



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

NOVOS ASPECTOS NA OPERAÇÃO
DE FILTROS BIOLÓGICOS

TRABALHO APRESENTADO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Autora: SANDRA MARIA FURIAM DIAS

Orientador: AMADEU DA ROCHA FREITAS

Co-orientador: LUIZ OLINTO MONTEGGIA

Examinadores:

Prof. Amadeu da Rocha Freitas

Prof. Jurandyr Povinelli

Prof. Luiz Olinto Monteggia

Prof. Sergio João de Luca

Ao TAYSER, meu marido.

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

Ao professor orientador, AMADEU DA ROCHA FREITAS pela sua orientação durante a realização deste trabalho.

Ao professor co-orientador LUIZ OLINTO MONTEGGIA pelas suas valiosas sugestões e orientação no andamento desse trabalho.

Ao professor JAN SUSCHKA pela sua orientação na preparação inicial deste estudo.

Também agradeço aos funcionários do laboratório de Saneamento (IPH) pela ajuda nos trabalhos de laboratório, bem como as demais pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do trabalho.

Observação: Este trabalho teve o apoio financeiro da FINEP-CNPq. Foi realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Porto Alegre, e na Estação de Tratamento de Esgotos do Passo D'Areia - Porto Alegre, com a cooperação do DMAE.

SINOPSE

A atual crise energética e econômica leva à procura de soluções que conjuguem eficiência e economia na preservação do meio ambiente. Dentro desse quadro, a utilização de filtros biológicos como tratamento de esgotos deve ser incrementada.

A finalidade do estudo foi a de avaliar o desempenho de um filtro biológico piloto operado com pré-aeração de seu afluente a quatro taxas de aplicação. O filtro assim operado proporcionou melhor remoção de DBO_5 em temperaturas mais altas.

Em outra etapa distinta o desempenho foi verificado para filtro biológico operado com recirculação. Foram utilizadas duas taxas de recirculação e três taxas de aplicação.

Outras informações como a influência do tempo de detenção, da taxa de recirculação, da carga orgânica aplicada e da presença de ABS também foram encontradas.

ABSTRACT

Due to the energy and economy crisis solutions are being sought for combining efficiency and saving in preserving the environment. Thus it is necessary to increase the use of trickling filters in sewage treatment.

The purpose of this study was to assess the performance of a pilot trickling filter operated using four different application of rates of influent pre-aerated. This type of filter operation provided a better BOD₅ removal at higher temperatures.

In a later stage the performance of trickling filters operated using recirculation was studied. Two rates of recirculation and three rates of application were used.

Other information was also found such as influence of detention time, recirculation rate, organic load and presence of ABS.

S U M Á R I O

	Página
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 - Introdução	2
2.2 - Classificação dos filtros biológicos	3
2.3 - Considerações sobre o dimensionamen- to com fórmulas empíricas	6
2.4 - Mecânica do processo de purificação dos esgotos	20
2.5 - Influência da temperatura	29
2.6 - Influência da recirculação	36
2.7 - Tempo de detenção	40
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 - Etapas de estudo	43
3.2 - Descrição do modelo	44
3.2.1 - Considerações gerais	44
3.2.2 - Pré-aeração	44
3.2.3 - Recirculação	47
3.3 - Metodologia	49
3.3.1 - Operação do filtro biológico piloto	49
3.3.2 - Parâmetros analisados	51
3.3.3 - Determinação do tempo de de- tenção	55

	Página
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 - Com pré-aeração	62
4.2 - Com recirculação	87
4.3 - Verificação do desempenho da coluna piloto por 5 métodos	118
4.4 - Relação DBO_5 - DQO	131
5 - CONCLUSÕES	136
Recomendações	140
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
<u>Apêndice 1</u> - Valores dos parâmetros analisados em função do tempo de operação. Representados nos quadros de I a X	147
<u>Apêndice 2</u> - Conceitos utilizados	170
<u>Apêndice 3</u> - Lista de abreviaturas e símbolos ..	171
<u>Anexo 1</u> - Comparação de custo entre filtro bioló gico com pré-aeração e com recirculação	172

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
2.1 - Remoção de DBO em relação a carga orgânica ...	16
2.2 - Remoção de DQO em relação a carga orgânica ...	16
2.3 - A concentração de DBO_5 em efluente em relação a carga orgânica	17
2.4 - A concentração de DQO em efluente em relação à carga orgânica	17
2.5 - A DBO_5 máxima em efluente em relação à carga orgânica	18
2.6 - A DQO máxima em efluente em relação à carga orgânica	18
2.7 - Remoção de DBO em relação à carga orgânica ...	19
2.8 - Remoção de DBO em relação à carga hidráulica .	19
2.9 - Natureza da interface líquido-"sólido"	24
2.10 - Perfil da mudança do substrato	24
2.11 - Perfil da velocidade e de concentração do oxigênio dentro de uma película descendente de líquido	28
2.12 - Perfis de concentração de O_2 para vários tempos de contato	28
2.13 - Efeitos da temperatura sobre a remoção do substrato	31

	Página
2.14 - Relação entre a concentração de OD e a remoção de DBO_5	33
2.15 - Efeitos da temperatura sobre a remoção de DBO_5	33
2.16 - Efeito da temperatura na concentração de O_2 ...	34
2.17 - Efeito da temperatura na concentração de O_2 em escala piloto	34
2.18 - Relação entre concentração de OD e remoção de DBO em escala piloto	35
2.19 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO em escala piloto	35
2.20 - Curva teórica para efeito da temperatura sobre um filtro de 1,80 m de altura com carga de $5 m^3/m^2$ dia	37
3.1 - Esquema do sistema de tratamento com pré-aeração	45
3.2 - Esquema do sistema de tratamento com recirculação	45
3.3 - Esquema do sistema de tratamento com pré-aeração	46
3.4 - Esquema do sistema de tratamento com recirculação	48
3.5 - Curva da condutividade elétrica no tempo	58
4.1 - Variação do pH ao longo do tempo com pré-aeração	63

	Página
4.2 - Variação da alcalinidade e acidez ao longo do tempo com pré-aeração	65
4.3 - Variação da condutividade elétrica ao longo do tempo com pré-aeração	66
4.4 - Variação da OD e temperatura ao longo do tempo com pré-aeração	67
4.5a - Influência do Δ médio na remoção de DBO com pré-aeração	68
4.5b - Influência do Δ médio no tempo de detenção com pré-aeração	68
4.6 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO. Remoção de DBO_5 em relação ao OD	70
4.7 - Desempenho do filtro em relação a carga de DBO aplicada - com pré-aeração	72
4.8 - Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada - com pré-aeração	73
4.9 - Remoção de DBO em relação a carga orgânica aplicada com pré-aeração	76
4.10 - Remoção de DQO em relação a carga orgânica aplicada com pré-aeração	76
4.11 - Concentração de DBO no efluente em relação a carga aplicada - com pré-aeração	77
4.12 - Concentração de DQO no efluente em relação a carga aplicada - com pré-aeração	77

	Página
4.13 - Influência da concentração de ABS afluente no desempenho da coluna piloto	79
4.14 - Efeito do tempo de detenção sobre o desempenho do filtro. Com pré-aeração	81
4.15 - Relação entre taxa de aplicação e tempo de detenção. Com pré-aeração	82
4.16 - Variação do pH ao longo do tempo. Com recirculação	88
4.17 - Variação da alcalinidade e acidez ao longo do tempo. Com recirculação	91
4.18 - Variação do OD e temperatura ao longo do tempo. Com recirculação	93
4.19 - Variação da condutividade elétrica ao longo do tempo. Com recirculação	95
4.20 - Relação entre Δ médio e tempo de detenção. Com recirculação	97
4.21 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO_5 . Remoção de DBO em relação ao OD	98
4.22 - Desempenho do filtro em relação a carga de DBO aplicada. Com recirculação	101
4.23 - Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada. Com recirculação	103
4.24 - Remoção de DBO em relação a carga orgânica. Com recirculação	105

	Página
4.25 - Concentração de DBO_5 no efluente em relação a carga aplicada. Com recirculação	106
4.26 - Remoção de DQO em relação a carga orgânica. Com recirculação	107
4.27 - Concentração de DQO no efluente em relação a carga aplicada. Com recirculação	108
4.28 - Relação entre tempo de detenção e taxa de aplicação	110
4.29 - Influência do tempo de detenção no desempenho do filtro. Com recirculação	111
4.30 - Relação DBO_5 - DQO do afluente bruto (AB) .	133
4.31 - Relação DBO_5 - DQO do efluente (E)	134
4.32 - Relação DBO_5 - DQO do afluente à estação ..	135

RELAÇÃO DE QUADROS

	Página
3.1 - Valores medidos do tempo de detenção na <u>co</u> luna experimental - afluente = esgoto	60
3.2 - Valores medidos do tempo de detenção na <u>co</u> luna experimental - afluente = água	61
4.1.1 - Remoção de elementos traços	80
4.1.2 - Remoções máximas, médias e mínimas obtidas com o filtro biológico. Com pré-aeração ..	84
4.1.3 - Comparação entre eficiência com efluente não filtrado e filtrado. (Com pré-aeração)	85
4.2.1 - Remoção de elementos traços	114
4.2.2 - Remoções máximas, médias e mínimas obtidas com filtro biológico. (Com recirculação) .	115
4.2.3 - Comparação entre eficiência com efluente não filtrado e filtrado. (Com recirculação)	117
4.3.1 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia	120
4.3.2 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia	121
4.3.3 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia	122
4.3.4 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia	123

	Página
4.3.5 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 0,70$	124
4.3.6 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 1,50$	125
4.3.7 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 0,70$	126
4.3.8 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 1,50$	127
4.3.9 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 0,70$	128
4.3.10 - Comparação da eficiência observada e calculada. T.A. = $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e $r = 1,50$	129
4.3.11 - Erro padrão da estimativa. (Com pré-aeração)	130
4.3.12 - Erro padrão da estimativa. (Com recirculação)	130

1. INTRODUÇÃO

Os Filtros Biológicos desde sua primeira aplicação em 1893, são muito usados em todo o mundo. Embora nos últimos 20 anos tenha sido preterido em favor do processo de Lodo Ativado, o reduzido consumo de energia para operação justifica sua instalação em pequenas e médias comunidades. Também para cidades maiores pela nova tecnologia do uso do material plástico como meio suporte, o que tornou possível construções de maior altura e com maiores superfícies de contato, podendo ser aplicadas cargas hidráulicas e orgânicas mais elevadas.

No estudo do efeito da temperatura na remoção do substrato em filtros biológicos (33) foram encontrados resultados que não iam ao encontro da afirmação clássica do aumento da eficiência com o aumento da temperatura. Como os esgotos tratados eram provenientes de um tanque Imhoff, com concentrações de oxigênio próximo de zero, foi sugerido o enriquecimento dos esgotos com oxigênio para que, em condições de clima tropical, houvesse maior eficiência dos filtros biológicos.

Foi nesse sentido que a primeira fase desse trabalho foi conduzida. Os esgotos foram aerados antes da alimentação do filtro e verificada a influência da temperatura na remoção de DBO_5 . Foram também determinados outros parâmetros destinados a verificar o seu desempenho.

Em uma segunda fase distinta foi realizado estudo do desempenho do filtro biológico com recirculação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Estruturalmente os filtros biológicos consistem em recipientes de forma cilíndrica ou quadrática, em cujo interior é possibilitado o acondicionamento de um leito suporte. Esse leito que pode ser de pedra, tijolos, madeira, plástico, coque ou bambus, tem a finalidade de servir de suporte aos organismos vivos capazes de estabilizar a matéria orgânica ou elaborar as substâncias tóxicas dos efluentes domésticos ou industriais.

Considerando que filtração é a retenção dos sólidos em suspensão presentes num líquido que flui através de um leito poroso, deve-se, preliminarmente, esclarecer que nenhuma ação de filtração ocorre no filtro biológico em que o tamanho dos grãos é tão grande que não há retenção de sólidos nos poros e o próprio líquido não chega a inundar o leito, mas escoar apenas sobre as pedras numa fina camada. A analogia entre o verdadeiro filtro e o chamado filtro biológico é, pois, apenas formal (grãos sólidos sobrepostos). Logo a enorme diferença de granulometria e a circunstância de escoamento junto à superfície dos grãos implicam num fenômeno de natureza completamente diferente (24).

