# Tratamento de esgotos domésticos através de filtros biológicos de alta taxa. Comparação experimental de meios-suporte de biomassa (\*)

Eng.\* Pedro Alem Sobrinho (MSc. Dr.)\*\*

#### 1. INTRODUÇÃO

O filtro biológico é um processo de tratamento de águas residuárias muito pouco utilizado no Brasil, especialmente pela falta de alternativas de materiais de enchimento produzidos no país, até há pouco tempo, que permitissem o dimensionamento de um sistema em condições de competir vantajosamente com outros sistemas de tratamento de esgotos.

Com a produção no país de materiais de enchimento de filtros biológicos, como elementos plásticos e o agregado leve de lodo de esgotos, que poderão permitir maiores taxas orgânica e hidráulica de aplicação ao filtro, e estruturas mais leves, e com o baixo consumo de energia elétrica característica deste processo, o mesmo passou a merecer especial atenção dos engenheiros envolvidos no tratamento de águas residuárias. Também o problema do incômodo desenvolvimento de moscas em filtros biológicos poderá ser solucionado pela utilização de filtros de alta taxa.

Para que o processo seja utilizado racionalmente, diferentes tipos de enchimento plástico, como os do tipo "anel de Raschig", e os agregados leves obtidos de lodos de esgotos domésticos, devem ser pesquisados, inicialmente para esgotos domésticos e posteriormente para despejos industriais, tendo em vista as condições brasileiras.

Este trabalho apresenta informações gerais sobre os filtros biológicos, bem como apresenta os resultados de operação, com esgotos domésticos de dois filtros biológicos - piloto, sendo um com enchimento de material plásti-

co, com anéis do tipo "Raschig" e o outro com enchimento de agregado leve de lodo de esgotos, produzido pela Sabesp. São ainda apresentadas relações entre carga orgânica removida e aplicada e algumas sugestões para o projeto de filtros biológicos de alta taxa.

#### 2. O PROCESSO

Os leitos percoladores, indevidamente denominados filtros biológicos, consistem de um leito de material altamente permeável, nos quais se aderem os microorganismos e através dos quais o líquido a ser tratado é percolado. O material de enchimento normalmente consiste de pedras, diâmetro variando entre 25 mm e 100 mm. A profundidade do leito de pedras varia em cada caso, mas é usual na faixa de 0.9 m a 2.5 m, sendo a mais comum de 1,8 m. Filtros biológicos que usam material plástico como enchimento, o que é relativamente recente, são construídos com a seção transversal circular, quadrada ou ainda retangular, e suas profundidades podem atingir 9 m ou mesmo 12 m. Os filtros com enchimento de pedras são normalmente circulares, e o líquido a ser tratado é distribuído sobre o topo do leito por um distribuidor rotativo.

Os filtros são construídos com um dreno inferior para coleta do líquido tratado e dos sólidos biológicos que se desprendem do material do leito. Esse sistema de drenagem é importante tanto para coletar os líquidos já percolados, quanto para permitir a circulação do ar através do leito. Os líquidos coletados são encaminhados a um decantador onde os sólidos são separados do efluente final. É comum. na prática, uma parte dos líquidos coletados no sistema de drenagem, ou do efluente final retornar ao filtro, para diluir o despejo ou ainda para manter taxas de aplicação superficial mínimas, adequadas à boa operação do

A matéria orgânica presente no despejo é degradada por uma população de microorganismos presa ao material de enchimento do filtro. A matéria orgânica do líquido é adsorvida na camada biológica ou limo. Na parte mais externa da camada biológica, a matéria orgânica é degradada pelos microorganismos aeróbios e facultativos. Conforme os microorganismos crescem, a espessura do limo aumenta, e o oxigênio que entra na camada biológica por difusão, é consumido antes que ele possa penetrar por toda a profundidade do limo. Portanto, um ambiente anaeróbio se forma próximo à superfície do material de enchimento do filtro.

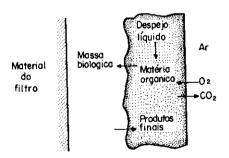


Figura 1 — Representação esquemática de uma seção transversal de um limo em um filtro biológico

Conforme o limo cresce em espessura, a matéria orgânica adsorvida é metabolizada antes que possa chegai aos microorganismos próximos à superfície do material do leito. Como consequência da falta de uma fonte externa de alimento os microorganismos, próximos à superfície do material de enchimento do leito, entram na fase de crescimento endógeno e perdem a sua habilidade de se prenderem à superfície do material de suporte do limo. O líquido então arrasta pedaços dessa camada biológica e uma nova camada de limo começa a crescer. Este fenômeno de perda da camada do limo é primeiramente uma função das

<sup>(\*)</sup> Trabalho desenvolvido na Diretoria de Pesquisas da Cetesb através do Convênio DAEE-Cetesb.

<sup>(\*\*)</sup> Engenheiro da Diretoria de Pesquisas da Cetesb - Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP e da EE Mauá.

cargas orgânica e hidráulica aplicadas ao filtro biológico.

A carga hidráulica influi no arraste do limo pelo atrito e a carga orgânica influi na taxa de metabolismo da camada biológica. Em bases de taxas de aplicação das cargas orgânica e hidráulica, os filtros são normalmente divididos em duas classes: baixa taxa (ou convencional) e alta taxa.

# 3. A COMUNIDADE DOS FILTROS BIOLÓGICOS

#### 3.1. Composição

Embora os filtros biológicos se apresentem de algum modo diferentes do ambiente natural, eles proporcionam um ambiente atraente para uma grande faixa de microorganismos e para alguns animais maiores. A composição dos maiores grupos na comunidade dos filtros biológicos é abaixo descrita, juntamente com algumas observações sobre seus hábitos alimentares e atividades metabólicas.

#### a) Bactérias

As bactérias formam o grupo predominante de organismos na maioria dos filtros biológicos. A flora bacteriana consiste principalmente de bacilos gram-negativos derivados da água natural os quais ocorrem em número superior a 2 x 10° por mililitro. A composição de espécies é extremamente variável, mas essa variação parece não ter qualquer significado, uma vez que uma grande variedade de espécies possui poder metabólico similar e tem atividades metabólicas similares. As bactérias crescem como uma massa de lodo sobre o material do filtro biológico, com o número de bactérias diminuindo em relação ao suprimento de alimento e energia através da profundidade do leito. Fatores bióticos, tais como a predação, podem alterar esta regra primária.

Além das bactérias heterotróficas em geral, que foram acima referidas, existe nos filtros biológicos um grupo importante de bactérias químico-autotróficas — as nitrificadoras — pertencentes ao gênero Nitrossomonas (responsável pela transformação NH3 → NO2) e Nitrobacter (responsável pela transformação NO2 — NO3).

O alimento utilizado, no caso de bactérias, é principalmente material orgânico em suspensão ou em estado coloidal que são adsorvidos na superfície das camadas de limo. Aí ele é transformado em material solúvel, se já não o é, e passa por difusão para dentro das células bacterianas.

# b) Fungos

Estes organismos estão presentes na maioria dos filtros biológicos, e, ocasionalmente, podem dominar a comunidade. Seus requisitos metabólicos são levemente diferentes dos das bactérias, uma vez que os fungos podem se reproduzir com mais sucesso

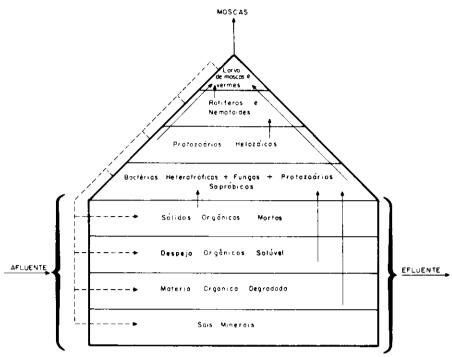


Figura 2 — Pirâmide trófica da comunidade de filtros biológicos

a relações de carbono para nitrogênio maiores, e podem também tolerar condições mais ácidas. Porque eles competem com maior sucesso do que as bactérias para a utilização de compostos orgânicos complexos, os fungos são encontrados principalmente nas camadas mais altas do filtro biológico (²).

Os fungos se utilizam das mesmas fontes de alimentação e energia que as bactérias, e, portanto, competem diretamente com estas. Suas taxas metabólicas são levemente menores e eles sintetizam uma maior proporção do substrato do que as bactérias.

#### c) Protozoários

Numericamente os protozoários são superados apenas pelas bactérias e são membros importantes da comunidade dos filtros biológicos. A classe mais importante dos protozoários é a dos ciliados. Protozoários amebóides e flagelados são comuns na comunidade

Protozoários ciliados são muito maiores do que as bactérias, mais ainda são microscópicos e vivem rodeados de agrupamentos de bactérias, como parte do lodo do filtro biológico. Eles se alimentam predominantemente de bactérias e fungos. Sua taxa metabólica é mais baixa do que a das bactérias.

Como ocorre com as bactérias, o número de população específica varia bastante, mas aparentemente sem qualquer efeito sobre a qualidade do efluente. O número de protozoários aumenta no inverno, mas não tanto quanto as bactérias.

## d) Pequenos Metazoários

Estes são predominantemente Nematóides. Os Nematóides estão presentes em grande número no lodo do filtro biológico e têm uma taxa metabólica suficientemente alta, de modo a ter uma contribuição significativa na atividade da comunidade. Os Nematóides se alimentam principalmente de partículas e assim competem com os Protozoários, mas eles também absorvem uma certa quantidade de seu alimento da solução.

Os Rotíferos são comuns em filtros biológicos, especialmente nas camadas inferiores. Eles não contribuem significativamente para o processo de estabilização da matéria orgânica dissolvida no líquido e sua presença é meramente sintomática de tratamento.

## e) Grandes Metazoários

Esses são frequentemente chamados de "Fauna Consumidora", uma vez que eles são macroscópios e se alimentam de organismos menores existentes no lodo. Esse grupo consiste de Vermes Anelídios e Larva de Insetos. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos sobre este grupo, uma vez que eles são bastante importantes na operação dos filtros biológicos, mas os fatores determinantes da predominância de moscas ou vermes permanecem obscuros. De algum modo, o material de enchimento do filtro biológico sendo de grande área superficial específica e muitas cavidades, tenderá a favorecer o desenvolvimento da população de vermes.

Qualquer que seja a composição da "Fauna Consumidora", vermes ou larvas de moscas, eles são responsáveis pelo controle do crescimento da camada de lodo sobre o material do filtro, pelo menos em temperaturas superiores a 10°C. Durante períodos de baixas temperaturas o balanço entre predadores é destruído.

NÍVEL TRÓFICO

De acordo com Hawkes (1) a estrutura da comunidade de um filtro biológico pode ser resumida na figura 2.

Esta figura indica os tamanhos relativos da população do filtro biológico e o inter-relacionamento entre si e para com o conteúdo orgânico do despejo. Um enfoque mais detalhado é mostrado na figura 3, onde as principais populações e a cadeia alimentar são apresentadas (2). Quase toda a matéria orgânica que é removida do despejo é adsorvida pelas bactérias e transformada em matéria inorgânica e protoplasma bacteriano. Uma parte da matéria orgânica afluente é consumida por Ciliados e Nematóides, mas seu principal alimento são as bactérias. A fauna predadora se alimenta indiscriminadamente dos outros grupos e são indubitavelmente os mais importantes predadores. A predação é extremamente importante não apenas pelo controle da população bacteriana, mas também porque as bactérias são transformadas em unidades maiores com melhores qualidades de sedimentabilidade.

Para temperaturas superiores a 10°C existe um equilíbrio dinâmico entre os números das principais populações. Os números são limitados pelo fornecimento de alimento e predação. Para a população bacteriana, a qualquer profundidade, o alimento disponível pode ser expresso em termos da concentração média de matéria orgânica da interface líquido-filme biológico. Qualquer troca na concentração inicial de alimento ou nas condições hidráulicas do filtro altera o número de bactérias. Existe no meio mais alimento do que o necessário apenas para manter a população bacteriana e, tal condição produziria um aumento da população de bactérias, não fosse a ação predadora dos Ciliados, Nematóides e Fauna predadora. O balanço entre predados e predadores não é um equilíbrio estacionário, mas sim é sujeito a flutuações sensíveis.

# 4. CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS BIOLÓGICOS

Os filtros biológicos são classificados em função das taxas de aplicação hidráulica e orgânica de acordo com Metcalf e Eddy (3), como:

- Filtros de baixa taxa (ou convencional):
- Filtros de taxa intermediária;
- Filtros de alta taxa; e
- Filtros de taxa superalta (ou grosseiros).

As características principais de cada tipo de filtro biológico são apresentadas na tabela 1.

#### Filtros de Baixa Taxa (Convencional)

São unidades relativamente simples, capazes de produzir um efluente de qualidade consistente, com um afluen-

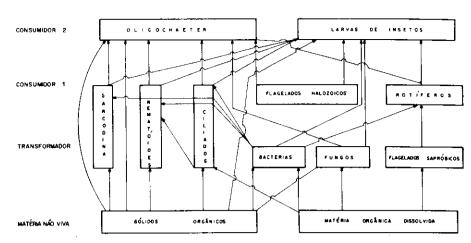


Figura 3 — Estrutura trófica de uma comunidade de filtro biológico (Ref. 2)

Tabela 1 — Comparação de diferentes tipos de filtros biológicos(3)

Itea		Classificação	do Filtro	
	Filtro de Zaixa Taxa	Filtro de Taxa Intermediária	Filtro de Alta Taxe	filtro de Taxa Super Alta (Grosseiro)
- Taxa de Aplicação Hidrávlica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> x dia	1 - 4	4 - 10	10 - 40	40 - 200
- Taxa de Aplicação Orgânica kg DBO/m³ x dia	0,08 - 0,32	0,24 - 0,48	0,38 - 1,00	0,80 - 6,00
- Profundidade m	1,5 - 3,0	1,25 - 2,50	1,0 - 12,0	4,0 - 12,0
- Taxa de Recirculação	0	0 - 1	1 - 3	1 - 4
- Material de Enchimento	Pedra, Escoria, etc.	Pedra, Escória, etc.	Pedra, Escôria, Mat.M <u>r</u> têtico.	Materiais Sintéticos Madeira Vermelha.
- Potencia Requerida Kw/1000 m <sup>3</sup>	2 - 4	2 - 8	6 - 10	10 - 20
- Moscas do Filtro	Muitas	Intermediários	Pouces, as lerves são carreades	Poucas ou nenhuma
- Arraste do Limo	Intermitente	Intermitente	Continua	Continua
- Intervalos de Dosagem	Henor que 5 minutos Normalmente Intermitente	15 a 60 segundos (Contínus)	Menor que 15 segundos (Continua)	Continua
- Efluente	Normalments bem nitri ficado	Parcialmente Witrificado	Nitrificado a Baixas Cargas	Nitrificado a Baixas Cargas

te de características variáveis. Geralmente mantém-se uma carga hidráulica constante, não pela recirculação, mas pelo uso de bombas e poço de sucção com controle de nível ou pelo uso de sifão de dosagem. Os tanques de dosagem são pequenos, normalmente com um tempo de detenção de apenas quatro minutos baseado na vazão média afluente, minimizando dosagens intermitentes. Mesmo assim, nas estações de tratamento de pequeno porte, as pequenas vazões noturnas resultam em dosagem intermitente.

