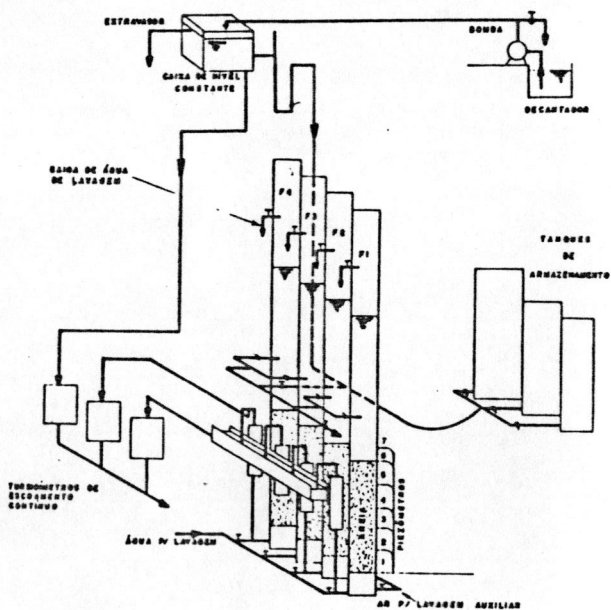


FIGURA 4 - ESQUEMA GERAL DA INSTALAÇÃO PILOTO

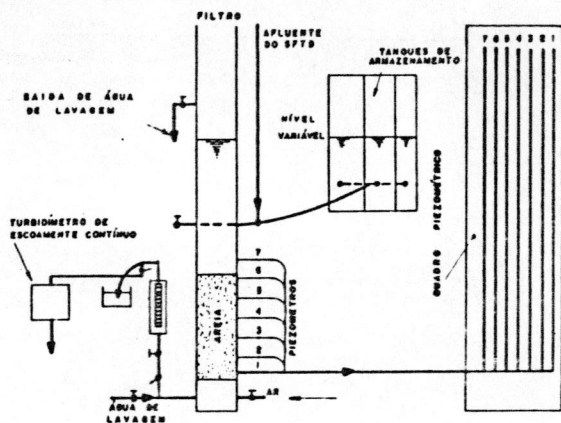


FIGURA 5 - ESQUEMA DE UM FILTRO PILOTO

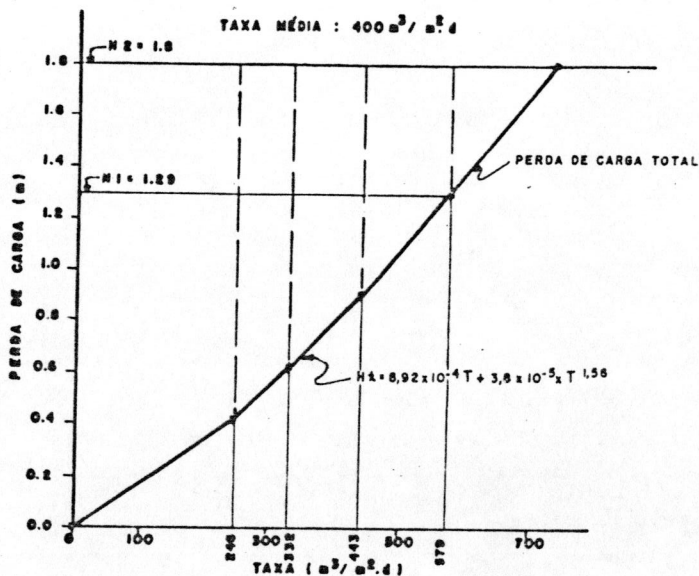


FIGURA 6 - CURVA DE PERDA DE CARGA TOTAL NO SFTDV
RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO DE DI BERNARDO (8,9)