A DBO do esgoto líquido passando através do filtro biológico é reduzida por bio-oxidação e bio-floculação. A cinética da utilização da DBO supondo ser de primeira ordem pode ser equacionada por:

$$\frac{dS}{dt} = -KS \quad (2.1)$$

S = DBO do esgoto remanescente

t = tempo

K = constante de redução do substrato

2.2. Classificação dos filtros biológicos

2.2.1. Segundo Pastana, A.P. e outros (24)

a - Com base na taxa de aplicação

a.1. Baixa capacidade - até $2,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia

DBO acima de 200 mg/l

a.2. Alta capacidade - taxa de aplicação de 8,5 até

$28 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia

DBO de 500 até 1800 mg/l

b - De acordo com a profundidade

b.1. raso

b.2. profundo

c - Em função da recirculação

d - De acordo com o número de estágios - quando o efluente é afluente do seguinte

d.1. Filtração simples - de 1 só estágio

d.2. Filtração dupla - se há 2 estágios

d.3. Filtração múltipla - mais de 2 estágios

2.2.2. Segundo Suschka (32)

Nome do filtro	Carga orgânica $\text{g/m}^3 \cdot \text{dia}$	Taxa de aplicação $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$	Altura do leito (m)	Recirculação
Filtros convencionais de baixa capacidade	80 a 175	1,2 a 6	1,0 a 2,4	Raramente
Filtros de capacidade intermediária	175 a 750	12 a 20	2,4 a 4,5	Comum
Filtros de alta capacidade	750 a 8000	20 a 120	4,0 a 12	Sempre

2.2.3. Segundo Metcalf-Eddy (38)

Item	Classificação dos filtros			
	Filtro de baixa taxa	Filtro de taxa intermediária	Filtro de alta taxa	Filtro de taxa super alta (grosseiro)
Taxa de aplicação hidráulica $m^3/m^2 \cdot dia$	1 - 4	4 - 10	10 - 40	40 - 200
Taxa de aplicação orgânica $kg DBO/m^3 \cdot dia$	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, escória, etc	Pedra, escória, etc	Pedra, escória, mat. sintético	Materiais sintéticos, madeira vermelha
Potência requerida $Kw/1000 m^3$	2 - 4	2 - 8	6 - 10	10 - 20
Moscas do filtro	Muitas	Intermediários	Poucas, as larvas são carregadas	Poucas ou nenhuma
Arraste do lodo	Intermittente	Intermittente	Contínua	Contínua
Intervalos de dosagem	Menor que 5 minutos (normalmente intermitente)	15 a 605 (contínua)	Menor que 15 segundos (contínua)	Contínua
Efluente	Normalmente bem nitrificado	Parcialmente nitrificado	Nitrificado a baixas cargas	Nitrificado a baixas cargas

2.3. Considerações sobre o dimensionamento com fórmulas empíricas

Embora o teste da DBO indique seu valor no afluente e efluente do filtro, ele não mostra o que realmente ocorre no seu interior em relação às variáveis físicas.

Ao longo dos anos, pesquisadores tentam mostrar teoricamente o que ocorre no interior do filtro.

Velz (35) apresentou uma teoria aplicável a todos os leitos biológicos tanto em altas como baixa taxa que diz: "A taxa de extração da matéria orgânica por intervalo de profundidade de um leito biológico é proporcional a concentração remanescente da matéria, medida em termos de sua removibilidade."

$$\frac{L_D}{L_o} = 10^{-kD} \quad (2.2)$$

L_o = DBO aplicada no afluente

L_D = quantidade de DBO biodegradável remanescente a profundidade D

D = profundidade

k = constante

O acima exposto é reconhecido ser similar a lei de oxidação biológica desenvolvida por Phelps.

A taxa logarítmica de extração k e a grandeza da fração removível L devem ser determinados experimentalmente para qualquer tipo particular de leito biológico.

A fórmula da National Research Council (NRC) que foi desenvolvida para projetar Filtros Biológicos de dados operacionais de estações de instalações de serviços militares durante a II Guerra Mundial é:

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0,443 \sqrt{\frac{W}{V.F}}} \quad (2.3)$$

E_1 = Eficiência em percentagem da remoção da DBO de filtro de simples estágio e decantador secundário

W = Carga de DBO aplicada, não incluindo a DBO do recirculado - kg/dia

V = volume do meio - m^3

F = Fator de recirculação, reflete o aumento da remoção devido a recirculação

r = Taxa de recirculação

A equação abaixo é usada para o cálculo da eficiência de um filtro biológico em 2º estágio.

$$E_2 = \frac{1}{1 + \frac{0,443}{1 - E_1} \sqrt{\frac{W'}{V.F}}} \quad (2.4)$$

W' = carga de DBO aplicada ao 2º filtro, não incluindo DBO do recirculado

O fator de recirculação foi definido como:

$$F = \frac{r + 1}{(0,1 r + 1)^2} \quad (2.5)$$

Ten States or Great Lakes Uper Missisipi River Boards of State Sanitary Engineers especificou cargas para Filtro Biológico. Eles afirmam:

"Em um filtro de estágio simples a carga aplicada, incluindo recirculação não deve exceder a 50 kg de DBO₅ por 28,3 m³ de meio filtrante por dia."

Também: "O sistema de recirculação deve fornecer suficiente diluição para o esgoto sedimentado, a fim de que a DBO afluente para o filtro, incluindo a recirculação, não exceda três vezes a DBO requerida do efluente sedimentado."

A eficiência prevista por eles é dada por:

$$E_1 = \frac{r + 1}{r + 1,5} \quad (2.6)$$

E_1 = eficiência do Filtro Biológico

r = taxa de recirculação

Essa fórmula não especifica como a eficiência do Filtro pode variar.

Howland (15) propôs que a taxa de DBO removida era uma função do tempo de contato e a forma da equação tornou-se:

$$\frac{Le}{Lo} = e^{-kt} \quad (2.7)$$

$$t = k' \frac{D}{Q^n} \quad (2.8)$$

Le = DBO remanescente no efluente

Lo = DBO aplicada no afluente

n e k' = constantes

Q = taxa de aplicação mgad

A DBO remanescente no efluente pode ser obtida substituindo 2.8 em 2.7:

$$\frac{Le}{Lo} = e^{-k' (D/Q^n)} \quad (2.9)$$

O valor de n foi determinado ser 2/3. Howland introduziu o fator θ para a correção da temperatura sobre a taxa de reação, k , na equação de redução de DBO

$$\theta = 1,035^{T - 20} \quad (2.10)$$

T = temperatura em $^{\circ}C$

A equação 2.9 torna-se

$$\frac{Le}{Lo} = e^{-k \theta (D/Q^n)} \quad (2.11)$$

Schulze (27) avaliou as constantes para essa forma de equação como:

$$\frac{Le}{Lo} = 10^{-0,3 (D/Q^{0,67})} \quad (2.12)$$

Onde

D = profundidade do meio, ft

Q = taxa de aplicação, mgd/acre

r = taxa de recirculação

C, m, n = constantes características do meio suporte do filtro

Para projetos de filtros com meio filtrante de pedras, tratando esgotos domésticos os valores C, m, n foram determinados como 2,5, 0,33 e 0,5 respectivamente. Eckenfelder e Barnhart apresentaram outros valores de C e n de acordo com outros tipos de meio suporte:

Meio	Ac (m^2/m^3)	n	C
Polygrid	99,6	0,65	9,5
Esferas de vidro (diâmetro de 1,3 cm)	282,2	0,82	22,5
Esferas de vidro (diâmetro de 1,9)	200,2	0,80	15,8
Esferas de vidro (diâmetro de 2,5 cm)	138,1	0,75	12,0
Esferas de porcelana (diâmetro 7,6 cm)	41,8	0,53	5,1
Pedras (6,3 - 10,2 cm)	-	0,408	4,15
Dowpac	83,0	0,50	4,84
Asbesto	83,0	0,50	5,10
Mead-Cor	99,6	0,70	5,6
Asbesto	166,0	0,75	7,2
Asbesto	282,2	0,80	8,0

Eckenfelder (8) modificou a teoria para incluir a consideração na qual a quantidade de películas superficial ativa, C , cobrindo o meio filtrante decresce com a profundidade e pode ser equacionada na forma

$$C \approx \frac{1}{D^m} \quad (2.13)$$

A equação (2.12) presume que todas as componentes do esgoto orgânico são removíveis à mesma taxa. Há evidências que a remoção da DBO decresce com a concentração ou tempo, porque as componentes mais assimiláveis serão removidas mais rapidamente. Isso requereu que a equação fosse modificada para uma forma retardária.

$$\frac{L_e}{L_o} = \frac{100}{1 + \left[\frac{C D (1 - m)}{Q^n} \right]} \quad (2.14)$$

O efeito da recirculação foi tomado dentro de considerações primárias como um efeito de diluição.

De acordo com esses fatores Eckenfelder propôs a equação:

$$\text{Eficiência do Filtro Biológico} = \frac{1}{(1 + r) \left[1 + \frac{CD(1 - m)}{Q^n} \right] - r} \quad (2.15)$$

Baker e Graves (39) desenvolveram a seguinte relação pela resolução da equação (2.15):

$$V_1 = 7,0 \frac{Q}{D^{0,33}} \left[\frac{E_1 (1 - E_1)}{1 + r} \right]^2 \quad (2.16)$$

Onde V_1 é o volume de um filtro de simples estágio ou o volume do primeiro estágio de um sistema de 2 estágios em (1000 ft³).

Baker e Graves (39) também modificaram a fórmula de Eckenfelder para torná-la aplicável ao segundo estágio de tratamento pela introdução de um fator retardante $1/(1 - E_1)^2$.

$$V_2 = 7,0 \frac{Q}{D^{0,33}} \left[\frac{E_2}{(1 - E_1) (1 - E_2) (1 + r)} \right]^2 \quad (2.17)$$

V_2 = volume do filtro do 2º estágio (1000 ft³)

Galler e Gotaas (10) desenvolveram um modelo matemático para Filtro Biológicos. Recirculação, profundidade, taxa hidráulica, temperatura e carga orgânica foram incluídas como variáveis independentes. As equações finais obtidas são como segue:

$$Le = \frac{K (i Lo + v Le)^{1,19}}{(i + v)^{0,78} (1 + D)^{0,67} a^{0,25}} \quad (2.18)$$

com

$$K = \frac{0,464 \left(\frac{43560}{\eta} \right)^{0,13}}{i^{0,28} T^{0,15}} \quad (2.19)$$

L_e = DBO efluente, mg/l

L_o = DBO afluente, mg/l

i = vazão afluente, mgd

v = vazão recirculada, mgd

a = raio do filtro

T = temperatura do esgoto ($^{\circ}\text{C}$)

D = profundidade, ft

$\frac{v}{i}$ = taxa recirculada

Baker e Graves (39) rearranjaram a equação 2.18 e resolvendo para o volume do filtro encontraram:

$$V_1 = 0,1355 D \left[\frac{(i)^{0,13} (i)^{0,19} 1 + r(1 - E_1) 1,19}{(T)^{0,15} (1 + D)^{0,67} (1 - E_1) (1 + r)^{0,78}} \right]^8 \quad (2.20)$$

onde V_1 = volume do filtro no 1º estágio em 1000 ft³.

De acordo com Baker e Graves (39), aplicando um fator retardante de $1 (1 - E_1)^4$ a fórmula de Galler e Gotaas dará uma expressão para o tratamento no 2º estágio similar à equação do NRC. Essa equação é:

$$V_2 = 0,1355 D \left[\frac{(i)^{0,13} (L_o)^{0,19} 1 + r(1 - E_2) 1,19}{(T)^{0,15} (1 + D)^{0,67} (1 - E_2) (1 + r)^{0,78} (1 - E_1)^{0,5}} \right]^8 \quad (2.21)$$

Hanumanulu (13) modificou a fórmula de Galler e Gotaas incorporando um expoente sobre o termo profundidade. Baseado no seu estudo, encontrou que a variação do expoente seguiu uma lei linear da forma $(p + qr)$, onde p e q são constantes tomando valores de 0,4 e 0,35 respectivamente.

$$Le = \frac{K (i Lo + v Le)^{1,19}}{(i + v)^{0,78} (1 + D)^{(0,48 + 0,35 r)} a^{0,25}} \quad (2.22)$$

Para esgotos domésticos, Balakrishnan e Eckenfelder apresentaram a seguinte relação empírica:

$$\frac{Se}{So} = e^{-0,0362 As^{0,6444}} \cdot So^{0,540} \cdot \frac{D}{i^n} \quad (2.23)$$

Se = concentração do substrato efluente (g/m^3)

So = concentração do substrato afluente (g/m^3)

As = superfície específica (m^2/m^3)

D = altura do filtro (m)

i = vazão do esgoto afluente (m^3/d)

A superfície específica pode variar de $40 m^2/m^3$ para brita de basalto até $220 m^2/m^3$ para materiais plásticos.