Se o intervalo entre as dosagens é maior que uma a duas horas, a eficiência do processo cai, porque as características do limo se alteram pela diminuição da umidade. Em muitos filtros de baixa taxa, apenas a camada superior de 0,6 m a 1,2 m do filtro tem apreciável quantidade de limo biológico. Como consequência, as partes inferiores do filtro podem ser habitadas por bactérias autotróficas nitrificadoras, que oxidam o nitrogênio amoniacal para as formas de nitrito e nitrato. Se as bactérias nitrificadoras estão presentes em quantidades adequadas, e se as condições climáticas e as características dos despejos são favoráveis, um filtro biológico de baixa

taxa pode produzir uma boa remoção de DBO e também um efluente altamente nitrificado.

As perdas de carga através do filtro podem estar entre 1,5 m e 3 m, o que pode ser um fator desfavorável se o local for muito plano para permitir o escoamento por gravidade. Para terrenos com inclinação favorável, o uso de filtros é mais favorecido.

Os filtros biológicos de baixa taxa apresentam, porém, algumas desvantagens. O desenvolvimento de odores desagradáveis é comum, especialmente se o afluente for séptico, ou se o clima for muito quente. As moscas do filtro (Psychoda) podem aparecer em grandes quantidades, a menos que medidas de controle sejam tomadas.

#### Filtros de Alta Taxa e de Taxa Intermediária

Nestes filtros, a recirculação do efluente do filtro ou do efluente final permite a aplicação de cargas orgânicas maiores. Diagramas de fluxo de diferentes arranjos possíveis para os filtros biológicos de taxas intermediária e alta serão apresentados posteriormente.

A recirculação do efluente final per-

mite aos filtros de alta taxa obter a mesma eficiência que os de taxa baixa e intermediária. A recirculação do efluente do filtro resulta no retorno de microorganismos ativos, o que contribui para melhorar a eficiência do tratamento. A recirculação também contribui para prevenir o entupimento do filtro, reduzir os eventuais problemas de odor e evitar a proliferação de moscas.

#### Filtros de Taxas Superaltas ou Grosseiros

Esses filtros surgiram em função do desenvolvimento de vários tipos de materiais de enchimento sintéticos ou de madeira. As maiores aplicações dos filtros grosseiros têm sido para despejos mais concentrados e para tratamento parcial. Devido à alta área superficial específica (área superficial por unidade de volume), os materiais de enchimento sintéticos podem ter desempenho tão bom como outros materiais operando com cargas de aplicação menores.

#### 5. SISTEMAS DE FILTROS BIOLÓ-GICOS — ARRANJOS E RECIRCULAÇÃO

#### Necessidade de Pré-Tratamente

O grau de pré-tratamento proporcionado às águas residuárias influirá no desempenho e no projeto do filtro biológico. Tratamento químico, equalização, neutralização, pré-cloração e préaeração, são todos processos de prétratamento que podem melhorar o desempenho dos filtros biológicos pela modificação das características do afluente. Devido aos custos de capital e de operação dos pré-tratamentos é necessário um estudo econômico sobre os benefícios que se terá com o seu uso.

Devido a problemas de entupimento, observados no passado, utiliza-se sempre uma decantação primária antes do filtro biológico. A eficiência do tratamento primário tem um efeito direto no projeto e no desempenho do filtro biológico.

#### Recirculação — Arranjos

Um elemento importante no projeto de filtros biológicos é a parcela de efluente do filtro ou do efluente final que retorna para o filtro. Esta prática é denominada recirculação e a relação entre a vazão retornada e a vazão afluente é chamada de taxa de recirculação. A recirculação é considerada um fator muito importante no projeto de filtros, pois aparentemente aumenta a eficiência na remoção de DBO e impede que o filtro figue seco.

Muitos sistemas de recirculação têm sido utilizados em projetos de sistemas de filtros biológicos. Alguns tipos de arranjos, incluindo sistemas de filtros biológicos de um e dois estágios, são apresentados na figura 4.

Os arranjos mais comuns para filtros de um estágio são aqueles de a até e.

#### Taxa de Recirculação

A decisão de se usar ou não a recirculação e a definição do valor da taxa de recirculação devem ser consideradas em estudos econômicos entre as várias alternativas de projeto, que possam apresentar o mesmo nível de tratamento dos despejos. Quando utilizada, a taxa de recirculação varia de 0,5 a 4, porém valores de 10 ou ainda maiores são por vezes utilizados. Entretanto, Galler e Gotaas(3) demons-

traram que uma taxa de recirculação superior a 4 não aumenta a eficiência dos filtros e, também, é antieconômica.

#### Efeito da Recirculação

A recirculação é considerada como capaz de aumentar a eficiência na remoção de DBO nos filtros com enchimento de pedras, devido às seguintes considerações (\*):

- a) A matéria orgânica presente no afluente ao filtro é colocada em contato com o material biológico ativo do filtro por mais de uma vez. Isto aumenta a eficiência do contato e semeia o filtro, em toda a sua profundidade, com uma grande variedade de microorganismos.
- b) Se a vazão de recirculação passa através do decantador primário, ela apresenta uma certa regularização da carga orgânica aplicada ao filtro, em um período de 24 horas. A menor concentração de matéria orgânica não ativa no líquido recirculado dilui o afluente em termos de concentração de carga orgânica. A recirculação suplementa os despejos em horas de pequena vazão afluente. Esses pontos ajudam a manter os filtros em boas condições durante os períodos de flutuação de carga.
- c) A recirculação através de decantadores primários tende a melhorar a qualidade de esgotos velhos e sépticos e reduz a formação de escuma. Também, a recirculação contínua para o decantador primário, do lodo depositado no fundo do decantador secundário, remove o lodo e reduz a depleção de oxigênio do efluente final.
- d) A recirculação melhora a distribuição sobre a superfície do filtro, reduz a tendência de colmatação e, se suficientemente alta, ajuda no controle das moscas. Estas vantagens, frequentemente garantem o grau de tratamento desejado com um pequeno gasto adicional, em relação aos sistemas sem recirculação.

A recirculação, quando aplicada a filtros com enchimento plástico, envolve um conceito um pouco diferente do que o previamente aplicado aos filtros com enchimento de pedra. Vários tipos de materiais de enchimento dos filtros de taxas alta e superalta requerem valores mínimos da taxa de aplicação hidráulica por unidade de área para induzir o limo biológico através de toda a profundidade do filtro. Estas taxas mínimas estão na faixa de 25 m3/m2 a 60 m3/m2/dia para enchimento plástico ordenado dos filtros grosseiros é da ordem de 5 m3/m2/ dia para filtros de enchimento plástico

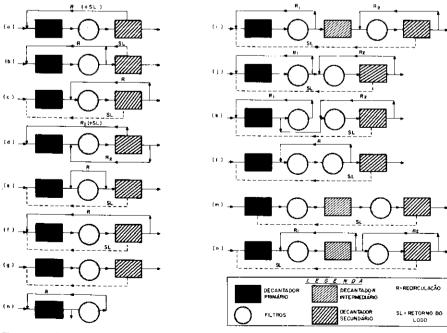


Figura 4 — Esquema de sistema de filtros biológicos (Ref. 4)

colocados ao acaso e usados em filtros de alta taxa. Portanto, a recirculação em filtros com enchimento plástico é praticada de modo a manter taxas adequadas de aplicação de carga hidráulica para cada material em particular. Geralmente, aumentando a carga hidráulica, substancialmente acima das taxas de aplicação mínima requerida, não aumenta a eficiência de remoção de DBO através do filtro. A recirculação é usada em filtros grosseiros, geralmente para manter a taxa de aplicação hidráulica superior à mínima requerida, e também, regulariza as variações de vazão afluente.

# 6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL DE ENCHIMENTO DOS FILTROS BIOLÓGICOS

O enchimento dos filtros biológicos (ou meio suporte) é de fundamental importância no desempenho do processo. O enchimento do filtro serve como sistema de suporte para o crescimento do limo de microorganismos, por onde se escoa a água residuária. O ar passa através dos espaços vazios do enchimento do filtro, fornecendo o oxigênio necessário às reações aeróbias que ocorrem no processo.

O enchimento de filtro biológico convencional pode ser brita, pedregulho, coque ou carvão, que têm capacidade limitada de proporcionar grande área superficial por volume unitário do filtro, devido à sua configuração geométrica. Como o objetivo do material de enchimento de um filtro biológico é proporcionar uma área superficial suficientemente grande, para o crescimento de microorganismos aeróbios à sua superfície, deveria existir uma relação entre área superficial e número de microorganismo e de modo geral, quanto maior o número de microorganismos, mais será a quantidade de DBO removida por unidade de volume do meio suporte. Com material mineral, não apenas a área disponível para o desenvolvimento do limo é relativamente pequena, mas também a oxigenação é pobre, devido às limitações ao fluxo de ar. Ainda o crescimento não uniforme do limo e o arraste de lodo contribuem para a obstrução dos espaços irregulares e variados entre as pedras.

As eficiências físicas dos materiais minerais e as possibilidades limitadas de tratar cargas hidráulicas e orgânicas por unidade de volume fizeram com que pesquisas fossem desenvolvidas para se encontrar um material de enchimento de filtros biológicos com propriedades mais adequadas ao processo.

O material de enchimento ideal pode ser definido como tendo as seguintes características:

 a) Deve ser capaz de remover altas cargas de DBO por unidade de volume

- b) Deve ser capaz de operar a altas cargas hidráulicas por unidade de volume e por unidade de área superficial.
- c) Deve possuir uma estrutura adequadamente aberta para evitar obstruções pelo crescimento dos sólidos e para garantir um adequado suprimento de oxigênio, sem necessidade de aeração forçada.
- d) Deve ser estruturalmente forte o suficiente para suportar o seu próprio peso e mais o peso do limo que cresce aderido às suas paredes.
- e) Deve ser suficientemente leve para permitir reduções significativas no custo das obras civis.
- f) Deve ser biologicamente inerte, não sendo atacado pelos microorganismos do processo e nem tóxico a eles.
- g) Deve ser quimicamente estável, não degradando com o uso ou na presença de pequenas quantidades de solventes, químicos orgânicos etc.
- h) Deve apresentar o menor custo possível por quilo de DBO removido, quando utilizado como tratamento biológico convencional.

Para atender, pelo menos em grande parte, a estas características de um material de enchimento ideal, os materiais plásticos são aqueles que no momento apresentam a melhor chance de sucesso.

Como já referido, em função da carga hidráulica e orgânica aplicada, os filtros biológicos podem ser divIdidos nas categorias: baixa taxa (convencional): taxa intermediária, alta taxa e grosseiros. Não existem, na realidade, valores limites para cada categoria e a própria descrição das características varia conforme a prática de cada país. Entretanto, está-se tornando universalmente aceito que os filtros biológicos de alta taxa têm como valores mínimos de 3 m³/m²/dia de carga hidráulica ou 0,6 kg DBO/m³/dia.

A experiência tem demonstrado que os filtros de alta taxa, economicamente, não produzem um efluente de alta qualidade, enquanto filtros de baixa taxa são utilizados para produzir efluentes de boa qualidade. Filtros de Taxa Intermediária, com controle da acumulação do limo biológico, como a Dupla Filtração Alternada, são também utilizados para a produção de efluentes finais de boa qualidade.

Em termos de massa de DBO removida por unidade de volume do enchimento do filtro, têm-se necessidades distintas para dois tipos gerais de enchimento:

 a) Para a remoção de grandes quantidades de DBO por unidade de volume do filtro a eficiências de 50% a 60%.  b) Para a remoção de pequenas quantidades de DBO por unidade de volume do filtro a eficiências de 90% a 95%.

Em vista disso, pode-se adiantar que não é uma proposição prática desenvolver um material de enchimento ideal a partir de plástico ou de outro material. Material de enchimento de plástico é comumente chamado de "grosseiro" e os de outro material de enchimento são os de "acabamento" ou de "polimento".

Como os meios de enchimento "grosseiro" e de "polimento" têm funções distintas a desempenhar, é evidente que as características físicas dos dois tipos de meio suporte do limo não serão idênticos quando relacionados às características de um material de enchimento ideal.

De vários trabalhos experimentais desenvolvidos, parece que para meiossuporte de formatos similares, os seus desempenhos, em termos de DBO removida por unidade de volume do filtro, são dependentes da área superficial do meio disponível, porém não proporcional a ela(\*).

Como já referido, o uso de filtros "grosseiros" é caracterizado pela aplicação de altas cargas hidráulica ou orgânica dos despejos, resultando em baixos períodos de detenção e alta taxa de escoamento superficial, e usualmente com desenvolvimento de grandes quantidades de biomassa, chegando a ser observados 300 kg de limo (material úmido) por metro cúbico de filtro. É, portanto, essencial que o meio "grosseiro" deva não apenas suportar a biomassa que cresce presa a ele, mas também deve possuir espaço de vazios suficientes para permitir que o limo carreado pelo fluxo de líquido passe livremente através do filtro. Para satisfazer a estas exigências, pareceria que o limite, em termos de área superficial disponível, é obtido a aproximadamente 140 m²/m³. Para se ter adequado espaço de vazios que permita a passagem livre dos sólidos através do filtro, pareceria que o meio para o tratamento "grosseiro" necessita ser do tipo "ordenado" para propiciar garantias de operação adequada. Entretanto, em se considerando o tratamento de despejos concentrados, particularmente do tipo de carboidratos, onde quantidades maiores de biomassa são formadas, ou o tratamento de despejos de laticínios onde se desenvolvem fungos, ou ainda o tratamento de esgotos apenas gradeado, onde se têm partículas sólidas maiores, são bons casos para se limitar a área superficial na ordem de 100 m²/m³ para manter passagens adequadas para a remoção dos sólidos. Por outro lado, onde esses fatores não são críticos, quanto maior a área superficial específica maior é a capacidade do enchimento do filtro em termos de depuração biológica.

Tabela 2 — Comparação entre diferentes materiais de enchimento de filtros biológicos

MATERIAL DE ENCHIMENTO	ĀREA SUPERFICIAL ESPECĪFICA m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	ESPAÇO VAZIO Z	MATERIAL
- ENCHIMENTO DE TUBOS VERTICAIS			
. Cloisonyle	220	94	PAC
- ENCHIMENTO EM FORMA DE PLACAS			
, ICI - Flocor E	90	95	PVC
, ICI - Flocor M	135	95	PVC
. Munters Plandek B-27060	100	95	PVC
. Munters Plasdek B-19060	140	95	PVC
. Hunters Plasdek B-12060	230	95	PVC
. Surfpac	92	94	PAC
- ENCHIMENTO COM PEÇAS NÃO ORDENADAS			
. Norton Actifil - 90 E	101	95	Polipropileno
. Norton Actifil - 50 E	124	92	Polipropileno
. Norton Actifil - 75	160	92	Polipropileno
. M.T. Filterpak 1127	120	93	Polipropileno
. M.T. Filterpak 1130	190	93	Polipropileno
. M.T. nº 2 Mini ring	118	93	Polipropileno
. N.T. nº 3 - Mini ring	79	94	Polipropileno
. ICI - Flocor R	250	97	Polipropileno
. Pedras (25,4 mm)	105	53,8	Pedra
. Pedras (63 का) Agregado leve de lodo de esgoto	125	58	Pedra

Em consequência do exposto, segue que os meios "grosseiros" de filtros biológicos devem ser constituídos de estruturas preparadas de modo a proporcionar fluxo uniforme do despejo aplicado sobre a superfície do material de enchimento sem qualquer "curto-circuito" significativo por queda livre ou "canais" preferenciais.