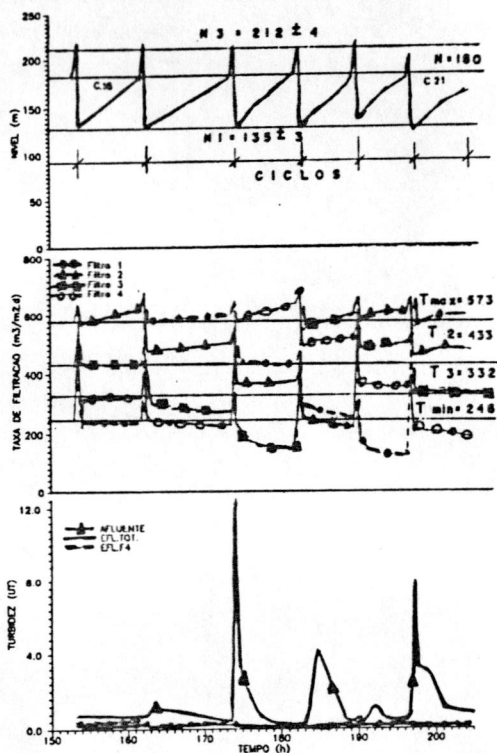


FIGURA 7 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 1

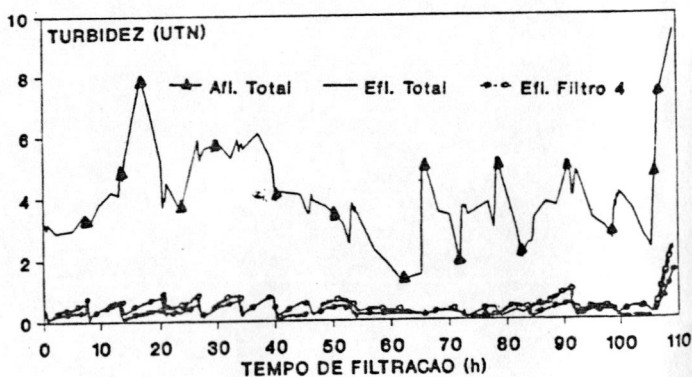


FIGURA 8 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 2 - TURBIDEX DO AFLUENTE E EFLUENTE

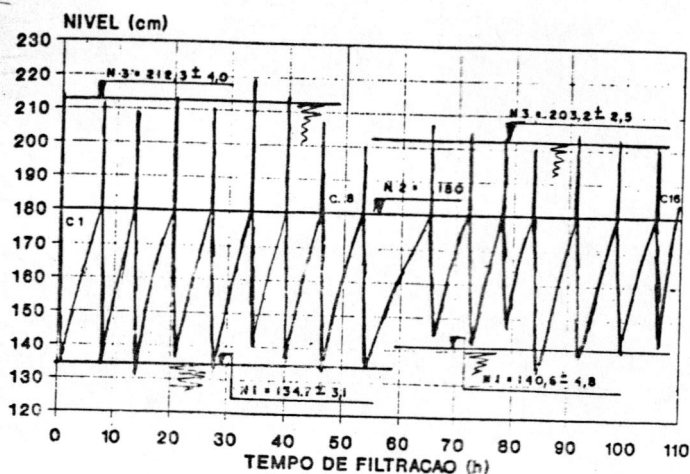


FIGURA 9 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 2 - VARIAÇÃO DE NÍVEL

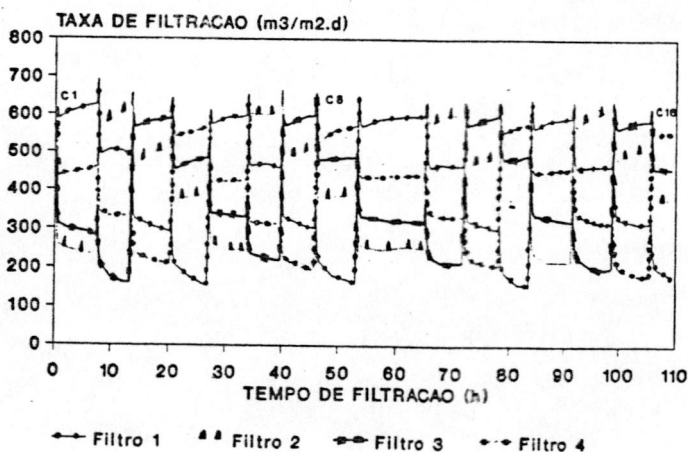


FIGURA 10 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 2 - TAXAS DE FILTRAÇÃO