Hanumanulu (13) estudou o desempenho de um filtro profundo com e sem recirculação pelas fórmulas de Velz, Ten States, NRC, Eckenfelder e Galler e Gotaas. Ele concluiu que para filtros sem recirculação as fórmulas do NRC e Ten States previram resultados mais próximos dos observados. Para filtros com recirculação os valores obtidos pelas fórmulas de Eckenfelder e Galler e Go-

taas foram os mais próximos daqueles observados.

Hanumanulu cita outros estudos na qual a fórmula Ten States aproxima melhor os seus resultados com os resultados observados.

Na realidade com a mesma carga orgânica ou taxa de aplicação são obtidas diferentes remoções.

Suschka (32), em seu trabalho, apresenta dados de 44 estações de tratamento com filtros biológicos da Alemanha levantados por Imhoff (16), como uma relação entre carga orgânica aplicada e remoção de DBO e DQO, figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6. Também nas figuras 2.7, 2.8, estão os dados generalizados de 60 estações com filtros biológicos nos Estados Unidos (25).

Mehta, Davis e Kingsburg (20) tentam explicar o aumento da carga removida com o aumento da carga aplicada bem como o decréscimo da eficiência com aumento da carga orgânica aplicada do ponto de vista da transferência de massa. Afirmam eles que para uma mesma concentração de DBO afluente e aumentando a taxa de aplicação, apesar da queda na percentagem de remoção de DBO, a massa removida sobe até tornar-se constante correspondente a uma carga crítica. Nesse nível tem-se a máxima transferência de oxigênio possível.

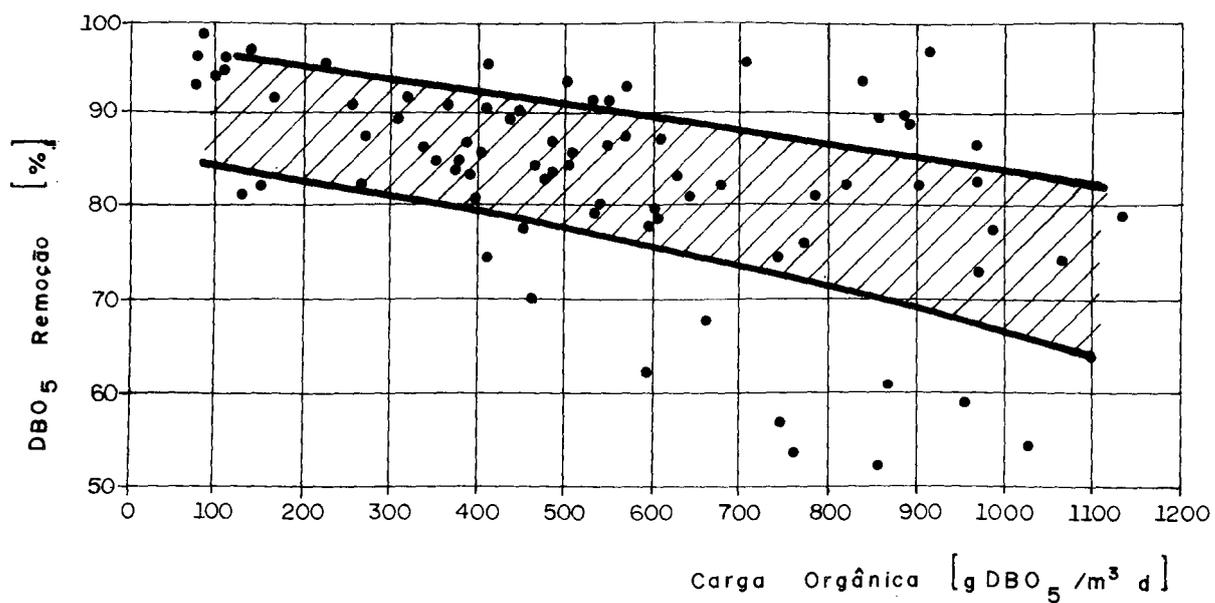


FIG. 2.1 Remoção de DBO em relação a carga orgânica. (16)

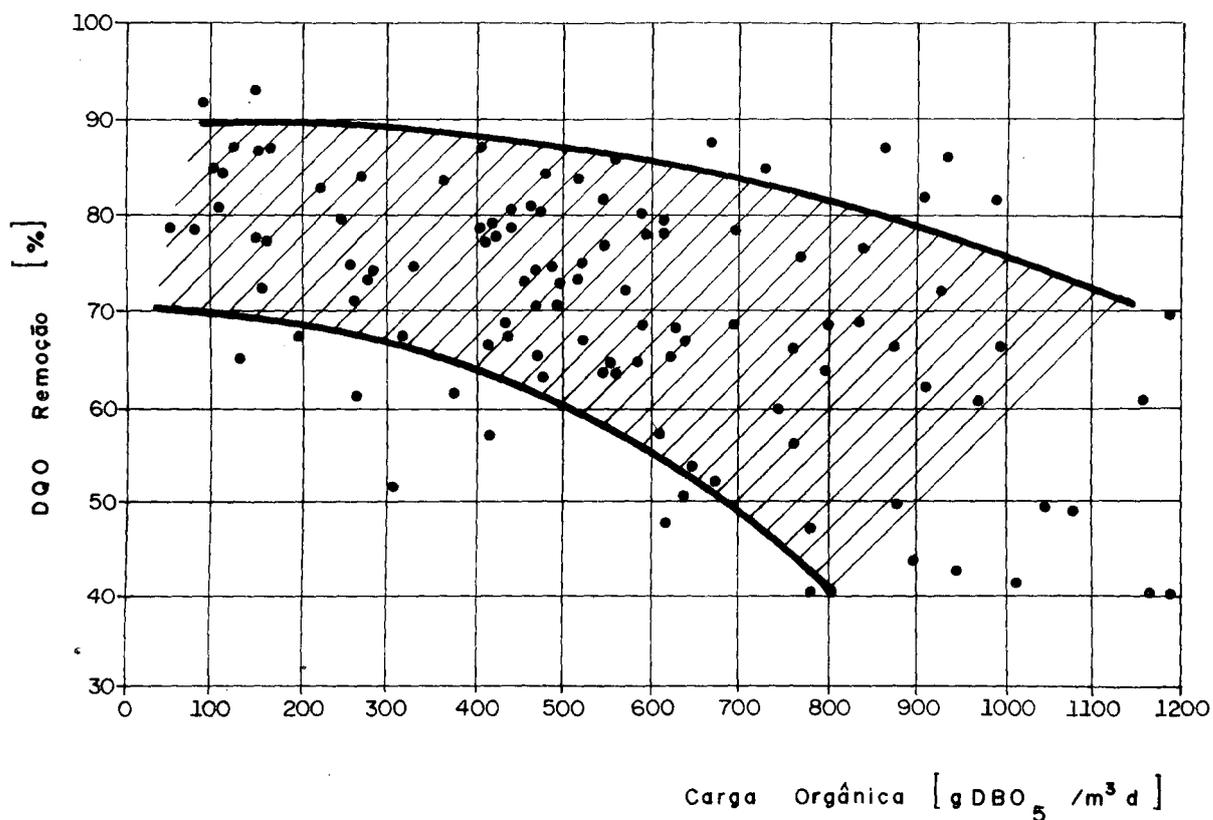


FIG. 2.2 Remoção de DQO em relação a carga orgânica. (16)

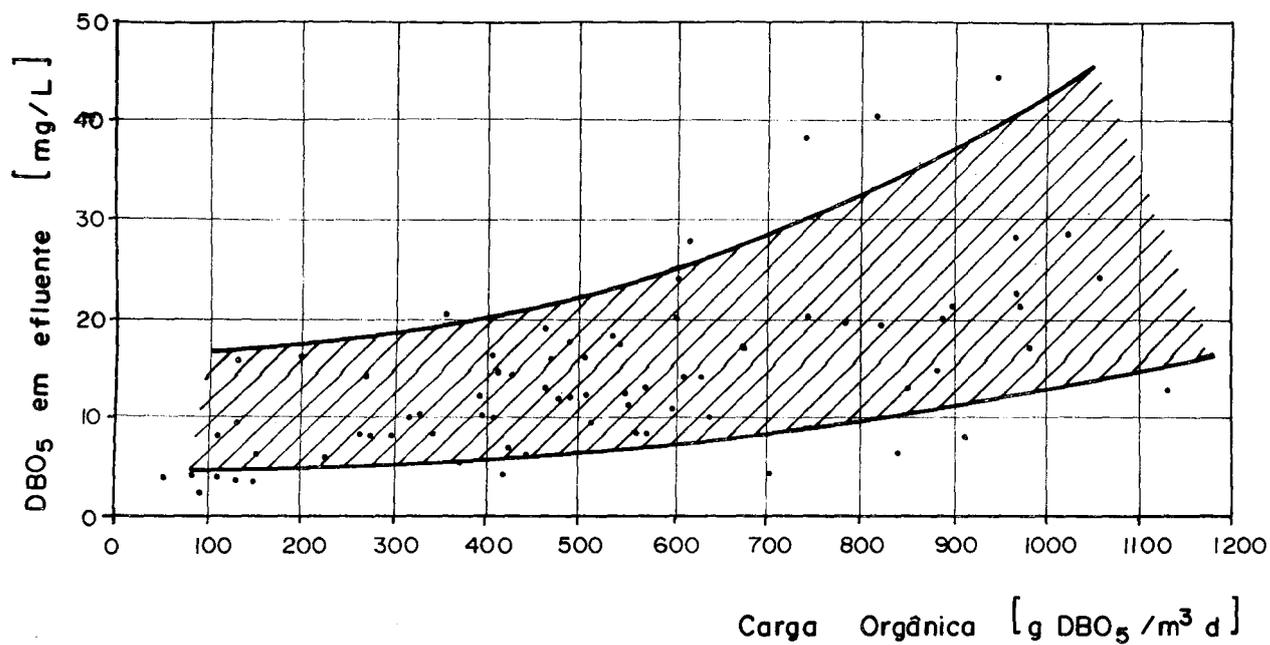


FIG. 2.3—A concentração de DBO₅ em efluente em relação á carga orgânica (16)

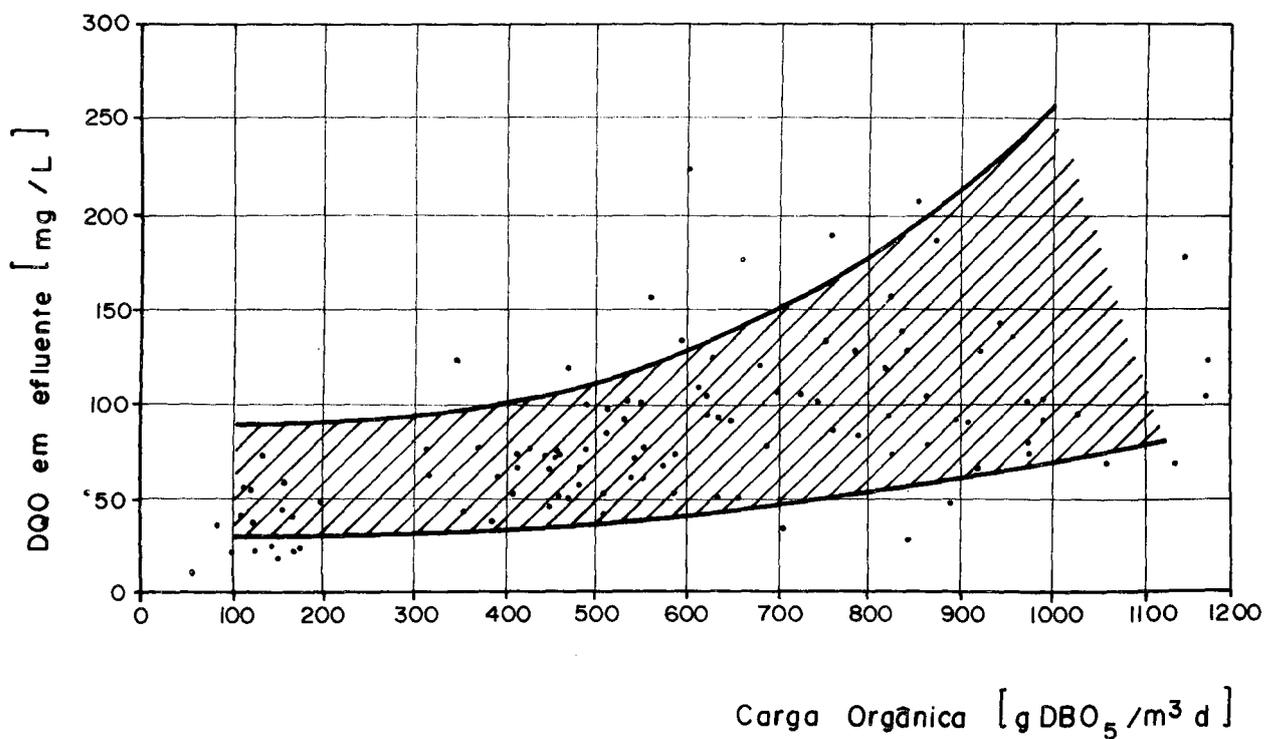


FIG. 2.4—A concentração de DQO em efluente em relação á carga orgânica (16)