Se é aceito que o desempenho de meio de "acabamento" ou "polimento", em termos da quantidade de DBO removida por unidade de volume do filtro, também, depende da área superficial específica disponível, e em termos gerais de polimento, isto envolve a remoção de pequenas quantidades de DBO por unidade de volume do filtro, segue que o meio de "polimento" deveria ter uma área superficial major do que a dos mejos "grosseiros" e poderia tolerar um volume de vazios menor. Para esta finalidade, seria desejável uma área superficial específica da ordem de 250 m²/ m3 de meio suporte. De modo a se obter área superficial específica desta magnitude e manter o produto a preços aceitáveis, parece que o meio para "polimento" deve ser do tipo 'não ordenado" ("ao acaso").

Baseados em seu formato, os meios de enchimento de plástico podem ser classificados em:

- Enchimento com tubos verticais;
- Enchimento formando placas:
- Enchimento com peças "não ordenadas" (ao acaso).

A tabela 2 apresenta uma comparação das propriedades de vários materiais de enchimento de filtros biológicos.

## - Enchimento com Tubos Verticals

O enchimento de filtros biológicos de tubos verticais mais comum é o

"Cloisonyle" com os tubos de PVC de diâmetro externo de 80 mm e dividido internamente, colocados de modo a formar uma colmeia com pequenos canais de seção quadrada de 15 mm de lado. Uma grande área superficial é, portanto, disponível para o suporte da biomassa. O enchimento é normalmente feito de PVC não plastificado e a parede externa é de 0,7 mm. O comprimento dos tubos é igual à altura do leito do filtro e normalmente varia de 4 m a 6 m.

#### — Enchimento Formando Placas

Existem vários tipos diferentes de enchimento formando placas, alguns dos quais são citados na tabela 2. Normalmente os enchimentos são constituídos de placas de PVC, as quais são rígidas e corrugadas, o que aumenta a área superficial específica e melhora a distribuição do líquido. As placas são montadas de modo a formar blocos retangulares. Os blocos do enchimento Flocor têm 1,2 m x 0,6 m x 0,6 m. As placas podem ser transportadas separadamente para montagem dos blocos no local do uso ou então já transportadas, em blocos montados. Esses blocos são colocados uns sobre os outros de modo a se ter cada camada formando ângulo reto com a camada imediatamente a baixo. Leitos com altura de pelo menos 3 m são utilizados sem suporte intermediário. A área superficial específica do meio plástico depende do espaçamento entre as placas, que para o Flocor pode variar entre 40 mm e 60 mm.

#### Enchimento com Peças não ordenadas (ao acaso)

O enchimento normal dos filtros biológicos convencionais é do tipo não

ordenado. Normalmente são utilizados materiais inertes (pedras, pedregulhos, "slag", "clincker"), com tamanhos nominais de 25 mm a 75 mm. Em geral, por problemas da estrutura do filtro, as suas alturas são limitadas a cerca de 2 m.

Mais recentemente, o uso de peças de plástico para enchimento ao acaso vem se desenvolvendo bastante, sendo já bem conhecidos enchimentos como a Actifil a Filterpak. As peças são feitas de polipropileno, formando cilindros (Actifil) ou troncos de cone (Filterpak), com paredes perfuradas e internamente divididos com paredes formando setores, de modo a aumentar a área superficial específica. Essas peças proporcionam pequenos espaçamentos no leito, o que propicia um melhor fluxo do líquido através do leito do filtro.

As peças plásticas são entregues no local de uso e simplesmente jogadas dentro do filtro.

Os filtros com enchimento plástico são, em geral, altos, podendo atingir 12 m, embora tal altura não seja usual

#### 7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A HIDRÁULICA DOS FILTROS BIOLÓGICOS

Hidraulicamente, de acordo com James (²), um filtro biológico convencional ou de baixa carga com peças de enchimento colocadas ao acaso, se comporta como uma esponja saturada. Isto permite manter a máxima quantidade de líquido entre as aplicações do despejo e então cada ciclo provoca uma reação de fluxo em cadeia, descendo através do leito percolador. Existem então duas condições hidráulicas típicas no leito:

- a) Um período de condições de "repouso" entre os períodos de aplicação do líquido, ocorrendo uma drenagem lenta.
- b) Um período de fluxo turbulento, durante a aplicação do líquido (dosagem).

Qualquer material passando através do leito percolador terá os ciclos regulares citados. A transição entre os dois tipos de fluxo é quase que abrupta, e é então possível considerar o tempo de detenção total como sendo composto de um número de períodos de fluxo não turbulento, separados por períodos de dosagem abruptas, os quais são responsáveis pelo deslocamento e mistura. Do ponto de vista ecológico as condições hidráulicas no filtro podem ser definidas em termos de dois parâmetros, que são: o tempo de detenção e o grau de mistura(2).

O grau de mistura é importante porque, durante o período de fluxo não turbulento, a taxa de transferência de matéria orgânica decresce, devido à formação de gradiente de concentração na película líquida, sobre o

limo. Estes gradientes são destruídos pela "mistura" durante os períodos de dosagem. Também a "mistura" ocorre entre faces adjacentes do líquido escoando através do leito percolador. O grau de mistura é uma função da extensão da "mistura" que cada dosagem causa e o número de tais "misturas" que ocorrem durante o periodo de detenção total.

Em termos das variáveis normalmente utilizadas no projeto e operação de filtros biológicos, a condição hidráulica é especificada pela carga hidráulica (taxa de aplicação hidráulica) e frequência de dosagem. O re-Jacionamento entre as variáveis de engenharia e ecológicas é mostrado na tabela 3.

Em muitos leitos percoladores, a frequência de dosagem é uma variável "perigosa" desde que ela é controlada pelas variações de vazão para a câmara sifonada a qual dosa o leito. Como sua importância vem sendo reconhecida como bastante significativa, mais leitos estão sendo providos de distribuidores motorizados(²).

Quanto ao tempo de contato entre o líquido e o limo preso ao material de enchimento, Oleszkiewicz(12) relata que para filtros de alta taxa, esse tempo de contato varia entre 5 minutos e 20 minutos, embora Schulze(13) tenha relatado tempo de contato de até 8 segundos. Através de experimentos, Schulze (13) demonstrou que o tempo de detenção no filtro reduz com o aumento de vazão e Eckenfelder (11) observou que esse tempo aumentou com a área específica do material de enchimento e que a eficiência de remoção de substrato em um filtro biológico é influenciada pelo tempo de detenção.

A presença do limo biológico tem influência bem significativa no tempo de detenção de um filtro biológico, tendo sido observado pelo Water Pollution Research Laboratory que um filtro convencional de pedras, com 1,8 m de altura, o tempo de detenção de um filtro em operação normal era cerca de três vezes aquele observado para o filtro sem o lodo biológico. Eckenfelder (11) e Bloodgood e Howland tam-

Tabela 3 — Relacionamento entre variáveis de engenharia e ecológicas(2)

Variáveis de Engenharia	Varíáveis Ecológicas	Relação
Carga Hidrā <u>u</u> 1ica	Tempo de Detenção (t)	t a $\frac{1}{q^0,67}$ *
(q)	Grau de Mistura (D)	mudança de q altera o nº de misturas e a sua extensão.
Frequência de l Dosagem	Tempo de Detenção (t)	t não é relacionado com N
(n)	Grau de Mistura (D)	рαΝ

<sup>\*</sup> Resultado de investigação por vários autores.

Malina(7), para o estudo de filtros biológicos, considera o escoamento nessa unidade como sendo tubular, enquanto Eckenfelder(11) considera o escoamento como sendo de mistura completa. Estudos com traçadores indicaram que existe no filtro alguma mistura, porém sem a existência de "curto-circuito".

Atkinson et alli(\*) propuseram um modelo hidráulico para os filtros biológicos em que se incluía o número de Reynolds. Considerando o perimetro molhado dentro da seção do filtro como constante, com o aumento da taxa de aplicação hidráulica o número de Reynolds aumentará e, consequentemente, o regime de escoamento passará de laminar para turbulento. Vários autores(9, 10) consideram que o regime turbulento melhora o contato entre o despejo e o filme biológico, reduzindo o volume do filtro necessário para uma determinada remoção de substrato. Nos filtros de alta taxa, o escoamento é do tipo turbulento.

bém observaram o aumento do tempo de detenção devido à presença do limo no fiftro biológico.

Germain (14) observou que quanto maior o tempo de detenção dos despejos no filtro, melhor a sua eficiência. Esta observação está de acordo com as teorias em geral apresentadas por diversos autores.

#### 8. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TA-XAS DE APLICAÇÃO DE CARGA ORGÂNICA

Diversos autores discutiram a influência da carga orgânica na eficiência dos filtros biológicos, chegando a resultados contraditórios.

Velz (15), analisou o desempenho de filtros de alta taxa para várias taxas de aplicação orgânica por unidade de área superficial do filtro, concluindo que a remoção de substrato, para uma determinada altura, permanece constante até um valor limite de carga apli-

cada. Este limite estarla próximo de 4,9 kg DBO/m² dia, para temperatura em torno de 30°C.

A equação proposta pelo NRC — National Research Council — USA, prevê uma redução da eficiência com o aumento da taxa de aplicação da carga orgânica (figura 5). A mesma conclusão chegaram Keefer e Meisel — (1952) e Rincke (1967), tendo este apresentado a seguinte equação(1):

$$E = 100 \frac{(So - Se)}{Se} =$$

O So /O = Taxa de aplicação da carga orgânica (IDBO/1000 ft³.dia)

Greeley(16), em 1948, utilizando vários dados operacionais, comparou a eficiência de filtros biológicos com a taxa de aplicação da carga orgânica (figura 7), para faixa de dados bem mais extensa que o NRC, observando que a eficiência diminuía com o aumento da taxa de aplicação orgânica.

Schulze (17) operou um filtro com sete peneiras verticais de 1/2' mesh como meio filtrante, com taxas de aplicação de 2,67 a 6,46 kg DBO/m³. día, e remoção de DBO de 50% a 78%. A análise estatística dos resultados evidenciou que a eficiência do filtro era independente da taxa de aplicação da carga orgânica na faixa estudada (aparentemente a taxa de aplicação hidráulica seria o parâmetro de controle).

Galler e Gotaas (5), analisando grande volume de dados, verificaram que, ao contrário da conclusão de Schulze (11), a eficiência do filtro é afetada pela taxa de aplicação orgânica, e não pela taxa de aplicação hidráulica. Schulze (11) criticou esse trabalho, argumentando que os autores haviam escolhido, como variáveis independentes, parâmetros que na verdade não o eram.

Fleming e Cook (22) estudaram quatro tipos de meios filtrantes, concluindo que a eficiência de remoção de substrato diminuía com o aumento da taxa de aplicação da carga orgânica, tornando-se praticamente constante a partir de 3,8 kg a 5,2 kg DBO/m³. dia.

Eckenfelder e Barnhart (11) estudaram dois meios filtrantes (Polygrid e asbestos), verificando que a eficiência de remoção permaneceu constante para concentrações de DBO variando de 200 mg a 400 mg DBO/1.

Jank e Dryman (18) observaram que a taxa de remoção de matéria orgânica, por unidade de volume do filtro biológico se relaciona com a taxa de aplicação de matéria orgânica por unidade de volume do filtro, através de uma expressão do tipo da equação de

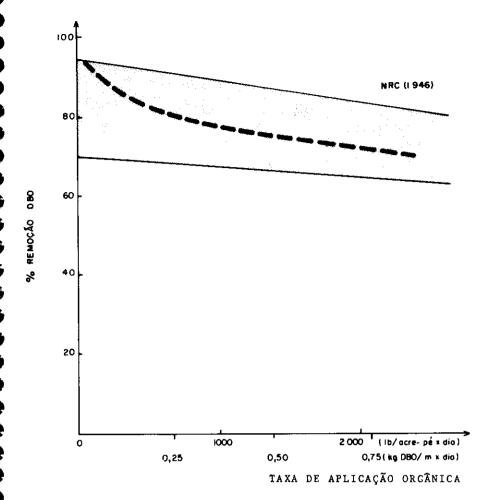


Figura 5 — Influência da taxa de aplicação da carga orgânica na eficiência de filtros biológicos, segundo o NRC (Ref. 7)

Monod, onde se obtém um crescimento da taxa de remoção de substrato com o aumento da taxa de aplicação, com a remoção tendendo assintoticamente a um valor limite máximo.

#### 9. VENTILAÇÃO E OXIGÊNIO DISSOLVIDO

#### Ventilação

A ventilação dos filtros é importante para se manter as condições aeróbias necessárias para o efetivo tratamento dos despejos por via biológica aeróbia. Se forem providenciadas passagens adequadas para o ar, a diferença entre as temperaturas do ar e do líquido é considerada suficiente para produzir a aeração necessária. Em casos onde as paredes laterais do filtro estão acima do nível do terreno, a ventilação pode ser influenciada pelos ventos. Uma boa ventilação no fundo do filtro é desejável.

Na prática de projetos, faz-se com que o sistema de drenagem e os canais do efluente permitam um fluxo livre do ar, que se escoa pelo filtro.

Os fabricantes de material de enchimento plástico, frequentemente recomendam 0,1 m² de área de ventilação para cada 3 m a 4,6 m de perímetro do filtro, para esgotos domésticos. Recomendações dos "Ten State Standards" — USA, requerem que as entradas de ar livre, através do sistema de

drenagem, sejam, no mínimo, 15% da área superficial do filtro, e que os drenos e canais do fundo do filtro não tenham mais do que 50% de sua área transversal ocupada por líquido.

Em filtros muito profundos ou com taxas de aplicação orgânica muito elevadas a ventilação forçada pode ser uma solução adequada. Entretanto, a opinião mais generalizada entre projetistas de filtros biológicos nos USA é de que a ventilação forçada não é justificada. Exceto para filtros cobertos,

ou para aqueles tratando despejos altamente concentrados, não se utiliza ventilação forçada.

#### Oxigênio Dissolvido

Os esgotos, ao saírem do decantador primário, normalmente não apresentam qualquer oxigênio dissolvido. O oxigênio necessário para o tratamento biológico aeróbio dos esgotos é conseguido parcialmente durante a dosagem dos esgotos no filtro e parcialmente durante o escoamento dos líquidos através do filtro. A importância relativa dessas duas fontes de obtenção de oxigênio depende de vários fatores, tais como o tipo dos equipamentos de dosagem, altura do braço de distribuição sobre o topo do filtro, e a natureza do tipo de escoamento dentro do filtro. Tem sido sugerido que a ventilação dos filtros pode ser um fator importante, porém, Truesdale e Eden (2), demonstraram que a taxa de ventilação natural é normalmente maior do que aquela teoricamente requerida. Isto foi confirmado por determinações analíticas da composição da corrente de ar entrando e saindo do filtro.

A concentração de oxigênio no líquido, em qualquer parte, é, portanto, uma função da extensão da aeração inicial e dos processos de consumo de oxigênio e da reaeração. Na parte superior do filtro biológico, a taxa de consumo de oxigênio é frequentemente superior à de reaeração, porém, mais abaixo a situação se inverte, permitindo um aumento na concentração de OD, como apresentado na tabela 4.