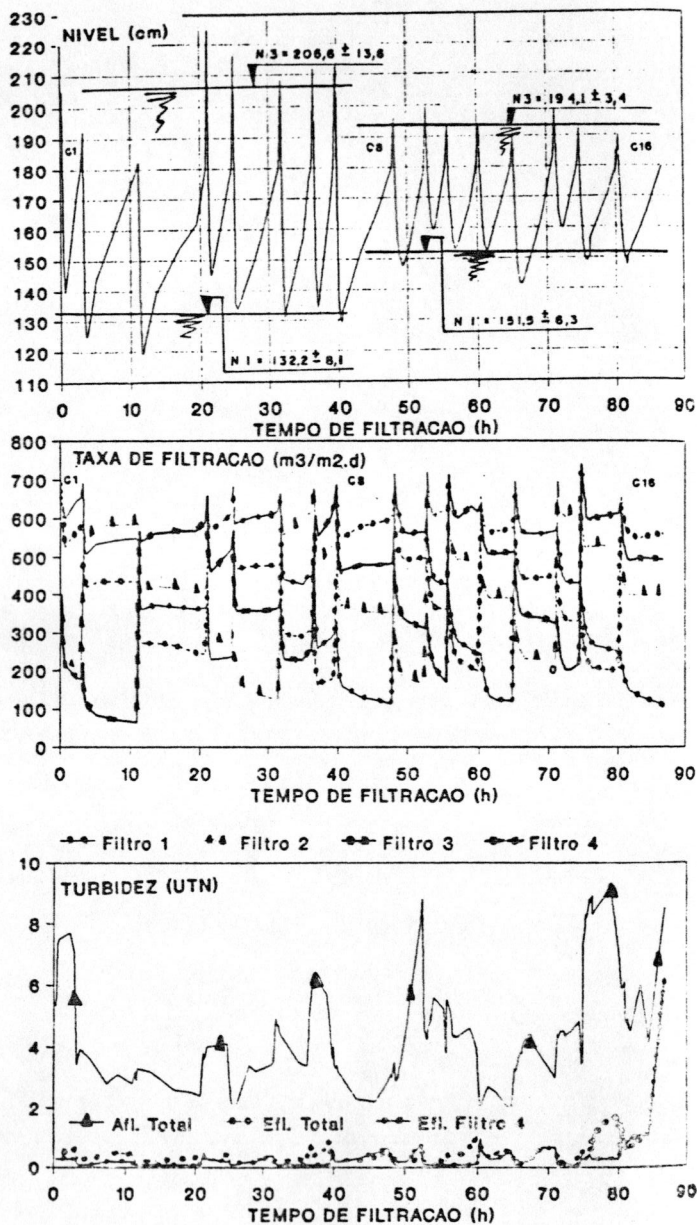


FIGURA 11 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 3

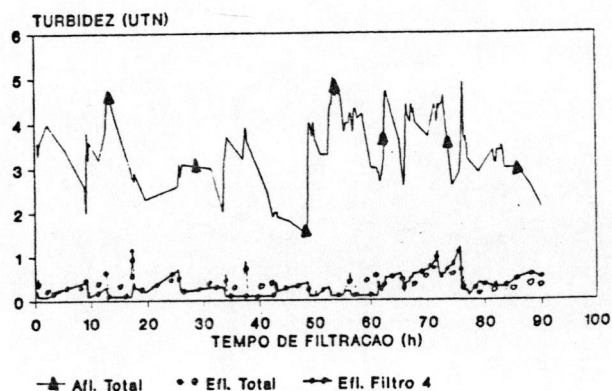
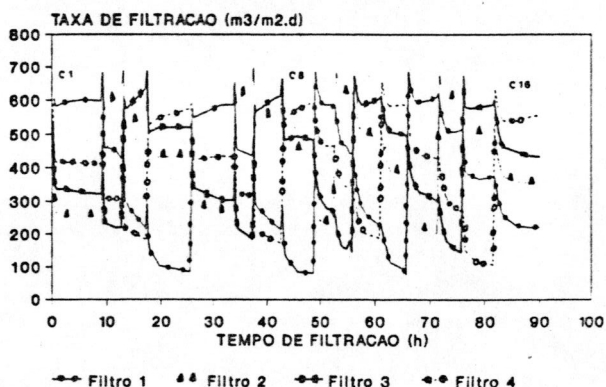
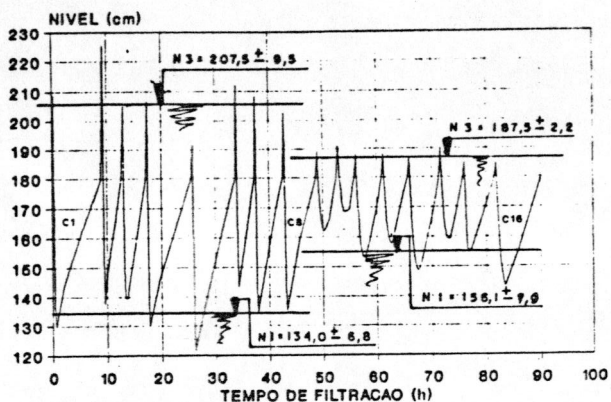


FIGURA 12 - DADOS DE OPERAÇÃO DO ENSAIO 4