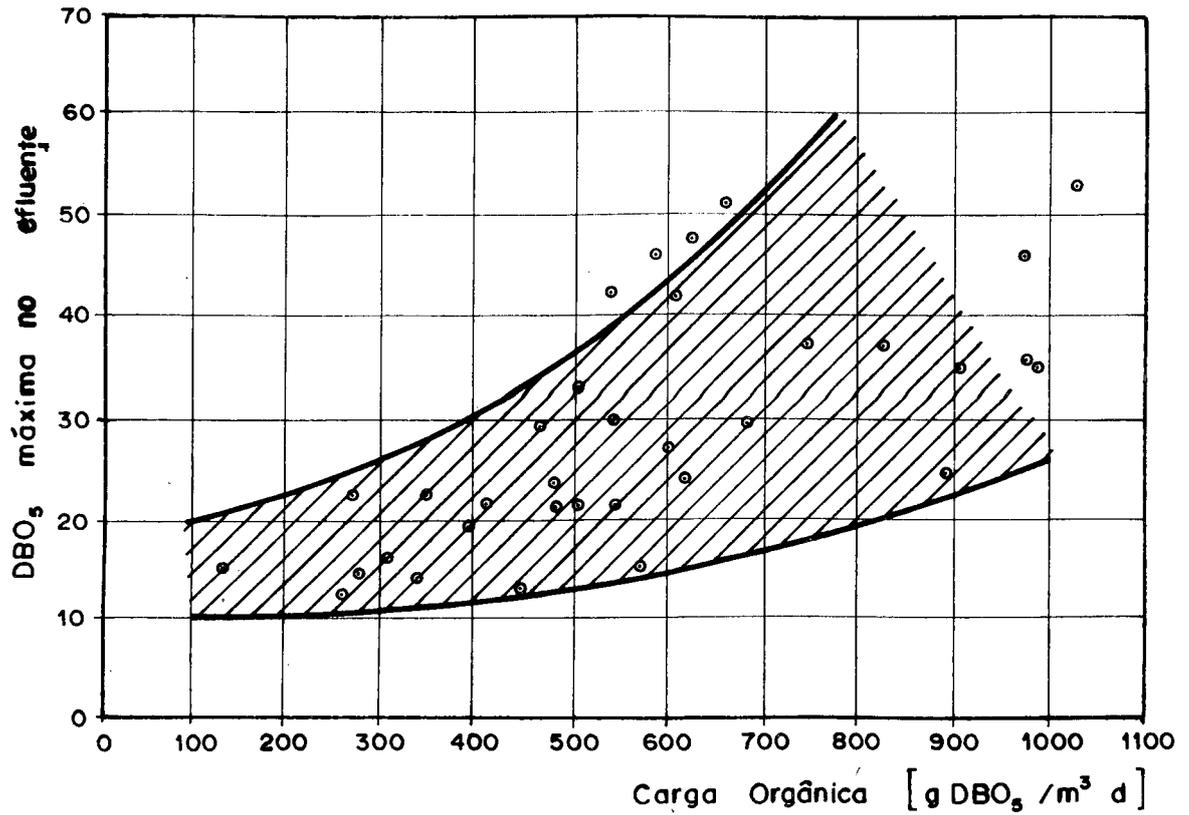


FIG. 2.5 - A DBO₅ máxima em efluente em relação a carga orgânica. (16)

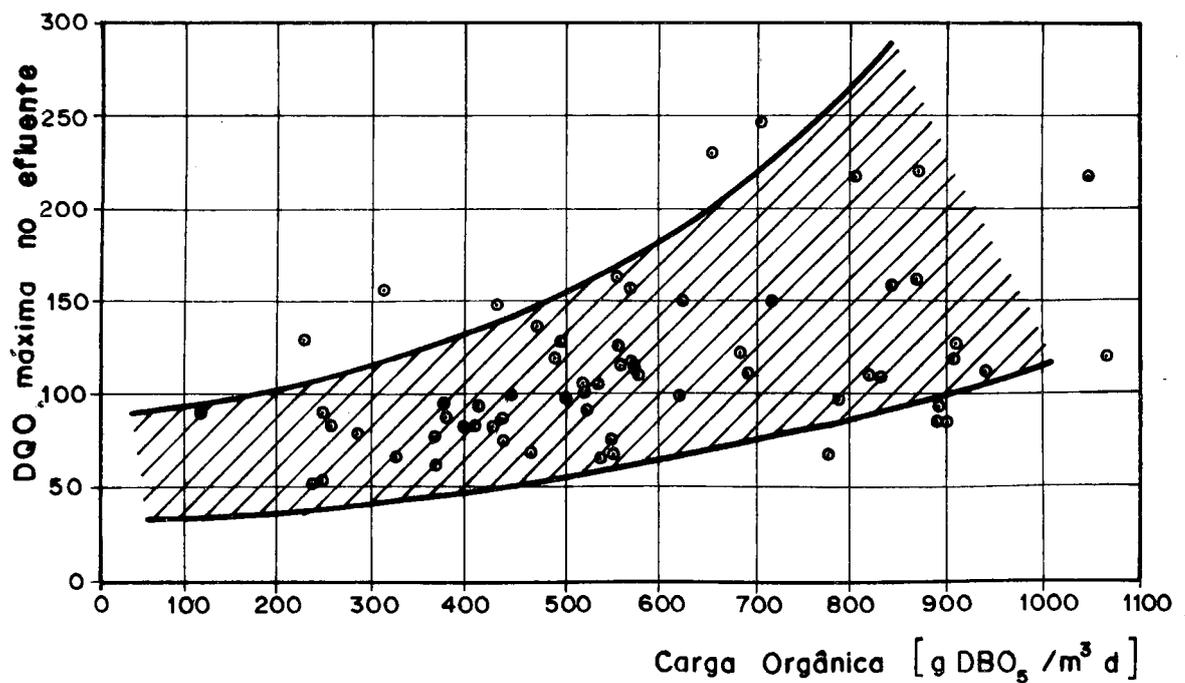


FIG. 2.6 - A DQO máxima em efluente em relação á carga orgânica. (16)

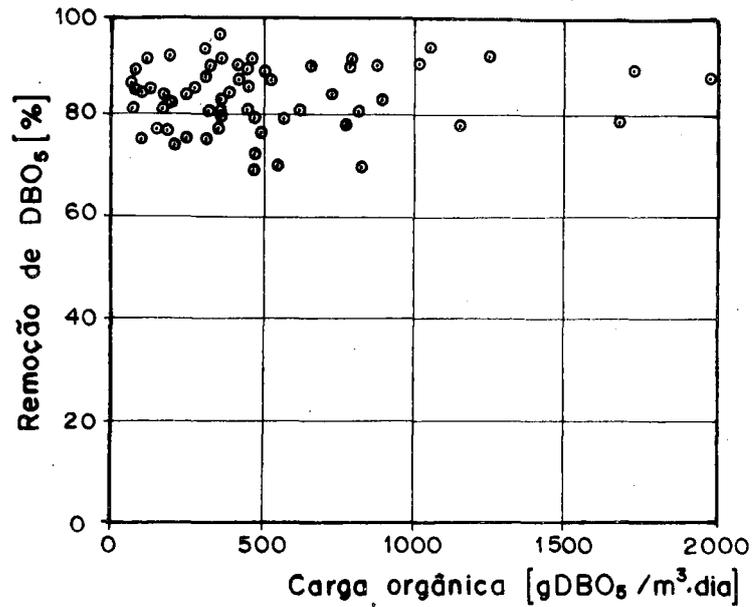


FIG. 2.7- Remoção de DBO em relação à carga orgânica.(25)

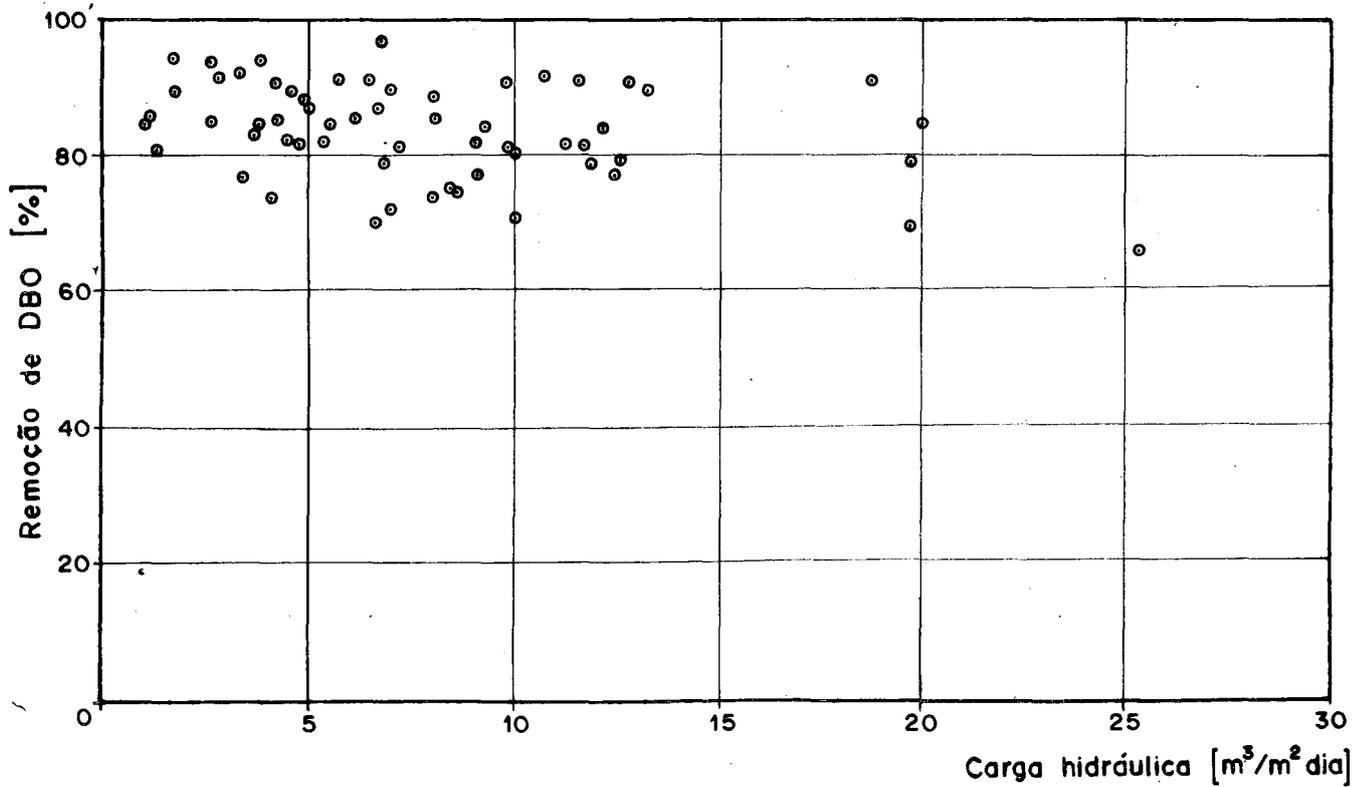


FIG. 2.8- Remoção de DBO em relação à carga hidráulica.(25)

2.4. Mecânica do processo de purificação dos esgotos

Vários pesquisadores tentam explicar o mecanismo da purificação dos esgotos nos Filtros Biológicos. Nos últimos anos, tem havido um interesse considerável em desenvolver uma teoria para os Filtros Biológicos na esperança de ganhar um aprofundamento melhor nos fatores controladores que definam a capacidade e a limitação desse processo.

A redução de DBO em um Filtro Biológico pode ser considerada como três atividades simultâneas (20):

- 1 - A transferência do oxigênio da fase gasosa para e através do líquido para a colônia de bactérias da superfície do meio.
- 2 - A transferência dos componentes orgânicos da fase líquida para a colônia de bactérias da superfície do meio.
- 3 - A cinética das reações bioquímicas que reduzem a DBO do esgoto.

Modelos matemáticos com taxas de reações de primeira e segunda ordem tem sido desenvolvidos, bem como a combinação desses com o conceito de transporte de massa.