## 10. EFEITO DA TEMPERATURA

O desempenho de uma instalação de filtros biológicos é influenciado pelas condições climáticas. A temperatura dentro do leito biológico não corresponde exatamente à temperatura do ar e do solo, devido à iteração de

Tabela 4 — Comportamento do oxigênio dissolvido ao longo de alguns filtros biológicos experimentais (Newcastle upon Tyne — Inglaterra) — filtros convencionais

Ponto de Amostragem	Concentração	do 0.D.(mg/l)
ronco de Amostragem	Verão	Inverno
No braço do Distribuidor Rotataivo	0	0
<ul> <li>Na superfície do filtro</li> <li>0,31 m abaixo da superfície</li> <li>0,61 m abaixo da superfície</li> <li>0,92 m abaixo da superfície</li> <li>1,22 m abaixo da superfície</li> <li>1,53 m abaixo da superfície</li> </ul>	2,1 1,3 1,9 2,5 3,5 4,3	2,2 1,5 1,3 2,4 2,7 3,6

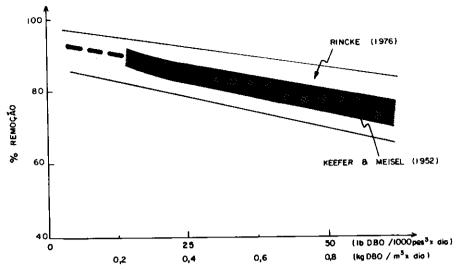


Figura 6 — Influência da taxa de aplicação da carga orgânica na eficiência de filtros biológicos (Ref. 7)

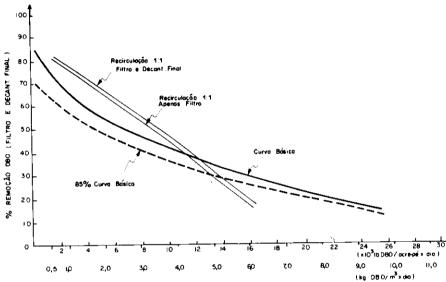


Figura 7 — Eficiência de filtros biológicos em função da taxa de aplicação da carga orgânica, obtida por Greeley(16)

uma variedade de fatores. As várias fontes de energia de calor nos leitos percolares podem ser resumidas como seguem:

- a) Transferência pela radiação
- b) Calor no despejo
- c) Liberação de calor da oxidação biológica
- d) Conversão de energia potencial
- e) Troca com a atmosfera
- f) Troca com o solo.

As temperaturas do fundo e da superfície dos leitos são normalmente diferentes, o que é um fator importante na aeração do sistema.

O relacionamento entre temperatura e eficiência é bastante complexo. Existem indicações de que a temperatura tem influência marcante na eficiência apenas abaixo de 10°C, e que entre 10°C e 30°C existe pequena diferença na eficiência ao nível de bactérias. É fato confirmado que mudanças na composição bacteriana dos filtros ocorrem devido a grandes mudanças de temperatura(²). Existe, entretanto, marcante influência dos leitos biológicos devido a desequilíbrios entre o limo e a fauna que dele se ali-

menta, para os locais de clima temperado. Para climas não sujeitos a temperaturas de inverno muito baixas, esta flutuação sazonal não é muito significativa.

#### 11. CRITÉRIOS DE PROJETO E MECANISMOS DE REMOÇÃO DE SUBSTRATO

Serão aqui apresentados vários critérios de projetos, propostos por diferentes autores, porém deve-se chamar a atenção para o fato de que, embora várias das fórmulas que serão apresentadas incluam muitas das variáveis que podem afetar a operação dos filtros biológicos, o uso de qualquer dessas fórmulas leva apenas a uma aproximação do que se pode esperar do desempenho de filtros biológicos.

As fórmulas para dimensionamento dos filtros biológicos podem ser consideradas em dois grupos distintos que são:

- Fórmulas empíricas
- Fórmulas com fundamentos teóricos

## a) Fórmulas empíricas:

Uma das primeiras fórmulas empíricas foi a obtida em 1946 pelo NRC-National Research Conncil — USA, que relaciona a eficiência dos filtros biológicos à carga de DBO aplicada, à razão de recirculação e ao volume do leito-suporte da biomassa.

A fórmula do NRC é:

$$E(^{\circ}_{\bullet}) = \frac{(So - Se)}{S_{\bullet}} = \frac{100}{100x = \frac{0.S_{\bullet}}{1 + 0.0065} = \frac{0.S_{\bullet}}{V.F}} = 0.5$$

onde:

E = eficiência do sistema (filtro biológico e clarificador final)

S. = DBO afluente

Se = DBO efluente final

Q = vazão afluente ao sistema

OS, = carga de DBO aplicada em lb/dia

V = volume do meio suporte em acre-pé

F = número de passagens dos esgotos pelo filtro

$$F = \frac{1 + RC}{[1 + 0.1 RC]^2}$$

Para a carga de DBO aplicada Q\* So\* em kgDBO/dia e volume do leito V\* em m³, a equação (1) se torna

$$E(\%) = \frac{(So - Se)}{S_{*}} 100 = \frac{100}{1 - 0.163 \times 10^{-3}} \frac{0^{*} S^{*}_{*}}{V^{*} F} 0.5$$
 (1-A)

A equação do NCR foi obtida pela compilação e tratamento de dados de 34 filtros biológicos tratando esgotos domésticos de instalações militares, que, em geral, são mais concentrados do que aqueles de áreas urbanas. As características de clima e tipo de material de enchimento eram bem similares para as 34 estações estudadas.

Outra equação empírica é a de Rankin, aplicável para as condições de padrões dos Grandes Lagos e Alto Mississipi nos EUA, e que é:

$$E (\%) = \left(\frac{\frac{Or}{O} + 1}{\frac{Or}{O} + 1}\right) 100$$
 (2)

b) Fórmulas com Fundamentos Teóricos:

Muitos modelos têm sido propostos para descrever a cinética dos filtros biológicos, porém, ainda nenhum modelo totalmente satisfatório foi desenvolvido. A DBO de um líquido que se escoa através de um sistema de filtro biológico é reduzida através da oxidação biológica, floculação e sedimentação antes de sua disposição final. A cinética de remoção de DBO, se assumida de primeira ordem, pode ser equacionada por:

$$\frac{dL}{dt} = -kL \tag{3}$$

onde:

L = DBO do despejo em um tempo t k = constante de proporcionalidade.

Embora o teste de DBO seja uma medida da matéria orgânica biodegradável do afluente e do efluente, ele não representa o que está ocorrendo no filtro biológico, em relação às variáveis físicas do sistema. As necessidades de oxigênio e a remoção da matéria orgânica pela floculação biológica apresentam relacionamento similar àquele da oxidação biológica.

Um dos primeiros trabalhos para mostrar teoricamente o que ocorre em um filtro biológico foi apresentado por Velz (15). Ele propôs que a quantidade de DBO removida por unidade de altura do filtro era proporcional à DBO remanascente

$$\frac{dL}{dt} = -kL \tag{4}$$

que, integrada, fornece:

- Fórmula de Velz

onde:

 $L_{\bullet} = \text{DBO}$  remanescente no efluente  $L_{\circ} = \text{DBO}$  do afluente

D = profundidade do filtro.

Howland, citado por Galler e Gotaas(5), propôs, posteriormente, que a taxa de remoção de DBO seria uma função do tempo de contato e que a forma da equação seria:

$$\begin{array}{cccc} L_e & -kt \\ \hline L_o & & \\ E & & \\ C_o & & \\ E & C & \\ C & & \\$$

onde n e k' são constantes e q a taxa de aplicação hidráulica superficial. A DBO remanescente pode ser obtida pela combinação das equações (6) e (7), chegando-se a:

$$\frac{L_r}{L_r} = \frac{-K(D/q^n)}{e}$$
 (8)

conhecida como fórmula de Schulze: onde K é uma constante de proporcionalidade.

O valor de n foi determinado como 0,667. Howland incluiu ainda o efeito da temperatura na taxa de reação K da equação de remoção de DBO, expresso por:

$$= 1,035 T-20$$

fator para correção de temperatura

T = temperatura em °C

A equação (8) passa a ser

$$\frac{L_r}{L} = e^{-K \theta (D/q^r)}$$
 (8-A)

Schulze (17) avaliou as constantes para esta forma da equação, chegando a

$$\frac{L_{r}}{-1} = 10 \qquad (9)$$

onde D é dado em pés e q em milhões de galões/acre/dia (MGAD). Esta equação (9) é para filtros de pedra com altura de 1,8 m.

Germain aplicou a equação (8) a filtros biológicos com enchimento plástico, como segue:

onde:

L<sub>o</sub> = DBO do efluente primário (mg/l)

L, = DBO do efluente final (mg/l)

q = taxa de aplicação hidráulica do efluente primário (GPM/pé²).

n = expoente característico do material de enchimento.

K = constante de tratabilidade.

Germain encontrou K = 0,088 para esgoto doméstico e n = 0,5 para o material plástico Surfpac com área superficial específica de 89 m²/m³. O valor de K varia em função de n, e esta variação pode ser vista na referência (4).

Eckenfelder (11) modificou a teoria incluindo a consideração de que a quantidade de filme ativo, C, cobrindo o material de enchimento do filtro decresce com a profundidade e pode ser equacionado na forma:

$$C \alpha_{\underline{J}} = \frac{1}{D^{\underline{m}}}$$
 (10)

Eckenfelder modificou sua equação para uma forma em que a remoção de DBO decresce com o aumento da profundidade do filtro e chegou a:

$$L_{\bullet} = \frac{L_{\circ}}{1 + K - \frac{D^{1-m}}{q^{n}}}$$
 (11)

onde m = 0.33; n = 0.50 e K = 2.85.

A obtenção das equações de (3) a (11) é baseada em hipóteses de não recirculação. O efeito da recirculação foi tomado inicialmente como

de diluição. As equações de Schulze (equação 9) e de Eckenfelder (11) podem também ser utilizadas para sistema com recirculação do efluente final, desde que se considere a vazão e DBO afluente os da mistura do efluente primário com o fluxo recirculado.

Galler e Gotaas (5), em 1964 estudaram o desempenho de uma série de filtros biológicos com enchimento de pedra, através de análise de regressão múltipla dos dados obtidos de 322 observações. A equação de Galler e Gotaas é:

$$L' = \frac{K (QL + Q_1L')^{1.19}}{(Q + Q_1)^{0.78} (1 + D)^{0.67} a^{0.25}} (12)$$

onde:

L'<sub>e</sub> - DBO efluente do filtro, não sedimentado (mg/l)

 $L_o = DBO$  afluente ao sistema — (mg/i)

Q. = vazão afluente ao sistema --(MGD)

Q. = vazão de recirculação (MGD)

D = profundidade do filtro (pés)

a = raio do filtro (pés)

T = temperatura do esgoto (°C).

Jank e Drynan (18) externaram preocupação em entender melhor o mecanismo de remoção de substrato. Segundo os autores, o uso de filtros de alta taxa com enchimento plástico, para tratamento de despejos concentrados, seria limitado pela ausência de um critério racional de projeto. Por sua vez, o desenvolvimento deste critério dependeria de uma maior compreensão do mecanismo de remoção de substrato. Para tanto, desenvolveram modelo a partir da consideração de um volume unitário de filme biológico e líquido. Foram considerados a transferência de oxigênio e substrato no filme biológico e no filme líquido. A existência da zona aeróbia no filme seria de fundamental importância, uma vez que aí ocorreria a maior parte da reação biológica. A profundidade de penetração de oxigênio no filme biológico seria função do coeficiente de difusão do oxigênio no filme, da taxa de utilização do oxigênio, e da concentração de oxigênio na interface sólido-líquido. Para uma vazão específica, seria estabelecido um gradiente de oxigênio no filme biológico. que seria diretamente relacionado à transferência de massa de oxigênio através da interface sólido-líquido. A transferência de massa de substrato no filme líquido ocorreria por difusão molecular. Um gradiente de concentracão de substrato seria estabelecido no filme líquido, sendo dependente da vazão do esgoto, da concentração do substrato afluente, do coeficiente da difusão molecular do substrato e do fluxo de massa do substrato da interface lodo-líquido. Para definição da reação biológica, os autores utilizaram os conceitos de Monod. Consideraram, ainda, que o modelo descreveria as reações físicas e biológicas em um filtro biológico seria o de Kornegay e Andrews, que apresenta a seguinte equação para a remoção de substrato

$$(C_s - C_s) + K_s \ln \left(\frac{C_s}{C_s}\right) =$$

C<sub>o</sub> = Concentração substrato afluente na fase líquida.

C. = concentração substrato no efluente.

h = espessura da camada ativa do filme biológico.

X = concentração de microorganismos no filme biológico.

 $\mu$ max = taxa de crescimento específico máxima.

Y = coeficiente de síntese

Q = vazão

 $A_{\scriptscriptstyle p}=$  área superficial específica do meio suporte.

H = área de seção do filtro

D = altura do filtro

Considerava-se o reator em regime tubular ideal.

Os autores (18) apresentaram uma equação, para uma vazão específica, simplificando a equação de Kornegay e Andrews, de forma a representá-la graficamente com uma reta:

$$y = \frac{1}{b} \frac{u}{a + u} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{y} = \frac{1}{b} \quad \frac{1}{b} \quad$$

1 — a + b

y = concentração ou massa do substrato removido por unidade de altura do filtro.

 u = concentração ou massa de substrato no filme líquido. de substrato que pode ser removido por unidade de altura do filtro.

a

— = concentração ou massa de subsb

trato quando se tem y =

(1/b)/2.

Procedimentos para a determinação dos parâmetros para as equações de Kornegay e Andrews e de Jank e Dryman são apresentados na Referência (18).

Os clarificadores finais são dimensionados de acordo com Metcalf e Eddy(3) para uma taxa de aplicação hidráulica superficial de 8 a 16 m³/m²/dia para a vazão média e 24 e 32 m³/m²/dia para a vazão de pico. Com base na carga de sólidos aplicada ao decantador, o dimensionamento é feito com 1 kg a 5 kg SS/m²/h em média e para a situação de pico com um valor máximo de 7 kg SS/m²/h.

# 12. PRODUÇÃO DE LODO EM SISTEMAS DE FILTROS BIOLÓGICOS

Eckenfelder(11) verificou a quantidade de filme biológico ativo existente em filtros biológicos experimentais, com meios filtrantes constituídos por asbestos e "Polygrid". Admitiu que o crescimento biológico seria uniforme e estaria correlacionado com a área superficial do material de enchimento. Se o filme ativo for definido como a porção que está em contato com o despejo, a definição anterior precisará ser modificada se ocorer alagamento e curto-circuito. Para taxas de aplicacão de 30,5 e 61 l/min x m², correspondendo à taxa de aplicação orgânica até 11.950 g DBO/dia x m³, foi obtida uma acumulação média de filme de 1965 g/m³ a 25°C. Para taxa hidráulica de 112 [/min x m², foram coletadas amostras diárias do filme em dois pontos diferentes do filtro; o lodo analisado possuía 6% sólidos (base seca), e a média de acumulação foi de 7.860 g/m3. Em geral, o tratamento se deteriorava quando a quantidade de filme atingia valores acima de 8.930 g/m3 a 12.500 g/m<sup>3</sup>.

Malina (7) propôs que o lodo produzido em um filtro biológico é função da taxa de conversão do substrato em material celular, da taxa de respiração endógena e da acumulação de sólidos não biológicos no filme. A produção de lodo em filtros é muito similar à que ocorre no processo de lodos ativados. A determinação do excesso de lodo pode ser obtida através de um

balanço de massa, conforme equação abaixo:

$$QX_{r} = Y Q(S_{r} - S^{*}_{r}) - K_{r}$$

$$X_{r}V + Q X_{r}$$
(15)

Q = vazão despejo (m<sup>3</sup>/dia)

V = volume filtro (m³)

 $X_{\bullet}$  = sólidos suspensos no efluente do filtro (g/m³)

X<sub>cn</sub> = sólidos suspensos não biodegradáveis no afluente (g/m³) X<sub>c</sub> = massa lodo biológico por uni-

dade de volume (g/m³)
Y = coeficiente de síntese celular

(k<sub>a</sub>/kg/dia) K<sub>a</sub> = coeficiente de respiração endógena (dia-l).

A massa de lodo no filtro pode ser relacionada à área superficial específica:

$$VX_v = f(VA_v) = constante$$
 (16)

A. = área superficial específica

Reunindo as equações (15) e (16), e rearranjando:

$$\frac{Q}{VA_{\bullet}} X_{\bullet} = \frac{Q}{VA_{\bullet}} \left[ y (S_{\bullet} - S_{\bullet}) + X_{\circ \circ} \right] - b$$

$$b = constante.$$
(17)

As constantes na equação podem ser avaliadas graficamente flotando a taxa de aplicação (DBO + SS) versus o excesso de lodo (ver figura 8) admitindo-se as seguintes hipóteses: a concentração de DBO solúvel no efluente é aproximadamente zero, e os sólidos suspensos não biodegradáveis no afluente são iguais aos sólidos suspensos totais entrando no sistema.

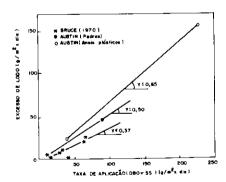


Figura 8 — Produção de Iodo em filtros biológicos em função da taxa de aplicação de DBO e SS (Ref. 7)

A curva para a estação de Austin (figura 8) é mais inclinada, o que poderia se dever à relação DBO/SS que é menor para o esgoto naquela cidade. A inclinação das retas tende a diminuir para taxas de aplicação maiores, sendo possivelmente resultado de taxas de biodegradação de sólidos que seriam menores para taxas de aplicação mais elevadas. Uma estimativa da

produção, ou excesso de lodo, para filtros de alta taxa, poderia ser obtida da equação abaixo (resultante dos dados da figura 8):

$$\frac{Q}{VA} = \frac{Q}{VA}$$
 (18)

excesso lodo em g sólidos/m² de meio filtrante/dia.

A equação (18) pode ser escrita:

$$X - 0.5 (DBO + SS) - 2.44$$

A equação acima indica que 50% de (DBO + SS) são convertidos em sólidos suspensos que permanecem no efluente do filtro.

Malina (7) ainda ressalta que a quantidade de lodo produzido em filtro biológico de baixa taxa é bem menor que em um filtro de alta taxa, ou nos processos de lodos ativados. Este fato poderia ser explicado pela ação predadora dos protozoários. A atividade dos protozoários é reduzida consideravelmente para baixas temperaturas, o que estaria associado à acumulação de lodo que ocorre nos filtros biológicos durante o inverno.

Oleszkiewicz (12) também equaciona a produção de lodo de um filtro biológico de maneira similiar àquela utilizada no processo de lodos ativados, ressaltando que a produção irregular tende a distorcer a avaliação diária. A equação apresentada é a seguinte:

$$\Delta X = YQ (S_o - S_e) - K_d XV \qquad (20)$$

ou

$$\frac{\Delta X}{XV} = \frac{YQ (S_{\circ} - S_{\bullet})}{XV} - K_{d}$$

ΔX = excesso lodo produzido (kg/dia)

 $Q(S_o - S_e) = substrato removido$ 

(kg/dia)

Y = coeficiente de síntese celular

 $K_d$  = coeficiente respiração endógena (dia-1).

XV = quantidade total de lodo no sistema (kg).

Graficamente, a equação estaria representada na figura 9. O autor utilizou dados de bibliografia (seis filtros com recheios diversos), para desenhar a curva da figura 9, que é representada pela equação:

$$\Delta X = 0.59 \text{ O } (S_o - S_e) - 0.016 \text{ XV } (21)$$

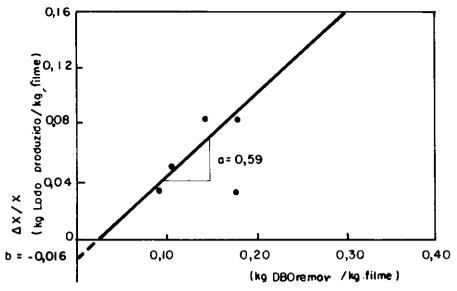


Figura 9 - Produção de lodo em filtros biológicos (Ref. 12)

Bruce e Merkens (19) mediram a produção de lodo para seis filtros biológicos, em escala-piloto, tratando esgotos domésticos, por um período de dois anos e meio e obtiveram valores variando entre 0,5 e 1 kg de lodo produzido por kg de DBO removida. O valor médio foi de 0,78 kg lodo/kg DBO removida.

Tratando despejos de uma indústria de carnes, em filtros biológicos-piloto, operando com alta taxa Moodie e Kavanagh (20) observaram uma taxa de produção de lodo de 0,31 a 0,42 kg de lodo/kg DQO removida, com valor médio de 0,35 kg de lodo/kg DQO removido ou 0,7 kg de lodo/kg DBO removido, sendo os resultados praticamente independentes da taxa de aplicação hidráulica superficial, que variou de 19 a 86 m³/m²/dia.

Esses mesmos autores (20) apresentaram os resultados obtidos por Dryman e Bisset, também para filtros biológicos de alta taxa tratando despejos de indústria de carne, onde a produção de lodo foi em média de 0,40 kg/kg DQO removida, que também observou ser a produção de lodo independente da taxa de aplicação hidráulica.

Hoyland e Harwood (21) observaram que, para esgotos domésticos decantados, contendo sólidos em suspensão entre 150 e 200 mg/l, dos quais cerca de 20% inertes, a taxa de produção de lodo (Y) pode ser expressa em função da DBO do efluente clarificado, através da equação:

$$Y = \frac{0.81 \text{ S.}}{48 + \text{ S.}}$$
 (22)

onde:

Y = kg de lodo/kg de DBO removida

 $S_* = DBO$  do efluente clarificado em mg/l.

#### 13. DESEMPENHO DE FILTROS BIOLÓGICOS

Serão aqui apresentados dados de desempenho de filtros biológicos, de maneira genérica, para esgotos domésticos e alguns industriais, sendo dado maior ênfase aos filtros biológicos de alta taxa, que é o objetivo principal deste trabalho.

A tabela 5 apresenta resultados de operação de filtros biológicos com enchimento plástico, enquanto a tabela 6 apresenta os resultados relativos a um filtro convencional.

As figuras de número 10 a 13 mostraram a eficiência de filtros biológicos na remoção de DBO, em função da Taxa de Aplicação da Carga Orgânica, para quatro tipos de enchimento plástico diferentes, tratando esgotos domésticos.

#### 14. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS, INSTALAÇÕES E SUBSTRATO UTILIZADOS E MÉTODOS ANALÍTICOS

As pesquisas sobre a utilização de filtros biológicos de alta taxa, com enchimento não convencional, para o tratamento de esgotos domésticos, foram desenvolvidas pela operação, em paralelo, de dois sistemas em escalapiloto, construídos e instalados pela Sabesp em sua ETE-Pinheiros. Um dos filtros biológicos tinha como material de enchimento o agregado leve de lodo de esgoto, produzido pela Sabesp e o outro operou com enchimento de peças plásticas de polipropileno, do tipo "anel de Rasching", cedidos pela Açoplast.

O material de enchimento plástico tem as características do "Actifil" fabricado pela Norton. Os anéis utilizados são de 38 mm, com peso específico de 80 kg/m³, área superficial específica de 130 m²/m³ e a porcentagem de vazios é de 91%.

O agregado leve de lodo de esgotos utilizado apresenta tamanho mé-

Tabela 5 - Resultados da operação de filtros biológicos com enchimento plástico

Tipo Despejo	Neterial do Filtro	Taxe de Apticação Midrâulica	Profund i dade	Taxa da Ca	r <sub>t</sub> a Orgânica
		n <sup>3</sup> /n <sup>2</sup> = 414	•	Aplicada kg DBO/m <sup>3</sup> x dia	Removida kg DSO/o <sup>3</sup> z dia
Danistico	SURFPAC	48 - 176	3,3	4,86 - 8,78	2,46 - 3,57
		59 - 235	6,5	8,64 - 2,80	0,46 - 1,52
•		29 - 116	6.5	0,66 - 2,72	0,61 - 2,26
lan. + anlatezento de alimento		59 + 118	4.3	1,04 - 3,20	0,82 - 1,63
•		174 - 259	1,5	4,02 - 6,19	1,97 - 2,85
Bon, * Trigorifice	SURTPAC	29 - 59	6,5	1,57 - 3,57	1,15 - 2,00
	•	29 - 59	6,5	1,54 - 3,49	0,85 - 1,43
* + Industrial	•	116 - 147	6.3	1,94 ~ 6,21	1,28 - 2,24
• •	•	59 - 118	6.5	1,76 - 4,13	1,41 - 3,10
• • •	-	47 - 116	4,5	1,09 - 3,44	0,66 - 1,92
Dom,+ Cereal	SUBTPAC	19 - 200	12,6	0,34 - 3,84	0,29 - 1,23
Dom. + Friger[fice	•	12 - 60	7.6	1,50 - 20,22	0,96 - 13,95
Processamento Açücar	-	39 - 147	6.5	2,32 - 10,44	1,07 - 3,84
Trigorifico	-	0 - 378	6,5	2,48 - 83,20	1,52 - 34,68
Enlatamento Alimento	•	1,2 - 33	6,5	0,74 - 10,51	0,59 - 4,30
Enlocapento Frutos	SURFPAC	4 - 59	6,5	5,06 - 24,16	4,37 - 10,88
Prigorifico	-	25 - 353	6,5	0,43 - 3,22	0,26 - 1,31
Farmacêutica	-	59 - 118	6.5	2,50 - 8,19	1,79 - 3,78
Celulose ERAFT	•	4 - 31	6.5	0,16 - 4,48	0,14 - 2,69
Prigarifica		38 - 176	6,3	31,17 - 40,48	15,90 - 25.66
Denéstic <del>e</del>	SURFFAC	B - 28	2,1	6,31 - 3,71	0,30 - 1,60
Papel	•	19 - 137	6.3	0,27 - 7,97	0,14 - 3,14
Devistice .	•	15 - 176	3,3 - 4,5	0,12 - 11,52	0,10 - 3,36
Dougstice	•	59 - 176	6.5	0,41 - 2,27	0,29 - 0,76
Quimice	*	235 - 323	12,0	1,36 - 7,82	1,07 - 3,104
Deséstice	SURFFAC	88 - 176	3,3	4,66 - 4,78	2,46 - 3,97
Têstil	•	59 - 235	6,5	1,66 - 2,75	0,78 - 2,24
Danéstico	Cloissayle	13 - 120	2,0 - 4,0	1,02 - 41,09	0,82 - 18,50
Yirios	fiecer	11 - 136	1,8 - 5,5	0,11 - 4,14	0,04 - 2,38
Dep Laticinios	Tels: de Acame	5 - 8	1,8	6,37 - 5,90	0.27 - 3.89

4 Base - DEO - de 10 Gias

dio de 38 mm (variando de 25 mm a 50 mm). Após empilhado no filtro e "molhado", a amostra apresentou densidade global de 680 kg/m³. O volume de vazios determinado foi de

Um esquema dos sistemas-piloto de filtro biológico utilizados na pesquisa é apresentado na figura 13-A, onde são mostradas as suas principais dimensões. Os filtros possuíam tomadas de amostra, espaçadas de 0,5 m, a partir de 1,3 m abaixo do topo do enchimento.

A operação se deu com esgoto sedimentado da ETE-Pinheiros da Sabesp, bombeado diretamente do canal do efluente da ETE para uma caixa de distribuição de vazões de vertedouro para descarte do excesso de vazão do recalque e de bocais com abertura que se podia variar, para a distribuição da vazão desejada para os filtros. Os dois sistemas sempre operaram com vazões iguais.

Cada condição operacional era definida pela taxa de aplicação hidráulica superficial (q<sub>A</sub>), cujos valores foram, de acordo com a ordem cronológica, de 56,1; 37,4; 28,1; 62,9; 41,9; 93,5 e 52,4 m³/m²/dia. Durante a operação com q<sub>A</sub> — 56,1 m³/m²/

Tabela 6 — Comportamento da DBO e da série nitrogenada ao longo de um filtro biológico experimental (Newcastle upon Tyne — Inglaterra) — filtro convencional. Resultados de verão e inverno

Profundidade	DB mg		N Orgânic	N Orgânico mg/£		scal mg/L	N Nitrito		N Nitrat	0
Superficie	360	360	19	25	57	53	0,03	0,03	0,28	0,7
0,31 m	195	235	15	17	48	49	0,17	0,19	0,42	0,89
0,61 m	110	130	12	14	40	41	0,58	0,45	0,78	1,1
0,92 m	60	77	10	11	33	36	1,1	0,96	1,4	1,8
1,12 m	48	56	8	10	28	29	1,3	1,2	4,8	4,3
1,43 m	40	49	6,1	8,6	18	2.5	1,2	1,2	14	8,3
Efluenta	35	41	5,2	8	8	20	0,9	1,1	18	9,9

Tabela 7 — Vaiores médios\* de operação dos filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto e com anéis de plástico, relativos a DBO e DQO Profundidade = 1,8 m

4 <sup>A</sup>	DBO	DBO DO EFLUENTE SEDIMENTADO (mg/%)		kg DBO REMOVIDO m <sup>3</sup> x dia		remoção de dbo		DQO	DQO DO EFLUENTE SEDIMENTADO (mg/L)		kg DQO REHOVIDO m <sup>3</sup> x dia		REMOÇÃO DE DQO (%)	
m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia)	ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/L)	FILTRO ACREGADO	PILTRO PLASTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO		ALIMENTA ÇÃO (mg/1)	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO		FILTRO PLÁSTIC
28,1	100 <sup>±</sup> 59 (21a307)	18 <sup>±</sup> 10 (5 <b>a</b> 52)	29 <sup>±</sup> 13 (7a54)	1,28	1,11	82	71	265 <sup>±</sup> 177 (91a874)	93 <sup>±</sup> 34 (28a154)	101 <sup>±</sup> 39 (31a179)	2,69	2,56	64,9	61,9
37,4														
41,9	97 <sup>±</sup> 31 (45a149)	20 <sup>±</sup> 9 (6a40)	17 <sup>±</sup> 14 (3a53)	1,79	1,86	79,4	82,5	255 <sup>±</sup> 62 (114a343)	81 <sup>±</sup> 62 (55a131)	75 <sup>+</sup> 28 (37al49)	4,05	4,19	68,2	10,6
52,4	96 <sup>±</sup> 27 (12a148)	11 <sup>±</sup> 7 (3a30)	24 <sup>±</sup> 16 (5a58)	2,47	2,10	88,5	75	208 <sup>±</sup> 43 (96a269)	61 <sup>+</sup> 19 (24a117)	94 <sup>±</sup> 39 (49a178)	4,28	3,32	70,7	54,8
62,9	102 <sup>±</sup> 15 (51a144)	23 <sup>±</sup> 11 (6a46)	21-11 (5a46)	2,76	2,83	77,5	79,4	245 <sup>±</sup> 102 (134a313)	80 <sup>±</sup> 34 (31a164)	78 <sup>±</sup> 29 (31a156)	5,77	5,84	67,4	68,2
93,5	86 <sup>±</sup> 45 (23a255)	43 <sup>+</sup> 28 (5a129)	39 <sup>+</sup> 19 (8a100)	2,23	2,44	50	54,7	201 <sup>±</sup> 48 (81a516)	115 <sup>+</sup> 48 (34a203)	122 <sup>+</sup> 38 (46a202)	4,47	4,10	42,8	39,3

<sup>\*</sup> EXCLUÍDO O PERÍODO INICIAL EM QUE HOUVE ARRASTE DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE AGREGADO LEVE DE LODO DE ESCOTO.