Ames, Behn e Collings (2), desenvolveram uma teoria em termos de coeficientes de transferência de massa, adsorção e crescimento cinético de 1ª. ordem para um suporte esférico. A solução desse modelo dá um projeto base em termos de quatro parâmetros a-

grupados que incluem variáveis, tais como: velocidade da reação, concentração de DBO, área de contato entre película biológica e líquido, coeficiente de transferência de massa e uma taxa de primeira ordem constante. O coeficiente de transferência de massa é composto de dois termos, um envolvendo resistência a adsorção e outro uma resistência a reação. Um parâmetro adicional que segue do conceito que transferência de massa do líquido para a película biológica é limitada pela distribuição equilibrada, é também descrito.

Atkinson, Busch and Dawkins (4), usaram um modelo de Filtro Biológico que consistia de um fluxo pelicular em contato com uma parede vertical. Eles desenvolveram uma descrição matemática usando um balanço de massa diferencial e cinética de 1ª ordem. A equação final obtida é, em essência, as relações empíricas obtidas por Howland (15) e reiterada por Schulze (28).

Maier, Behn e Gates (19), usaram um modelo físico simplificado, consistindo de uma superfície lisa e plana em forma de um plano inclinado para atender a finalidade do Filtro Biológico, que é a de permitir o contato do esgoto líquido (reagentes) com a película biológica (catalizador) seguida da assimilação pelos microrganismos. Foi usado um modelo matemático em forma de uma equação diferencial obtida de um balanço de massa sobre um volume de controle infinitesimal, baseado na reação de segunda ordem.

Em resumo suas investigações indicaram que:

- 1 - A transferência de massa limita a taxa de purificação do esgoto líquido em taxas de alimentação e concentração baixas.
- 2 - Pode-se aumentar a eficiência da remoção do material de esgoto dissolvido aumentando a taxa de transferência de massa da película líquida para a película biológica.

Atkinson e Howell (3) explicaram a complexidade do processo que tem lugar nos Filtros Biológicos. Eles desenvolveram um modelo teórico que explica as limitações de difusão em películas biológica e líquida incluindo a influência da espessura da camada biológica. Também no trabalho de Atkinson e Howell (3) encontra-se um resumo de suposições restritivas que foram feitas por vários pesquisadores para a formulação de modelos que descrevem o mecanismo e cinética de remoção de substrato.

A película biológica associada a película líquida pode ser apresentada como na figura 2.9. Ritmann e Mc Carty (26) tomaram para sua teoria um modelo heterogêneo de profundidade L_f e concentrações de bactérias X_f fixadas à superfície sólida. A maior parte do líquido vai na direção x , enquanto o substrato é transportado em direção e através da película no sentido z (fig. 2.9.b). O transporte de massa é representado por uma espessura "efetiva" L da qual ocorre o transporte por difusão molecular. O valor de L é definido como:

$$L = \frac{D}{k_m} \quad (2.24)$$

D = difusão molecular do substrato líquido $[L^2T^{-1}]$
 k_m = coeficiente de transporte de massa $[LT^{-1}]$

O fluxo do substrato (J) através da película de difusão é:

$$J = -AD \frac{\partial S}{\partial z} \quad (2.25)$$

J = fluxo do substrato $[MT^{-1}]$

A = área superficial normal a direção z $[L^2]$

S = concentração do substrato $[ML^{-3}]$

Dentro da película biológica a utilização do substrato pode ser descrita pela relação de Monod:

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} = - \frac{k S_f X_f}{K_s + S_f} \quad (2.26)$$

S_f = concentração do substrato na película biológica $[ML^{-3}]$

K_s = coeficiente da taxa do consumo médio $[ML^{-3}]$

k = valor máximo da taxa de utilização do substrato $[T^{-1}]$

X_f = concentração de bactérias $[ML^{-3}]$

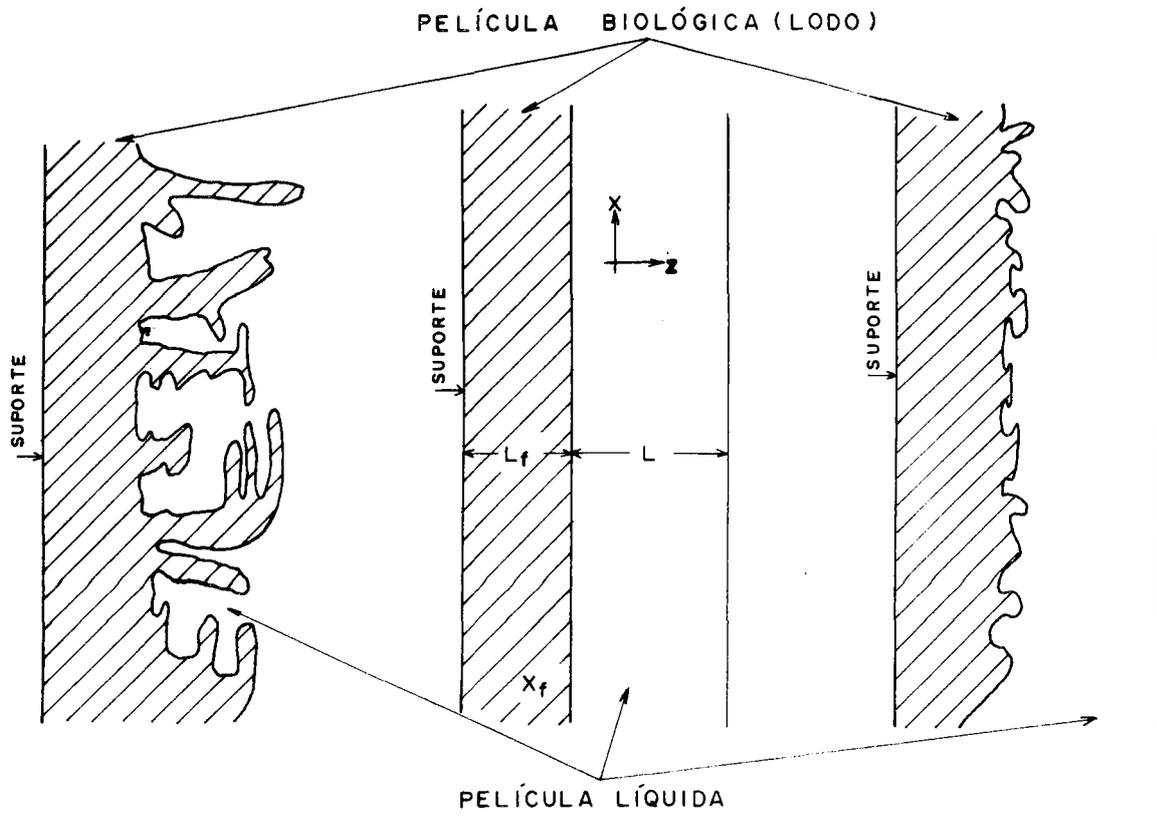
A difusão molecular em película pode ser apresentada como a segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 S_f}{\partial z^2} \quad (2.27)$$

onde D_f é difusividade molecular da película biológica L^2T^{-1}

Combinando equação 2.26 e 2.27 e supondo estado estável, $\partial S_f / \partial t = 0$, tem-se:

$$D_f \frac{\partial^2 S_f}{\partial z^2} = \frac{k S_f X_f}{K_s + S_f} \quad (2.28)$$



a) Modelo Pseudo Homogêneo b) Modelo Heterogêneo c) Híbrido

FIG. 2.9 – Natureza da interface líquido-“sólido”(37).

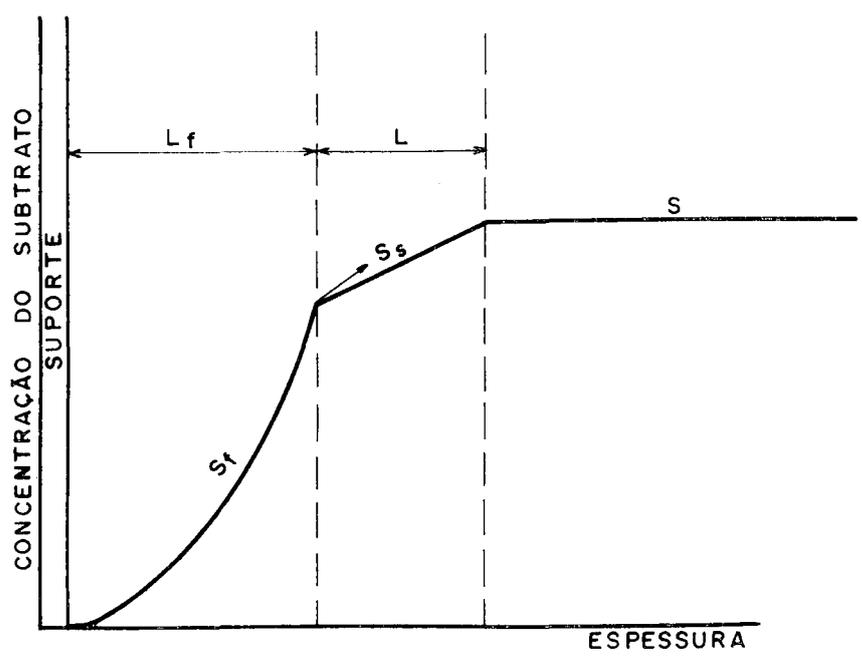


FIG. 2.10 – Perfil da mudança do substrato (37).

A figura 2.10 mostra como o perfil de concentração varia linearmente de S no volume líquido para S_s na interface película biológica - película líquida para S_f dentro da película biológica. Na película biológica próximo do suporte a concentração a aproxima-se de zero.

O objetivo da cinética da película biológica é fazer previsões do fluxo do substrato J do corpo do líquido para a película biológica. Desde que o gradiente de concentração é definido como linear na camada de difusão a equação (2.25) é simplificada para:

$$\frac{L}{A} = \frac{D (S - S_s)}{L} \quad (2.29)$$

Se S_s e L forem conhecidos pode ser calculado diretamente o valor do fluxo. Contudo, S_s não é conhecido a priori, e ele não pode ser obtido pela solução da equação (2.28), que é não linear e dependente de condições de contorno.

Ritmann e Mc Carty (26) propuseram uma solução através de um modelo de ordem variável para descrever a cinética da remoção do substrato. Explicam que esse modelo não tem limite e tem aplicação geral, contudo muitas variáveis incluídas neste modelo não podem ser diretamente determinadas e por isso ele tem uma aplicação prática limitada.

Para explicar quando o transporte de massa ou oxigênio são fatores limites Owen e Willianson (23) mostraram como po

de ser limitado o fluxo do doador e do receptor de elétrons por difusão dentro da película.

Os limites de fluxo foram expresso por Owen e Willianson (23) quando mantido a seguinte desigualdade:

$$So_a < \gamma \frac{D_{wd}}{D_{wa}} \quad (2.30)$$

So_a = concentração do receptor de elétrons (mg/l)

Sod = concentração do doador de elétrons (mg/l)

γ = constante estequiométrica da reação, definida como relação entre a massa dos receptores e da massa dos doadores de elétrons (mg/mg)

D_{wd} = coeficientes de difusão do doador de elétrons (cm²/dia)

D_{wa} = coeficiente de difusão do receptor de elétrons (cm²/dia)

Os limites da taxa das reações bioquímicas foram representados com a desigualdade abaixo:

$$So_a < \frac{k_a}{k_d} Sod \quad (2.31)$$

k_a e k_d = coeficiente da velocidade média das reações bioquímicas da equação de Monod, respectivamente do receptor e doador de elétrons (mg/cm³)

Se considerarmos o símbolo de desigualdade como nas equações 2.30 e 2.31 a concentração do oxigênio (receptor de elétrons) seria o fator limite. Se o símbolo da desigualdade for o reverso, as substâncias orgânicas (doadores de elétrons) seriam o fator limite.

Os resultados experimentais de Owen e Willianson (23) para concentração de oxigênio de 2; 5,0; 9,2 e 44 mg/l em base na teoria acima sugerem que a concentração de oxigênio é fator limitante da remoção do substrato.

Outros pesquisadores também sugeriram o oxigênio como fator limitante: Mehta, Davis e Kingsbury (20) em seu modelo descrevem que o processo de adsorção do O_2 dentro do filtro biológico é pressupostamente representada por uma película de líquido descendente, com um perfil parabólico de velocidade (2.11).