Tabela 8 — Valores médios\* de operação dos filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto e com anéis de plástico, relativos a DBO e DGO Profundidade = 2,8 m

A	DBO	DBO DO EF SEDIMENTA	DO .	kg DBO R		remoção de dbo		рдо	DQO DO EFLUENTE SEDIMENTADO (mg/l)		kg DQO	REMOVIDO	REMOÇÃO DE DOO (Z)	
	ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/l)	(mg/L FILTRO AGREGADO	) FILTRO PLÄSTICO	FILTRO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO		ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/l)	FILTRO		FILTRO	FILTRO	FILTRO	FILTRO
28,1	100 <sup>±</sup> 59 (21a307)	21 <sup>+</sup> 8 (8a34)	21 <sup>+</sup> 9 (7a46)	0,79	0,79	79	79	265 <sup>+</sup> 177 (91a874)	102 <sup>±</sup> 50 (25a171)	103 <sup>±</sup> 48 (36a281)	1,64	1,63	61,5	61,1
37,4														
41,9	97 <sup>+</sup> 31 (45a149)	23-10 (10a33)	15 <sup>+</sup> 8 (5a34)	1,11	1,23	76,3	84,5	255 <sup>±</sup> 62 (114a343)	69 <sup>±</sup> 17 (54±96)	74 <sup>±</sup> 20 (45a120)	2,78	2,71	72,9	71,0
52,4	96 <sup>+</sup> 27 (12a148)	13-8 (6a41)	15 <sup>+</sup> 6 (5a29)	1,56	1,52	86,5	84,3	208 <sup>+</sup> 43 (96a269)	65 <sup>+</sup> 26 (32a135)	74 <sup>±</sup> 27 (28a169)	2,68	2,51	68,8	64,4
62,9	102 <sup>±</sup> 15 (51a144)	22 <sup>±</sup> 9 (9a37)	18 <sup>+</sup> 6 (6a32)	1,80	1,89	78,4	82,4	245 <sup>±</sup> 102 (134a313)	90 <sup>±</sup> 22 (42a118)	80 <sup>±</sup> 22 (38al16)	3,48	3,71	63,3	67,4
93,5	86 <sup>±</sup> 45 (23a255)	51 <sup>±</sup> 30 (9a113)	28 <sup>±</sup> 13 (7a56)	1,17	1,94	40,7	67,4	201 <sup>±</sup> 77 (81a516)	131 <sup>±</sup> 58 (35a226)	106 <sup>+</sup> 44 (24a232)	2,34	3,17	34,8	47,3

<sup>\*</sup> EXCLUÍDO O PERÍODO INICIAL EM QUE HOUVE ARRASTE DE PEQUENAS PARTOÍCULAS DE AGREGADO LEVE DE LODO DE ESCOTO,

Tabela 9 — Valores médios\* de operação dos filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto e com anéis de plástico, relativos a DBO e DQO Profundidade = 3.8 m

q <sub>A</sub>	DBO	DBO DO EF SEDIMENTA (mg/l	00	kg DBO REMOVIDO m <sup>3</sup> x dia		remoção de dbo		DQO	DQO DO EFLUENTE SEDIMENTADO (mg/l)		kg DQO REMOVIDO		REMOÇÃO DE DQO (%)	
	ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/l)	FILTRO ACREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO		ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/%)	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO		FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTIC
28,1	100 <sup>±</sup> 59 (21a307)	16 <sup>+</sup> 9 (6a38)	18 <sup>±</sup> 7 (5a33)	0,62	0,61	84	82	265 <sup>±</sup> 177 (87a874)	75 <sup>±</sup> 31 (27a143)	76 <sup>+</sup> 31 (17a146)	1,41	1,40	71,7	71,3
37,4														
41,9	97 <sup>±</sup> 31 (45a149)	21 <sup>±</sup> 11 (10a54)	18 <sup>+</sup> 14 (7a59)	0,84	0,87	78,4	81,4	255 <sup>±</sup> 62 (114a343)	82 <sup>±</sup> 19 (57a129)	80 <sup>+</sup> 42 (48a201)	1,91	1,93	67,8	68,6
52,4	96 <sup>±</sup> 27 (12a148)	13 <sup>+</sup> 10 (5a28)	18 <sup>+</sup> 10 (4a43)	1,14	1,08	86,5	81,3	208 <sup>+</sup> 43 (96a269)	66 <sup>+</sup> 23 (32all5)	85 <sup>±</sup> 38 (39a220)	1,96	1,70	68,3	59,1
62,9	102 <sup>±</sup> 15 (51a144)	18 <sup>+</sup> 9 (4a41)	15 <sup>+</sup> 8 (6a38)	1,39	1,44	82,4	85,3	245 <sup>±</sup> 102 (134a313)	69 <sup>±</sup> 24 (23a103)	66 <sup>±</sup> 25 (24a133)	2,91	2,96	71,8	73,1
93,5	86 <sup>+</sup> 45 (23a255)	44 <sup>+</sup> 26 (14a106)	39 <sup>±</sup> 26 (8a137)	1,03	1,16	48,8	54,7	201 <sup>+</sup> 77 (81a516)	121 <sup>+</sup> 45 (48a211)	110 <sup>+</sup> 49 (34a232)	1,97	2,24	39,8	45,3

<sup>\*</sup> EXCLUÍDO O PERÍODO INICIAL EM QUE HOUVE ARRASTE DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE AGREGADO LEVE DE LODO DE ESCOTO .

dia (condição inicial) houve carreamento do material do leito de agregado leve de lodo de esgotos e a operação dos filtros era muito irregular devido a problemas operacionais e também por não estar o sistema em "regime operacional". Os resultados deste primeiro período não foram considerados. Para os demais valores de q o período de operação de cada condição foi sempre superior a três meses.

As coletas de amostras foram, em geral, duas vezes por semana, no periodo entre 8h30 e 16h30, de hora em

hora, para a composição de amostras compostas.

As amostras sedimentadas dos pontos intermediários dos filtros biológicos eram conseguidas através de sedimentação em bequer de 2 l por um período de um hora.

Foram medidos os seguintes parâmetros; no efluente, nas amostras tiradas a profundidades de 1,8, 2,8, 3,8 e 4,8 m e efluente do decantador final (5,3 m de altura do filtro):

- DBO global e filtrada
- DOO global e filtrado
- Sólidos em suspensão (bruto e decantado)

- Sólidos em suspensão voláteis (bruto e decantado)
- Temperatura
- pH.

Para o efluente bruto do filtro (h = 5,3 m), foram medidos os sólidos em suspensão e sólidos em suspensão voláteis.

As determinações analíticas foram sempre de acordo com as respectivas normas da Cetesb. Para a determinação de DBO e DQO filtradas e SS e SSV, as amostras foram filtradas em papel de filtro GFC ou similar.

Tabela 10 — Valores médios\* de operação dos filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto e com anéis de plástico, relativos a DBO e DQO Profundidade := 4,8 m

A <sup>P</sup>	DBO	DBO DO EFI SEDIMENTA (mg/L)	DO DO	kg DBO R		REMOÇÃO	DE DBO	DQO	DQO DO E SEDIMENT. (mg/	ADO	kg DQO REMOVIDO		RЕМОÇÃО DE DQO (%)	
	ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/l)	FILTRO AGRECADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO	FILTRO	FILTRO AGREGADO		ALIMENT <u>A</u> ÇÃO (mg/l)		FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO
28,1	100 <sup>±</sup> 59 (21a307)	14 <sup>+</sup> 6 (6a30)	19 <sup>±</sup> 10 (5a52)	0,50	0,47	86,0	81,0	265 <sup>±</sup> 177 (91a874)	68 <sup>±</sup> 36 (21a160)	74 <sup>±</sup> 32 (23a164)	1,15	1,12	74,3	72,1
37,4														
41,9	97 <sup>±</sup> 31 (45a149)	16 <sup>+</sup> 10 (5a47)	14 <sup>±</sup> 10 (5a43)	0,71	0,72	83,5	85,6	255 <sup>±</sup> 62 (114a343)	76 <sup>±</sup> 17 (56a111)	72 <sup>±</sup> 20 (45a130)	1,56	1,60	70,2	71,8
52,4	96 <sup>+</sup> 27 (12a148)	12 <sup>+</sup> 6 (3a23)	14 <sup>+</sup> 7 (5a36)	0,92	0,90	87,5	85,4	208 <sup>±</sup> 43 (96a269)	66 <sup>+</sup> 19 (28a124)	67 <sup>±</sup> 18 (28all1)	1,55	1,54	68,3	67,8
62,9	102 <sup>+</sup> 15 (51 a1 44)	18 <sup>+</sup> 9 (8a40)	19 <sup>+</sup> 12 (9a58)	1,10	1,09	82,4	81,4	245 <sup>±</sup> 102 (134a313	70 <sup>±</sup> 23 (36a125)	73 <sup>±</sup> 22 (34al15)	2,29	2,25	71,4	70,2
93,5	86 <sup>+</sup> 45 (23a255)	45 <sup>±</sup> 25 (11al18)	27-13 (10a64)	0,8	1,15	47,7	68,6	201 <sup>±</sup> 77 (81a516)	117 <sup>±</sup> 37 (54a193)	101 <sup>±</sup> 51 (39a289)	1,64	1,95	41,8	49,8

<sup>\*</sup>EXCLUÍDO O PERÍODO INICIAL EM QUE HOUVE ARRASTE DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE AGREGADO LEVE DE LODO DE ESGOTO.

Tabela 11 — Valores médios\* de operação dos filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto e com anéis de plástico, relativos a DBO e DQO Profundidade = 5.3 m

q <sub>A</sub>	DBO	DBO DO EF SEDIMENTA (mg/L	.DO	kg DBO REMOVIDO m <sup>3</sup> x dia		REMOÇÃO DE DBO		DQO	DQO DO EFLUENTE SEDIMENTADO (mg/l)		kg DQO REMOVIDO m <sup>3</sup> x dia		REMOÇÃO DE DQO (Z)	
	ALIMENTA ÇÃO (mg/l)	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	filtro plästico	ALIMENTA ÇÃO (mg/l)	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLÁSTICO	FILTRO AGREGADO	FILTRO PLASTIC
28,1	100 <sup>±</sup> 59 (21a307)	13 <sup>+</sup> 7 (4a33)	17 <sup>±</sup> 6 (6a35)	0,46	0,44	87,0	83,0	265 <sup>+</sup> 177 (91a874)	59 <sup>+</sup> 21 (24a100)	74 <sup>±</sup> 27 (14a116)	1,09	1,01	77,7	72,1
37,4	122 <sup>+</sup> 42 (56a150)	26 <sup>+</sup> 5 (17a35)	24 <sup>+</sup> 10 (10a50)	0,68	0,69	78,7	80,3	368 <sup>±</sup> 20 (296a560)	112 <sup>±</sup> 20 (88a147)	105 <sup>±</sup> 26 (65a166)	1,81	1,86	69,6	71,5
41,9	97 <sup>±</sup> 31 (45a149)	16 <sup>±</sup> 6 (7a24)	16 <sup>±</sup> 5 (7a24)	0,64	0,64	83,5	83,5	255 <sup>±</sup> 62 (144a343)	67 <sup>±</sup> 14 (44a96)	73 <sup>±</sup> 21 (49a136)	1,48	1,44	73,7	71,4
52,4	96 <sup>±</sup> 27 (12a148)	14 <sup>+</sup> 6 (6a27)	16 <sup>+</sup> 6 (7a26)	0,81	0,79	85,4	83,3	208 <sup>±</sup> 43 (96a269)	71 <sup>±</sup> 16 (39a106)	71 <sup>±</sup> 17 (39a115)	1,36	1,36	65,9	65,9
62,9	102 <sup>+</sup> 15 (55a144)	20 <sup>+</sup> 8 (8a38)	20 <sup>±</sup> 5 (13a22)	0,97	0,97	80,4	80,4	245 <sup>±</sup> 102 (134a313)	70 <sup>±</sup> 13 (42a85)	73 <sup>+</sup> 20 (43a117)	2,08	2,04	71,4	70,2
93,5	86 <sup>+</sup> 45 (23a255)	22 <sup>+</sup> 12 (7a49)	20 <sup>+</sup> 13 (6a60)	1,13	1,16	74,4	76,7	201 <sup>±</sup> 77 (81a516)	79 <sup>+</sup> 29 (23a164)	78 <sup>±</sup> 30 (19a164)	2,15	2,17	60,7	61,2

\*EXCLUÍDO O PERÍODO INICIAL EM QUE HOUVE ARRASTE DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE ACREGADO LEVE DE LODO DE ESCOTO.

# 15. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As tabelas de 7 a 11 apresentam os valores médios de operação, relativos a DBO e DQO, dos filtros biológicos-piloto, com enchimento de agregado leve de lodo de esgotos e com anéis de plástico, respectivamente para as profundidades de 1,8 m; 2,8 m; 3,8 m; 4,8 m e 5,3 m.

Os valores médios apresentados nas tabelas 7 a 11 referem-se ao período de operação em que o filtro com enchimento de agregado leve de lodo de esgoto já estava em operação definitiva, com o material de enchimento já estável. No início da operação, partículas pequenas de agregado leve de lodo de esgoto saíam com o efluente do filtro, demonstrando que este material sofreu, de início, um desgaste por abrasão.

Os resultados completos da operação dos filtros biológicos-piloto são apresentados na Referência 24 que incluem também dados do afluente e relativos a sólidos em suspensão e sólidos em suspensão voláteis, de cada dia de amostragem. As figuras 14 e 15 apresentam a variação da DBO do efluente sedimentado dos dois filtros biológicos-piloto, em função da profundidade do filtro e da taxa específica de aplicação hidráulica superficial (q<sub>A</sub>).

A figura 16 apresenta o relacionamento entre a taxa específica de remoção de DBO (C., DBO) ) e a taxa específica de aplicação de DBO (C., DBO), para as condições pesquisadas.

A figura 17 apresenta o mesmo tipo de relacionamento da figura 16, porém em relação à DOO.