A transferência de massa do oxigênio por força de convecção pode-se apresentar como abaixo:

$$V_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_L \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (2.32)$$

V_z = velocidade no sentido z

C_A = concentração do componente A

D_L = coeficiente de difusão no líquido

z, x = coordenadas

Aumentando z o estado permanente será atingido quando:

$$\frac{\partial C_A}{\partial z} = 0 \quad (2.33)$$

Combinando com a equação (2.32)

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = 0 \quad (2.34)$$

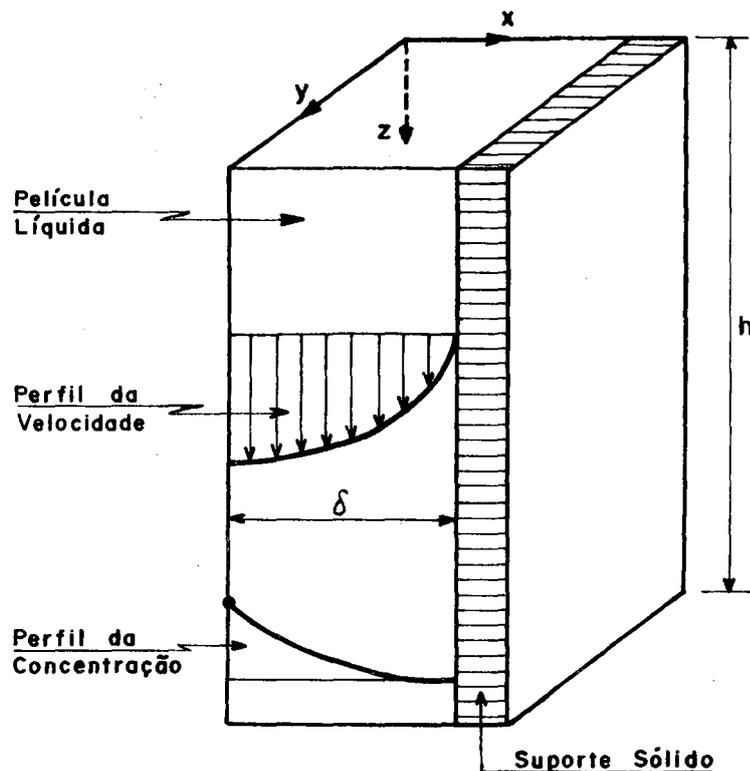


FIG. 2.11 - Perfil de velocidade e de concentração do oxigênio dentro de uma película descedente de líquido (20)

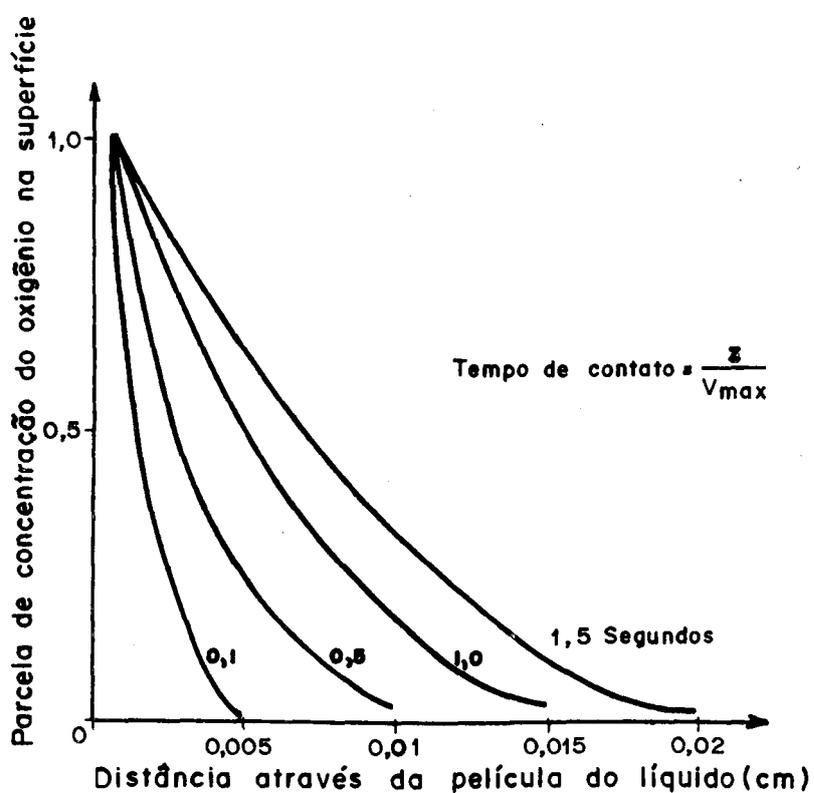


FIG. 2.12 - Perfis da concentração de oxigênio para vários tempos de contato (20)

o que significa que a concentração de C_A pode ser apresentada como função direta da distância x (fig. 2.12).

Condições limites:

$$\text{com } x = 0, C_A = C_A^*$$

$$\text{com } x = \delta, C_A = 0$$

pode-se escrever:

$$C_A = C_A^* \left(1 - \frac{x}{\delta} \right) \quad (2.35)$$

C_A^* = concentração de oxigênio na interface líquido-gás

δ = espessura da película

A concentração média do oxigênio pode ser calculada fazendo-se a média da distância de $x = 0$ até $x = \delta$, levando em conta o perfil da velocidade de uma forma simplificada como segue:

$$C_A = \frac{5}{8} C_A^* \quad (2.36)$$

Os autores (20) concluíram que uma concentração de oxigênio em efluentes abaixo dos valores dados pela equação (2.32) significa o uso total de oxigênio disponível para as reações bioquímicas.

2.5. Influência da temperatura

A elevação da temperatura produz estimulação das atividades biológicas resultando em consumo de oxigênio.

Muitos autores levaram em conta a variável temperatura como fator decisivo no dimensionamento dos Filtros Biológicos.

Velz (35) afirmou que, se a temperatura decresce, a carga orgânica diária aplicada ao filtro deve ser reduzida de acordo com o valor da taxa logarítmica de oxidação biológica na temperatura T.

$$k_T = k_{20} \times 1,047^{T-20}$$

Essa relação matemática na literatura é dada como:

$$k_T = k_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \theta^{(T-20)}$$

O valor do coeficiente de influência de temperatura θ , é, segundo Howland (15) igual a 1,035 e segundo Moodil e Greenfield (21) 1,030.

Maier, Behn e Gates (19) estudaram os efeitos da temperatura na remoção do substrato mediante o uso de um modelo simplificado de filtro biológico. Como substrato foi utilizado uma solução de glicose com outros componentes. Os efeitos da temperatura foram avaliados a 10,6°C e 37,3°C e três níveis de teor de glicose. Os resultados estão compilados na figura 2.13.

A remoção da glicose para a temperatura 10,6°C e taxa de aplicação de 600 ml/10 min foi respectivamente 3,2, 6,4 e 8,8. Os valores para a temperatura 37,3°C foram 3,9, 11,2 e 18,1.

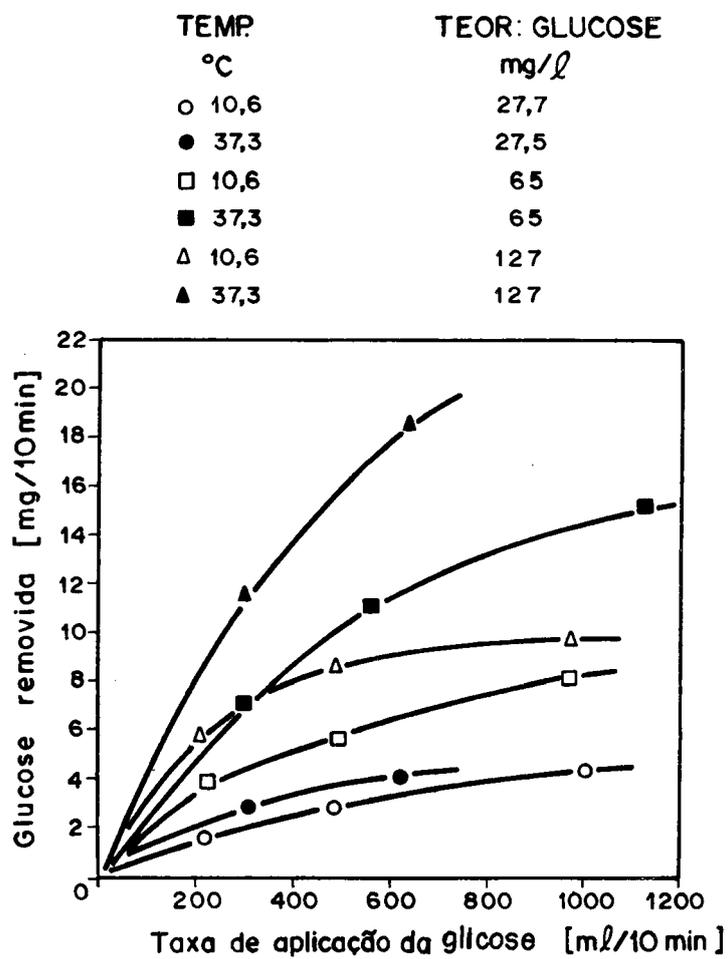


FIG. 2.13 - Efeitos da temperatura sobre a remoção do substrato (19)

Com isso ficou demonstrado que aumentando a temperatura há um aumento na remoção da glicose. Mostra também que o efeito da temperatura é maior para conteúdos altos de glicose.

Com base nesses resultados os autores (19) sugerem que a transferência de massa é o fator limite na remoção de substrato em conteúdos de glicose baixo e menos pronunciada com conteúdo de glicose mais alto.

Há de se observar que a solução de glicose preparada em laboratório foi sempre bem aerada e a concentração do oxigênio no efluente em ambas as temperaturas foi em torno de 5,9 e 6,3 mg O_2/l .

No levantamento dos Filtros Biológicos do Estado do Rio Grande do Sul e estudo em escala piloto de Filtro Biológico realizado por Jan Suschka e Alda Corrêa (33) foi encontrada uma diminuição da remoção de DBO_5 com o aumento da temperatura fig. 2.15 e 2.19. Nas figuras 2.16 e 2.17 é mostrado o efeito da temperatura sobre a concentração do oxigênio no efluente e nas figuras 2.18 e 2.14 a correlação entre a concentração do oxigênio e a remoção de DBO_5 .

Com base nesses resultados os autores (33) concluíram que o oxigênio era o fator limitante na remoção do substrato. O reforço a sua afirmativa é de que os esgotos tratados em todos os casos eram de tanque IMHOFF, com concentrações de oxigênio próxi-

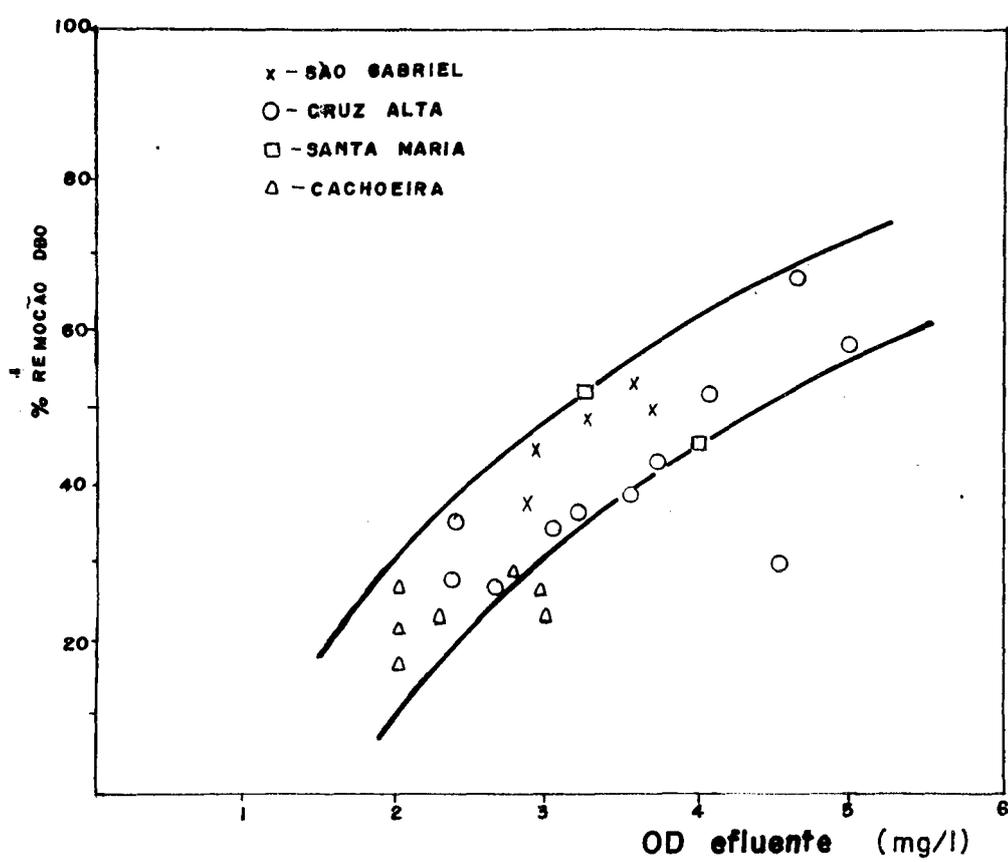


Fig.2.14-Relação entre a concentração de OD e a remoção de DBO_5 (33)