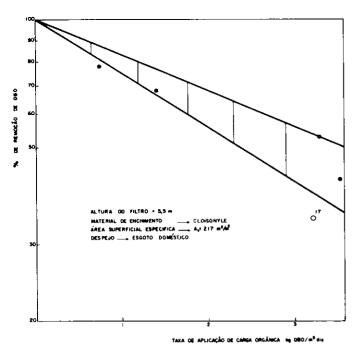


Figura 10 — Eficiência de remoção de DBO em função da taxa de apiloação de carga orgânica

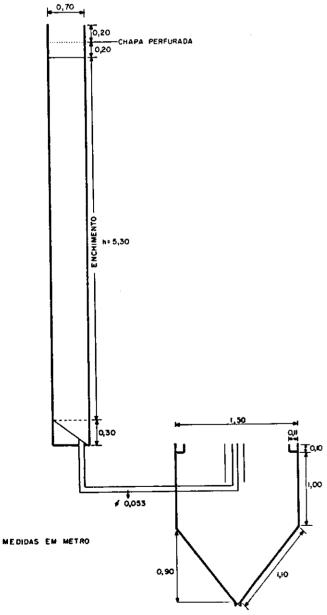


Figura 13-A — Esquema geral dos sistemas-piloto de filtros biológicos em operação pela Cetesb

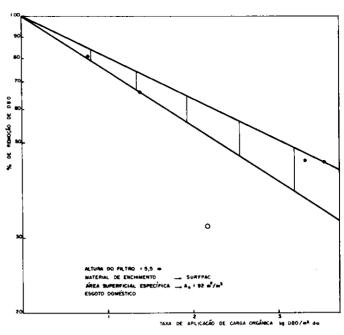


Figura 11 — Eficiência de remoção de DBO em função da taxa de aplicação da carga orgânica

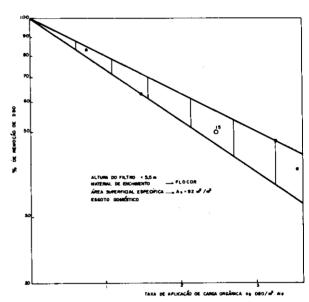


Figura 12 — Eficiência de remoção de DBO em função da taxa de aplicação da carga orgânica

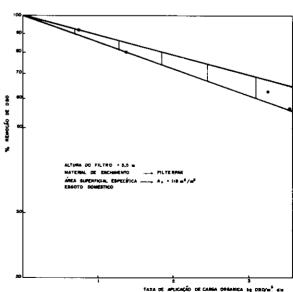


Figura 13 — Eficiência de remoção de DBO em função da taxa de aplicação da carga orgânica

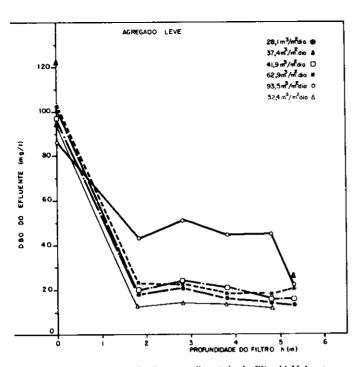


Figura 14 — Variação da DBO efluente sedimentado do filtro biológico com enchimento de agregado leve, em função da profundidade e da taxa específica de aplicação hidráulica superficial

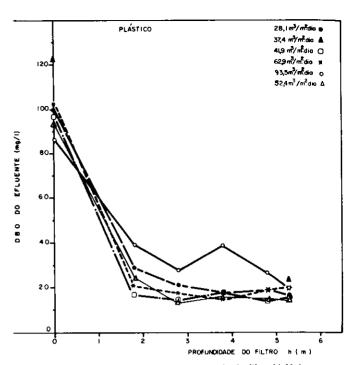


Figura 15 — Variação da DBO efluente sedimentado do filtro biológico con enchimento de anéis plásticos, em função da profundidade e da taxa específica de aplicação hidráulica superficial

Para o traçado das curvas e obtenção das equações apresentadas nas figuras 16 e 17, foram descartados os dados relativos à operação com  $q_A = 93.5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ , quando o comportamento dos filtros biológicospiloto se apresentou muito instável, sendo o do filtro de agregado leve ainda mais instável. Para q<sub>A</sub> = 03.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia os valores da DBO 93,5 m3/m2/dia, os valores da afluente foram, de modo geral, baixos e por várias vezes o efluente se apresentou com valor de DBO mais alto que o do afluente. As curvas e equações apresentadas nas figuras 16 e 17 são, portanto, relativas a valores entre 28,1 e 62,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> / de q<sub>A</sub> dia, quando o comportamento dos filtros-piloto foi mais estável.

O modelo matemático que descreveu bem o relacionamento entre a taxa específica de remoção e a taxa específica de aplicação, tanto de DBO como de DQO é a seguinte:

$$C_{r} = A \frac{C_{v}}{B + C_{v}}$$

onde:

C, = taxa específica de remoção de matéria orgânica

C. = taxa específica de aplicação de matéria orgânica

A = taxa específica máxima de remoção de matéria orgânica

B = constante, que corresponde ao valor de C<sub>v</sub>, quando a taxa específica de remoção é A/2.

O estudo do comportamento dos filtros biológicos-piloto em função de sua profundidade foi possível, através da adequação do modelo enteriormente utilizado para relacionamento

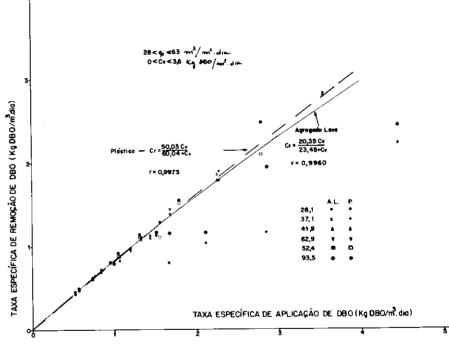


Figura 16 — Relação entre as taxas específicas de remoção e de aplicação de DOO para os filtrospiloto com agregado leve e com anéis de plástico

entre C. e C., fazendo-se:

$$C_{\cdot} = \frac{q_{A}}{h} \cdot (S_{\circ} - S_{\bullet})$$

$$C_{\scriptscriptstyle V} \, = \, \frac{\, q_{_{\textstyle A}}}{\, h} \, \, . \, \, S_{\scriptscriptstyle S}$$

Chegando-se a:

$$\frac{S_{\circ} - S_{\bullet}}{S_{\circ}} = \frac{A}{B + \frac{q_{A}}{S_{\circ}} \cdot S_{\circ}}$$

onde h = profundidade do filtro S<sub>o</sub> = DBO ou DOO do afluente ao sistema (kg/m³)  $S_{\bullet} = DBO$  ou DOO do efluente decantado (kg/m³)

C., C. e q<sub>A</sub> já definidos anteriormente.

As equações obtidas, descartandose os dados obtidos para q<sub>A</sub> = 93,5 m³/m²/dia, são apresentadas nas figuras 18 (para DBO) e 19 (para DQO) e serão discutidas posteriormente.

A figura 18 apresenta a eficiência obtida na remoção da DBO, em função da altura do filtro, de acordo com a equação obtida para a faixa de q entre 28,1 e 62,9 m³/m²/dia, bem

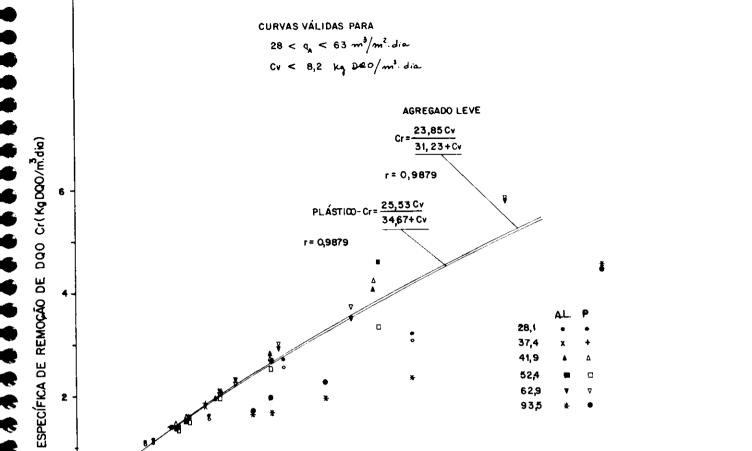


Figura 17 — Relação entre as taxas específicas de remoção e de aplicação de DQO para os filtrospiloto com agregado leve e com anéis de plástico

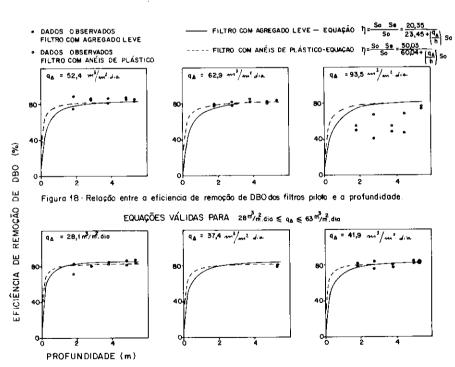
como os pontos em cada fase de operação dos sistemas-piloto. Apenas para se ter uma idéia do comportamento instável dos sistemas-piloto para q<sub>A</sub> = 93,5 m³/m² x dia, também os pontos obtidos nesta fase de operação são colocados em gráficos juntamente com as curvas obtidas para a faixa de q<sub>A</sub> entre 28,1 e 62,9 m³/m² x dia. A figura 19 apresenta o mesmo tipo de relacionamento da figura 18, com a única diferença de que ele se refere à DQO.

2

Ouanto ao pH, nos primeiros quatro meses de operação dos filtros-piloto, observou-se um pH do effuente do filtro com anéis de plástico superior ao do afluente e do efluente do filtro com agregado leve em cerca de 0,5 a 1,0. Depois disso, o pH dos efluentes dos dois filtros-piloto foi basicamente igual e levemente superior ao pH da alimentação, e era normalmente próximo a 7,0.

O oxigênio dissolvido na profundidade de 1,8 m foi sempre superior a 2,0 mg/l (normalmente superior a 3,0 mg/l) e a saída do filtro era normalmente da ordem de 4,0 mg/l ou maior. A variação de OD foi independente dos valores de q<sub>A</sub> utilizados.

Outra observação é a de que em nenhuma ocasião se verificou a nitrificação.

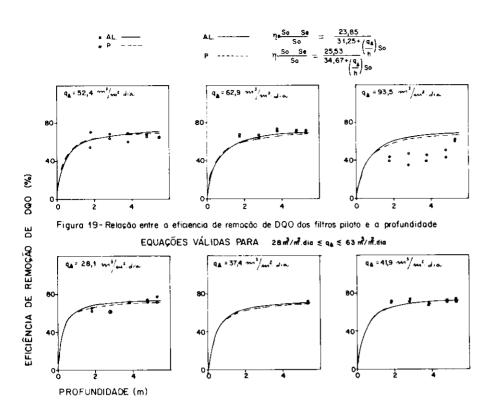


TAXA ESPECÍFICA DE REMOÇÃO DE DQO(Kg DQO/m² dia)

Os sólidos em suspensão nos efluentes decantados eram para qualquer caso, normalmente inferiores a 30 mg/l, embora por algumas vezes a sua concentração ultrapassasse em bastante este valor. A maior variação do SS e SSV no efluente decantado era observada nas profundidades

menores e especialmente para  $q_A=93.5~{\rm m}^3/{\rm m}^2$  x dia. Para os demais valores de  $q_A$  (entre 28,1 e 62,9  ${\rm m}^3/{\rm m}^2$  x dia) os SS e SSV eram mais estáveis, especialmente para as profundidades maiores, quando raramente os SS atingiam ou ultrapassavam os 30 mg/l.

10



Quanto aos SS e SSV dos efluentes dos filtros-piloto, eles foram sempre muito variáveis e não se conseguiu qualquer relacionamento entre esses parâmetros e a DBO removida, ou DBO afluente, ou SS e SSV do afluente. Assim sendo, não foi possível uma estimativa da produção de lodo nas condições pesquisadas.

Outro resultado importante, é que não houve desenvolvimento das moscas, comuns nos filtros biológicos convencionais e mesmo de alta taxa ( $q_A$  até 10  $m^3/m^2$  x dia). Apenas quando se operou com  $q_A$  = 28,1  $m^3/m^2$  x dia foi observada a presença de moscas, porém, em número muito reduzido.

#### 16. DISCUSSÃO

Conforme mencionado no item anterior, observou-se que o filtro com agregado leve de lodo de esgoto, durante um período inicial de operação, da ordem de três meses, apresentou um certo arraste de pequenas partículas do seu leito filtrante, devido ao efeito da abrasão causada pelo escoamento dos esgotos através do filtro biológico. Somente foram considerados, para fins de análise do comportamento dos filtros biológicos, os dados obtidos após o leito do filtro de agregado leve se apresentar estável.

Os esgotos da ETE-Pinheiros da Sabesp, utilizados neste trabalho, após sedimentação primária, podem ser considerados do tipo esgoto fraco, o que até certo ponto recomenda cuidado especial na extrapolação dos resultados obtidos.

Os filtros-piloto foram operados em seis etapas diferentes, que se caracterizavam pela taxa específica de aplicação hidráulica superficial  $(\mathbf{q}_{\mathbf{A}}^{})$ 

constante, e que foram de: 28,1; 37,4; 41,9; 52,4; 62,9 e 93,5 m³/m² x dia.

Dos resultados apresentados no item anterior e especialmente dos resultados gerais apresentados na Referência 24, observa-se que para a faixa de  $q_A$  de 28 a 63  $m^3/m^2$ . dia, os filtros biológicos apresentaram um desempenho que pode ser considerado, em princípio, como bom, enquanto para  $q_A=93.5\ m^3/m^2\ x$  dia, o comportamento dos filtros foi extremamente instável, especialmente para o filtro de agregado leve.

Para esta taxa específica de aplicação hidráulica superficial, é bem possível que a maior velocidade de escoamento dentro do filtro ocasionasse um maior arraste de biomassa, diminuindo a população biológica do filtro, que, aliada a um menor tempo de detenção dos esgotos no filtro, proporcionasse um rendimento baixo no tratamento, especialmente no filtro de agregado leve.

Baseado no exposto, deve-se limitar, por enquanto, a utilização de filtros biológicos com enchimento de agregado leve de lodo de esgotos a taxas específicas de aplicação hidráulica superficial: de 60 m³/m² x h.

Em relação ao filtro com enchimento plástico, para  ${\bf q_A}=93.5~{\rm m^3/m^2}$  x dia, o seu desempenho foi bem melhor do que o do filtro de agregado leve.

Para valores de q<sub>A</sub> entre 28 e 63 m³/m² x dia, pode-se dizer que os dois filtros-piloto apresentaram um rendimento bom, em termos de remoção de matéria orgânica (DBO e DQO). Para esta faixa de valores de q<sub>A</sub> , observou-se que o desempenho dos dois filtros-piloto foi praticamente idêntico para valores de taxa específica de aplicação de DBO infe-

riores a 1,8 kg DBO/m³ x dia (figura 16) e taxa específica de aplicação de DOO inferiores a 3 kg DOO/m³ x dia (figura 17). Acima desses valores citados, o filtro com enchimento de plástico passou a apresentar melhor eficiência de tratamento, distanciando-se cada vez mais dos resultados apresentados pelo filtro de agregado leve, conforme se aumentava a taxa específica de aplicação de carga orgânica.