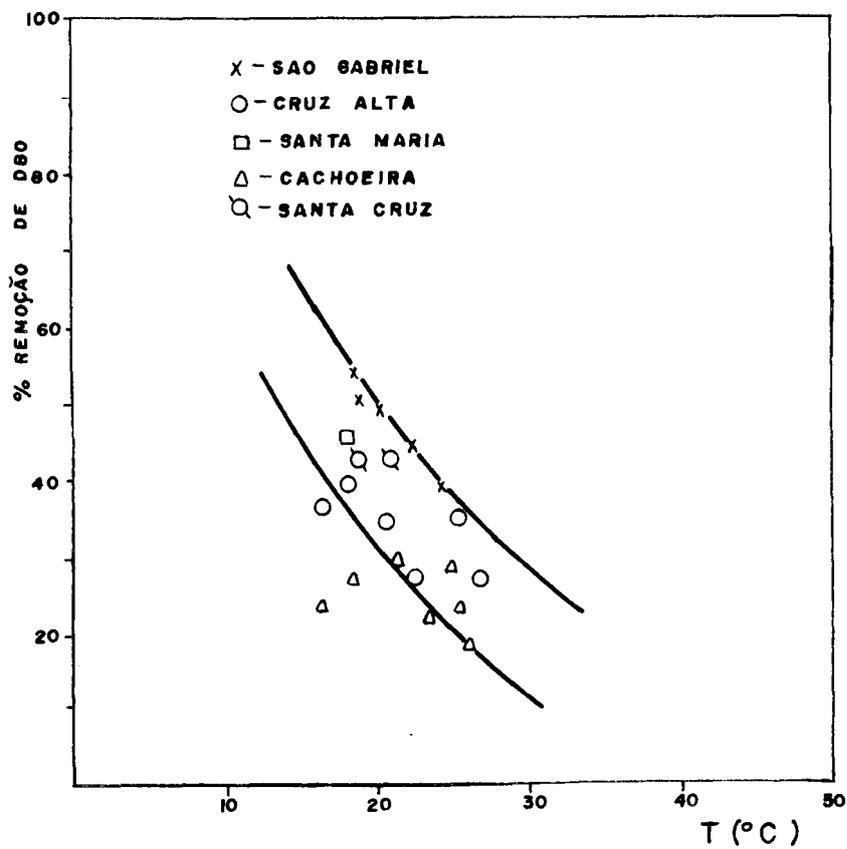


Fig.2.15-Efeitos da temperatura sobre a remoção de DBO_5 (33)

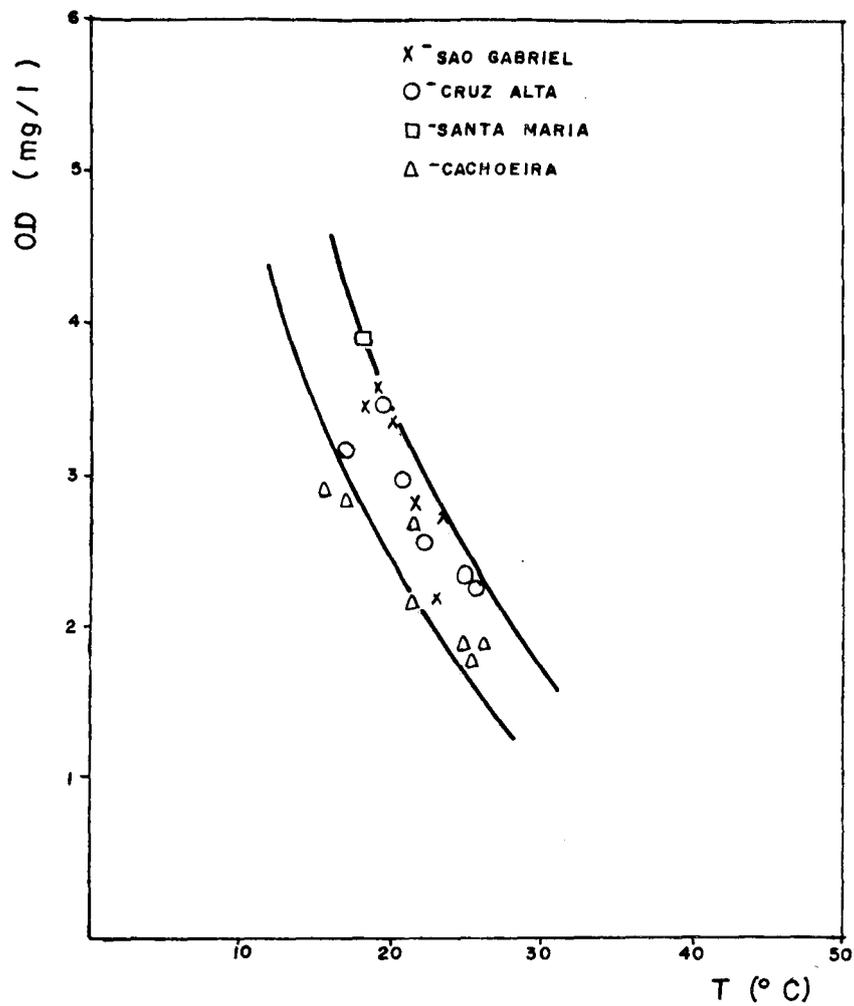


Fig.2.16- Efeito da temperatura na concentração de OD efluente (33)

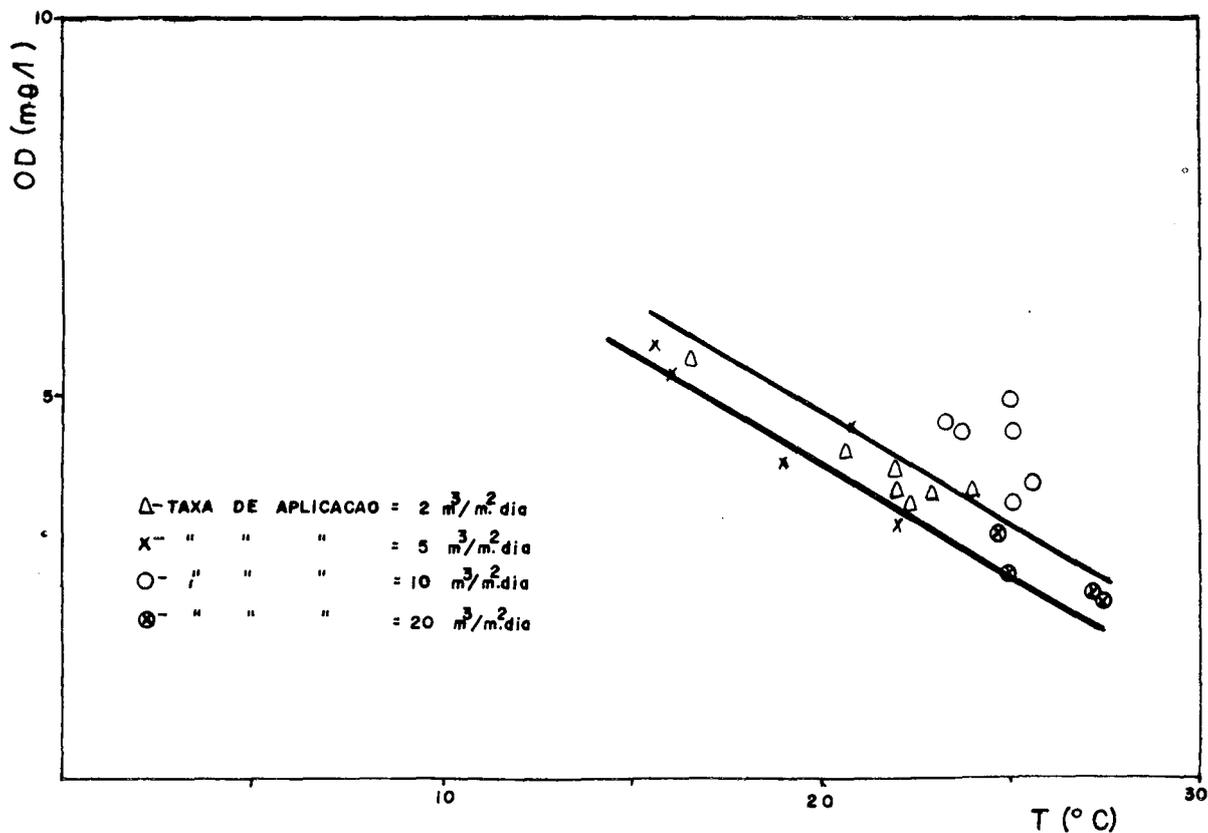


Fig.2.17 - Efeito da temperatura na concentração de OD efluente em escala piloto (33)

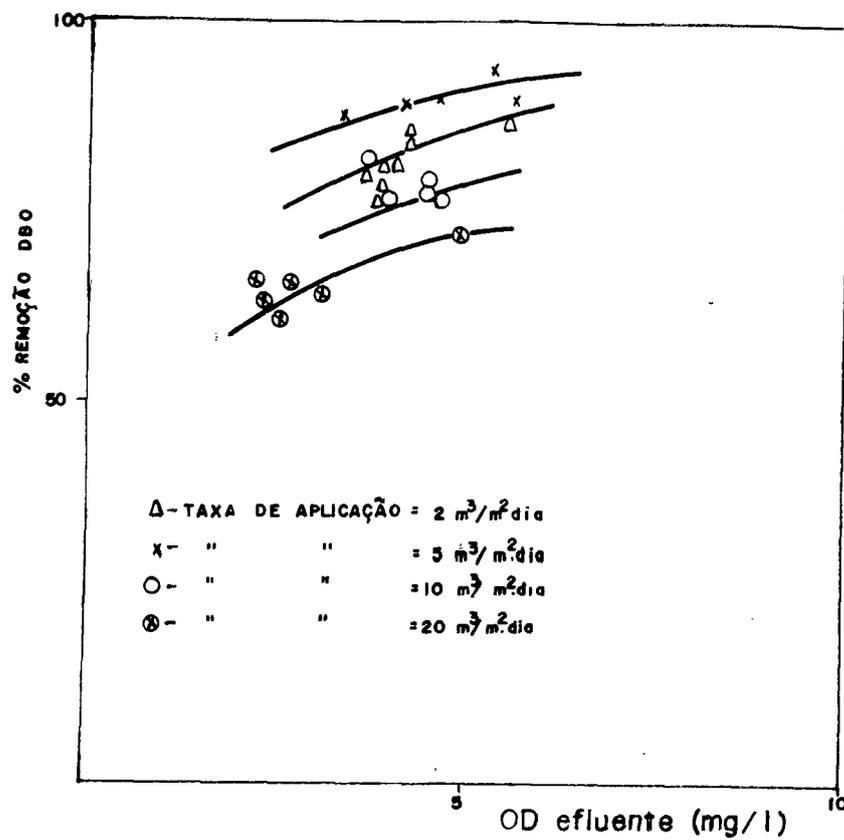


Fig.2.18 - Relação entre concentração de OD e remoção de DBO (33)