Nota-se ainda que, para valores da taxa específica de aplicação acima de 1.8 kg DBO/m3 x dia (figura 16) e 3,0 kg DOO/m3 x dia (figura 17) a taxa específica de remoção de matéria orgânica cresce em proporção cada vez menor em relação à de aplicação, tendendo assintoticamente a um valor máximo, obedecendo a uma curva do tipo daquela obtida por Monod para remoção de substrato. Para valores das taxas específicas de aplicação de matéria orgânica inferiores aos valores acima referidos, tanto uma reta como a continuação da curva do tipo da de Monod se ajustam muito bem para relacionar a taxa específica de aplicação de matéria orgânica (C,).

Por atender toda a faixa de valores da taxa específica de aplicação de matéria orgânica, para os valores de q entre 28 e 63 m³/m² x dia, preferiuse utilizar uma equação do tipo daquela obtida por Monod para relacionar a taxa específica de remoção de substrato em função da concentração de substrato. A equação geral que já foi apresentada no item anterior é similar à equação obtida por Jank e Drynan pela simplificação da equação de Kornegay e Andrews, que é a equação (14) do item 11. As equações obtidas neste trabalho foram as que seguem:

Equações relativas a DBO, válidas para:

- 28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> x dia  $< q_A^{} < 63 m^3/m^3$  x dia, e
- $C_{\text{mDBO}}$ < 4.0 kg DBO/m<sup>8</sup> x dia

Para filtros com agregado leve

$$C_{\cdot, DBO} = 20,35 = \frac{C_{\cdot, DBO}}{23,45 + C_{\cdot, DBO}}$$

$$(r = 0.9960)$$

Para filtros com enchimento plástico

$$C_{\text{--}DBO} = 50.03 \frac{C_{\text{--}DBO}}{60.04 + C_{\text{--}DBO}}$$
 $(r = 0.9973)$ 

C., <sub>DBO</sub> em kg DBO removido/m³ x dia C., <sub>DBO</sub> em kg DBO aplicado/m³ x dia r é o coeficiente de correlação. Equações relativas a DQO, válidas para:

 $\bullet$  28  $m^3/m^2$  x dia < q  $_{\Delta}$  < 63  $m^3/m^2$  x dia

C. DOO < 8,2 kg DOO/m³ x dia</li>
 Para filtros de agregado leve

$$C_{\text{1DOO}} = 23.85 \frac{C_{\text{1DOO}}}{31.23 + C_{\text{1DOO}}}$$
 $(r = 0.9879)$ 

Para filtros com enchimento plástico

$$C_{"DOO} = 25.53 \frac{C_{"DOO}}{34.67 + C_{"DOO}}$$
  
(r = 0.9879)

onde:

C. DOO em kg DOO removido/m³ x dia
C. DOO em kg DOB aplicado/m³ x dia

Para se estudar o comportamento da concentração do substrato através da profundidade dos filtros partiu-se da equação geral:

$$C_r = A \frac{C_v}{B + C_v}$$

e substituiu-se:

$$C_r = \frac{Q}{V} (S_o - S_e) = \frac{Q}{A.h}$$

$$(S_o - S_e)$$

$$C_r = \frac{q_A}{h} (S_o - S_e)$$

onde Q = vazão (m³/dia)

V = volume do filtro (m³)

h = profundidade do filtro (m)

 $S_o =$  concentração de matéria orgânica (DQO ou DBO) do afluente  $(kg/m^3)$ 

S. = concentração de matéria orgânica (DBO ou DQO) do efluente decantado (kg/m³)

A equação geral fica então:

$$\frac{q_A}{h} (S_o - S_\bullet) = \frac{A C_V}{B + C_V}$$

ou 
$$S_o - S_e$$
) =  $A C_v \over B + C_v \cdot \left(\frac{h}{q_A}\right)$ 

Sendo 
$$C_v = \left(\frac{q_A}{h}\right) S_o$$

tem-se:

$$S_{\bullet} = S_{\circ} \left[ 1 - \frac{A}{B + \left(\frac{q_{A}}{h}\right) S_{\circ}} \right]$$

ou 
$$\eta = \frac{S_o - S_e}{S_o} = \frac{A}{B + \left(\frac{q_A}{h}\right)S_e}$$

 $\eta =$  eficiência do sistema.

Usando-se os valores médios obtidos experimentalmente, para a faixa de q entre 28,1 e 62,9 m³/m² x dia, foram obtidas as seguintes equações:

Equações relativas a DBO, válidas para:

. 28 m³/m² x dla <q $_A$  < 63 m³/m² x dia e

.  $C_{"DBO}$  < 4 kg DBO/m³ x dia Para filtros com agregado leve

$$S_{\star} = S_{\circ} \left[ 1 - \frac{20.35}{23.45 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\circ}} \right]$$

ou

$$\eta = \frac{S_{\circ} - S_{\bullet}}{S_{\circ}} = \left[ \frac{20,35}{23,45 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\bullet}} \right]$$

Para filtros com anéis de plástico

$$S_* = S_o - 1 - \left[ \frac{50,03}{60,04 + \left(\frac{q_A}{h}\right)} S_o \right]$$

ou

$$\eta = \frac{S_{\circ} - S_{\bullet}}{S_{\circ}} = \left[\frac{50,03}{60,04 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\bullet}}\right]$$

Equações relativas a DQO, válidas para 28 m³/m² x dia < q $_{\rm A}$  < 63 m³/m² x dia

 $C_{mDOO}$  < 8,2 kg DQO/m<sup>3</sup> x dia Para filtros com agregado leve

$$S_{e} = S_{o} \quad 1 \quad - \left[ \frac{23,85}{31,23 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{o}} \right]$$

ou

$$\eta = \frac{S_{\circ} - S_{\bullet}}{S_{\circ}} = \left[ \frac{23.85}{31.23 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\bullet}} \right]$$

Para filtros com anéis de plástico

$$S_{\bullet} = S_{\circ} \quad 1 \quad - \left[ \frac{25,53}{34,67 \quad + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\circ}} \right]$$

ou

$$\eta = \frac{S_{\circ} - S_{\bullet}}{S_{\circ}} = \left[\frac{25,53}{34.67 + \left(\frac{q_{A}}{h}\right)S_{\bullet}}\right]$$

Das figuras 18 e 19, nota-se uma boa aderência dos pontos obtidos com as equações, bem como mostra que para  $q_A=93.5~m^3/m^2~x$  dia o comportamento dos filtros muda muito.

Nota-se ainda, que a grande parcela da remoção de matéria orgânica é conseguida no 1,8 m inicial do filtro, o que não justificaria alturas maiores para os filtros biológicos. Por outro lado, para profundidades maiores, especialmente 3,8 m ou mais, a qualidade do efluente apresenta ainda maior consistência, sofrendo menores flutuações, mesmo com flutuações grandes do afluente.

De um modo geral, para  $q_{_{\Delta}}~<~63$ m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> x dia, aumentos sensíveis nas concentrações de DBO e DQO no afluente, não representavam necessariamente aumento nas concentrações desses parâmetros no efluente final, o que indica a possibilidade de se obter efluente de qualidade aceitável, mesmo para concentrações iniciais mais altas do que as médias observadas neste estudo, desde que obedecidos os limites nas taxas específicas de aplicação hidráulica superficial e orgânica. A DBO média dos efluentes nesta faixa operacional sempre foi inferior a 20 mg/l.

Para despejos domésticos mais típicos, onde se tem a DBO da ordem de 180 mg/l, após a decantação primária, é recomendável a construção de um filtro de agregado leve de lodo de esgoto, para se obter dados mais próximos à situação real, que tenha entre 3 m e 4 m de altura útil e opere como média com taxas de aplicação hidráulica entre 30 e 50 m³/m² x dia, mantendo-se taxas de aplicação de matéria orgânica de 1,5 a 2 kg DBO/m³ x dia. Esse filtro deverá ser munido de tomadas de amostra distanciadas

entre si, de 0,5 m, a partir da superfície. É ainda interessante, para se ter um sistema mais econômico, utilizar "bocais aspersores" para a distribuição dos esgotos sobre o filtro, ao invés dos tradicionais e caros distribuidores com braços rotativos.

Em realidade, os filtros-piloto operaram durante os estudos como filtros de taxa superalta, o que contribuiu para o não desenvolvimento de moscas, como também para a não nitrifificação do efluente final.

É possível que uma recirculação de parte do efluente do filtro ou do lodo sedimentado no clarificador final pudesse melhorar a eficiência dos filtros, e essa é uma alternativa que se recomenda estudar.

Infelizmente, não foi possível uma estimativa da produção de lodo nos filtros estudados, devendo portanto ser utilizados, por enquanto, os valores citados no item específico sobre producão de excesso de lodo já apresentado anteriormente.

# 17. CONCLUSÕES E **RECOMENDAÇÕES**

Dos trabalhos desenvolvidos até o momento, pode-se concluir que:

- Para valores da taxa de aplicação hidráulica superficial (q ) entre 28 m³/m² x dia e 63 m³/m² x dia, os filtros-piloto de agregado leve de lodo de esgoto e de plástico tiveram basicamente a mesma eficiência na remoção de matéria orgânica até valores da taxa específica de aplicação de matéria orgânica de 1,8 kg DBO/m³ x dia (3,0 kg DQO/m3 x dia). Para valores superiores a estes, o filtro com enchimento plástico se tornou mais eficiente.
- $= 93 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ x dia, a}$ Para q eficiência dos dois filtros-piloto caju bastante e a operação se tornou mais instável. Nesta condição operacional o filtro com enchimento plástico foi mais eficiente. O filtro com agregado leve não deve ser utilizado para valores de  $q_{\rm th} = 93 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}.$
- c) Tendo em vista que os esgotos utilizados nesta pesquisa são bem mais fracos do que os esgotos domésticos típicos, recomenda-se construir uma estação de tratamento de esgotos para uma cidade, utilizando-se filtro biológico com agregado leve de lodo de es-

goto, com q entre 30 m<sup>s</sup>/m<sup>2</sup> x dia. a 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> x dia.  $C_v = 1.5$ a 2,0 kg DBO/m³ x dia e altura entre 3 m e 4 m. A remoção de DBO esperada é da ordem de 85% e a estação deve ser operada de modo a se obter dados complementares para a otimização de projetos de filtros biológicos com agregado leve de lodo de esgoto tratando esgotos tipicamente domésticos. O filtro deve ser construído de modo a permitir operação flexível do sistema incluindo-se as possibilidades de recirculação e amostragens a diferentes alturas do filtro.

#### **BIBLIOGRAFIA**

- 1 HAWKES, H.A. The Ecology of Waste Water Treatment - Pergamon Press, 1964.
- -- "An Ecological Model 2 - JAMES, A. of Percolating Filters" of Percolating Fifters — Proceedings of Symposium on The Use of Mathematical Models in Water Pollution Control — University of Newcastle upon Tyne — Newcastle upon Tyne — England — September, 1973.
- 3 METCALF & Eddy, Inc. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. 2.\* ed. New York, Mc Graw-Hill, 1979. 920 p.
- W.P.C.F. ASCE Manual of Practice n.º 8 Wastewater Treatment Plant Design, Lancaster, Pa -USA; Lancaster Press, Inc., 1977. 560
- GALLER, W.S. & GOTAAS, H.B. —
  "Analysis of Biological Filter Variables". Journal San Eng. Div., ASCE,
  90, (5 a 6), 59-79 dec. 1964.
- 6 HEMMING, M.L. & WHEATLEY, D. -"Low Rate Biofiltration Systems Using Randon Plastic Media". Water Pollution Control — 78, (1), 54-66
- 7 MALINA, J. "Trickling Filter Process". In Advanced Water Pollution Control: Biological Waste Treatment University Texas at Austin; Austin, Tex., 1978.
- ATKINSON, B; BUSH, A. W. & DA-WKINS, G.S. "Recirculation, Reaction Kinetics, and Effluent in a Trickling Filter Flow Model" J. W. P. C. F., 35 (10): 1307 1317, oct.
- 1963. 9 BELKIN, H.M. et alli. "Turbulent Liquid Flow Down Vertical Walls" —
- Amer. 1153.

  (2): 286, 1959.

  10 ROESLER, J. F. & SMITH, R. "A Mathematical Model for a Trickling Filter" Proceedings 24th Indus-
- University, Lafayette, Indiana, 550-563, 1969.
  ECKENFELDER Jr., W.W. & BARNHART E. L. "Performance of a High Rate Trickling Filter Using Selected Media". I.W.P.C.F. 35 (12): 1535-1551, Dec. 1963.

- 12 OLESZKIEWICZ, J.A. "Biofiltration Design Based on Volumetric Loading" J.W.P.C.F. (12): 2906-2913, Dec. 1980.
   13 SCHULZE, K.L. "Experimental Vertical Screen Trickling Filter". Sewan and Johnstial Master 28 (4): 458
- ge and Industrial Wastes, 29 (4): 458-
- 467.
   GERMAIN, J.E. "Economical Treatment of Domestic Waste by Plastic-Medium Trickling Filters" J. W. P. C. F., 38, (2): 192-203, Feb.
- 15 VELZ, C.J. "A Basic Law for the Performance of Biological Filters". Sewage Works Journal, 20 (4): 607 617, July 1948.

  16 — GREELEY, S.A. — "Considerations
- GHEELEY, S.A. "Considerations and Procedures in the Design of High Rate Trickling Filters". Sewage Works Journal, 20 (5): 789-805, Sept. 1948.
   SCHULZE, K.L. "Load and Eficiency of Trickling Filters" J.W.P.C.F. 32, (3): 245-261, Mar 1960.
   JANK, B.E. & DRYNAN, W.R. "Substrate Removal Mechanism of Trickling Filters"
- trate Removal Mechanism of Tric-kling Filters." Journal of the Envir. Eng. Div. ASCE, EE3, 187-204, June
- 19 BRUCE, A.M. & MERKENS, J.C. "Further Studies of Partial Treatment of Sewage by High Rate Biological Filtration". Water Pollution Control
- Filtration\*. Water Pollution Control 72 (4), 1973.

  20 MOODIE, S.P. & KAVANAGH, B.V. "Production and Conditioning of Sludges from a High Rate Biological Filter" Water Pollution Control, 80 (5): 674-681, 1981.

  21 HOYLAND, G. & HARWOOD, N.J. "Design of Biological Filtration Plants" Water Pollution Control, 79 (3): 352-364, 1980.

  22 FLEMING, M. L. & COOK, E.E. "The Effect of the Surface Area Provided by a Synthetic Medium on the
- vided by a Synthetic Medium on the Performance of a Trickling Filter.

  Proceedings 27th industrial Wast Conference. Purdue University, La-
- fayette, Indiana.

  23 PORTER, K.E. & SMITH, E. "Plastic Media Biological Filters" Water Pollution Control, 78 (3): 371-379,
- CETESB, DPES "Filtros Biológicos de Alta Taxa. Comparação de Meios Suporte de Biomassa" Relatório Final de Pesquisa elaborado por P. Alem Sobrinho — São Paulo — Janeiro, 1984.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos aos engs. Valter Vilela dos Reis e José Roberto Montari, da Sabesp, responsáveis pela construção e instalação das unidades-piloto utilizadas nesta pesquisa.

Agradecemos, também, a colaboração da eng. Tânia M. Gasi, da Cetesb pela colaboração na pesquisa bibliográfica e ao eng. Alcides Diniz Garcia Jr., da Cetesb, pela colaboração no tratamento dos dados e obtenção das equações representativas do processo estudado.