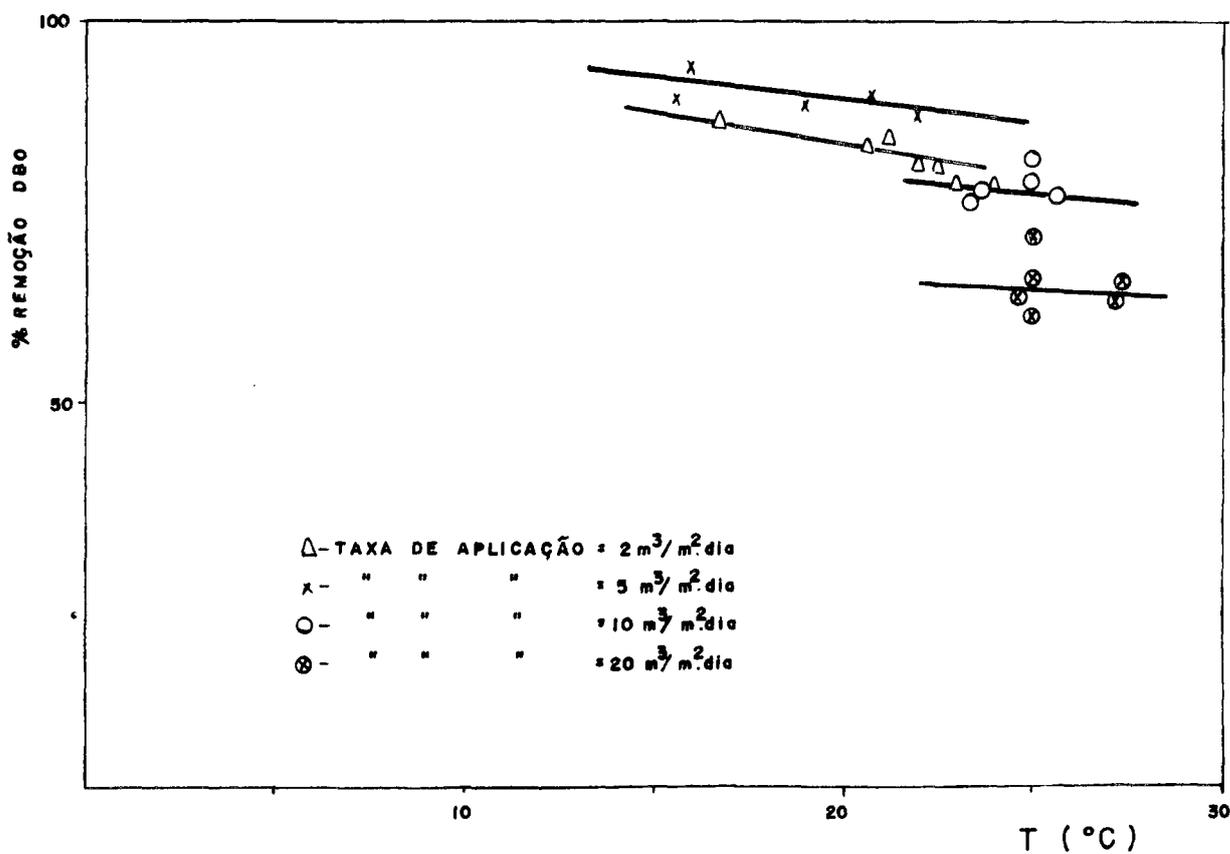


Fig.2.19 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO (33) em escala piloto

mo a zero, além do que contém produtos reduzidos como sulfetos e nitrogênio amoniacal. Sugerindo que em climas tropicais esses esgotos fossem aerados antes da alimentação do filtro.

Shulze (27) apresentou uma curva teórica, fig. 2.20, onde demonstra que a eficiência na remoção de DBO aumenta com o aumento da temperatura.

Galler e Gotaas (10) consideraram a temperatura como tendo um efeito significativo sobre a remoção da DBO. Devido a atividade dos microrganismos associada com o tratamento de esgoto decrescer com o decrescimento da temperatura, foi a temperatura na sua análise de regressão considerada como um importante fator no desempenho do filtro.

2.6. Influência da Recirculação

A taxa de recirculação é expressa através da seguinte relação:

$$r = \frac{v}{i}$$

r = taxa de recirculação

v = vazão do esgoto recirculado

i = vazão do esgoto afluyente

O número médio de vezes que a matéria orgânica disponível passa pelo filtro é chamada de fator de recirculação, sendo expresso da seguinte maneira:

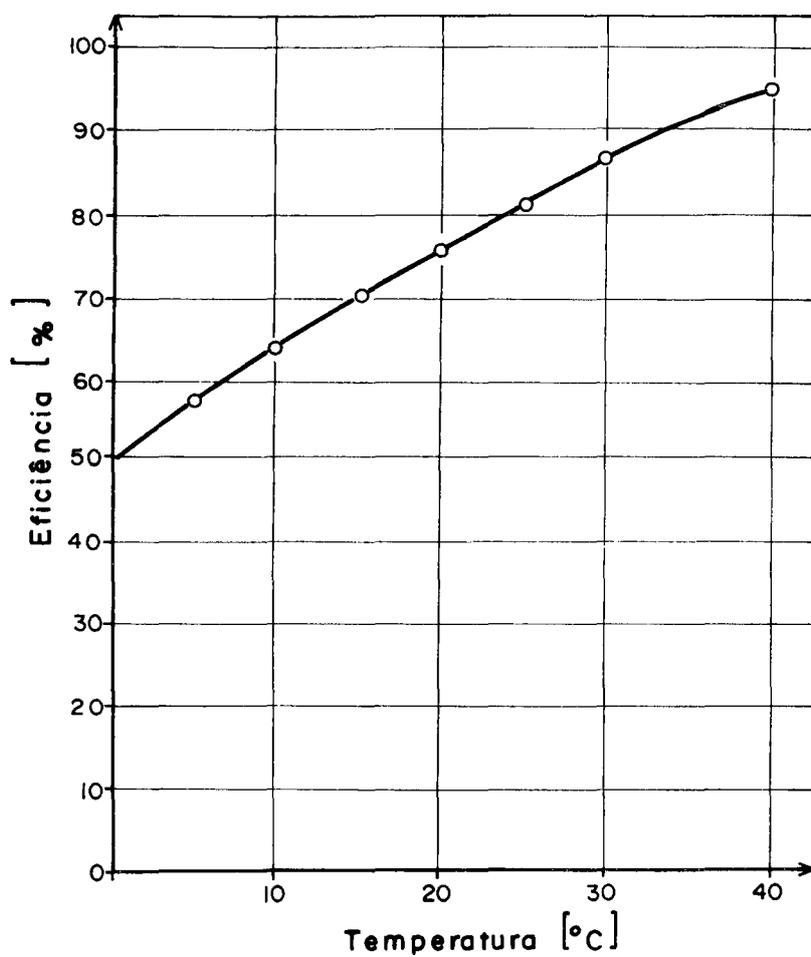


FIG. 2.20 - Curva teórica para efeito da temperatura sobre um filtro de 1,80m de altura com carga de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia (27).

$$F = \frac{1 + r}{(1 + 0,10 r)^2}$$

r	Nº de vezes que uma partícula de água passa	F
0	1,0	1,00
0,5	1,5	1,30
0,7	1,7	1,65
1,5	2,5	1,88
2,0	3,0	2,09
2,5	3,5	2,31
3,0	4,0	2,51

O fator de recirculação aumenta com a taxa de recirculação até um máximo ser obtido. Esse máximo valor é obtido quando $r = 8$.

A recirculação é usada geralmente para os filtros biológicos de capacidade intermediária e alta. Segundo Suschka (32) a recirculação pode ter os seguintes efeitos.

- elevação da taxa hidráulica até onde se faz necessária;
- diminuição da concentração do substrato afluente;
- intensificação da aeração dos filtros biológicos;
- diminuição da altura necessária;
- correção do pH dos esgotos.

Segundo Jordão (18) as vantagens proporcionadas pela recirculação são;

- a matéria orgânica recirculada é portadora de material ativado no filtro por mais de uma vez. Isso aumenta o tempo de contato e semeia o filtro completamente, ao longo de sua profundidade, com uma variedade de organismos.

- quando a vazão recirculada passa através do decantador, amortece as variações de carga aplicada ao filtro, e tem um papel diluente.

- a recirculação através do decantador primário tende a tornar o esgoto mais fresco e reduz a formação de espuma.

- a recirculação diminui as possibilidades de acúmulo de esgoto e colmatação do filtro

- os problemas de odor desagradável são minimizados.

Alguns autores têm criticado os efeitos positivos da recirculação.

Shulze (28) diz que a intenção de diluir os esgotos aplicados ao filtro com recirculação, não traz os benefícios desejados pois há aumento da carga hidráulica. Aumentando a carga hidráulica há uma diminuição da eficiência em termos de DBO_5 removida. Similar conclusão foi alcançada por Howland (15) no estudo desse problema.

Mehta e outros (20) concluíram que haverá um percentual quase constante de remoção DBO igual a uma carga crítica sendo que neste nível crítico ter-se-ia a máxima transferência

de oxigênio. Logo, o reciclo do efluente tem pequeno efeito na remoção de DBO. Mehta (20) cita outros dois autores Chpperfield e Germain que concluem também que "recirculação do efluente do filtro não tem efeito significativo na remoção de DBO".

Galler e Gotaas (10) na sua análise de regressão encontraram que recirculação tem um efeito significativo na remoção da DBO. Contudo observaram que aumentando a taxa de recirculação além de 4 não há efeito benéfico na remoção de DBO. Pelo seu estudo concluíram que a recirculação ótima e econômica é bem abaixo desse limite. Isso está em concordância com a informação do NRC.

Os autores (34), sob a quantidade a ser recirculada dizem: a faixa de recirculação para filtros a baixa taxa é de 0 a 50% e a alta taxa de 25% a 300%, e também que a seleção da quantidade de reciclo, e ajuste do fluxo recirculado dependerá da decisão econômica e do projetista sendo compatível com os benefícios desejados.

2.7. Tempo de Detenção

O tempo de detenção também chamado de tempo de residência, tempo de contato ou tempo de percolação é o tempo que uma partícula afluyente leva para atravessar o filtro biológico (24).

Ele tem sido medido por meio de isótopos radioativos na Alemanha e varia de 10 minutos a 2 horas conforme a taxa de aplicação e altura do meio (14).

Imhoff (17), declara que o tempo de detenção varia segundo a taxa de aplicação, estando situado entre 20 e 60 minutos. O tempo de detenção é considerado aquele que é necessário para que seja encontrado no efluente metade da quantidade de traçador adicionado ao afluente do filtro biológico.

Eckenfelder e Barnhart (9) verificaram o efeito da superfície específica sobre o tempo de detenção, concluindo que o tempo de detenção aumenta com o aumento da superfície específica do meio percolador. Também a taxa de aplicação afeta o tempo de detenção no sentido de diminuí-lo com o aumento da mesma.

A presença da camada biológica no leito percolador influencia a relação tempo de detenção-taxa de aplicação.

Howland mostrou que o tempo de detenção aumentou em torno de 50% quando na presença de camada biológica. Esse aumento no tempo de detenção foi menor quando em altas taxas (9).

Craft e Ingols (7) fizeram 2 testes de tempo de detenção em um filtro. No primeiro teste o filtro biológico estava obstruído por uma massa gelatinosa e não havia nenhuma redução de DBO. No segundo teste o filtro estava operando normalmente com redução de DBO em torno de 50 a 60%. Em ambos os testes encontrou a máxima concentração do traçador no efluente após 5 minutos da sua adição no afluente. O formato da curva também foi semelhante. Devido a esses resultados concluíram que a atividade biológica não

era controlada pelo tempo de detenção que foi o mesmo em cada teste. A ausência da atividade biológica (medida pela redução da DBO) resultou ou da insuficiência de oxigênio ou do limitado número de biota presente na pequena área de contato no líquido.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Etapas de Estudo

A fase experimental foi realizada em duas etapas, conforme abaixo:

- 1a. etapa: Pré-aeração
- 2a. etapa: Recirculação

A 1a. etapa consistiu em aerar o esgoto, proveniente do decantador-digestor antes da alimentação do filtro. Teve por objetivo avaliar a remoção da matéria orgânica (DBO, DQO), bem como o efeito da temperatura sobre essa remoção. Foram utilizadas nessa etapa quatro taxas de aplicação.

Na 2a. etapa o esgoto que alimentou o filtro foi proveniente do decantador-digestor mais o esgoto recirculado do decantador secundário piloto. O objetivo foi verificar o efeito da recirculação sobre o desempenho do filtro na remoção da matéria orgânica. O efeito da temperatura foi também avaliado. Foram utilizadas três taxas de aplicação e duas taxas de recirculação.

As experiências na coluna piloto possibilitaram a obtenção de informações sobre: 1) tempo de detenção; 2) comparação do desempenho com e sem a recirculação para a mesma taxa de aplicação; 3) avaliação das fórmulas de dimensionamento; 4) efeito do aumento da taxa de recirculação.

3.2. Descrição do Modelo

3.2.1. Considerações gerais

O Filtro Biológico piloto foi construído na ETE da vila IAPI, pertencente ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) em Porto Alegre.

Para a coluna foram usados tubos de concreto com 1 m de diâmetro interno dispostos verticalmente com altura de 4 m.

Como leito suporte utilizou-se fragmentos de tijolos cerâmicos (tipo 21 furos), sustentados por vigas de concreto armado de 10 cm de largura e 7 cm de altura.

A distribuição do esgoto sobre a camada suporte foi feita através de um gradeado de madeira de forma circular com um disco central, logo abaixo da alimentação.

O esquema de tratamento das etapas 1 e 2 é apresentado nas figuras 3.1 e 3.2.

3.2.2. Pré-aeração

O esgoto derivado da canaleta de saída do decantador primário fluia de forma contínua para um reservatório 250 l de capacidade nominal, colocado acima do filtro biológico piloto (fig. (3.3)). No interior desse reservatório processava-se a aeração.

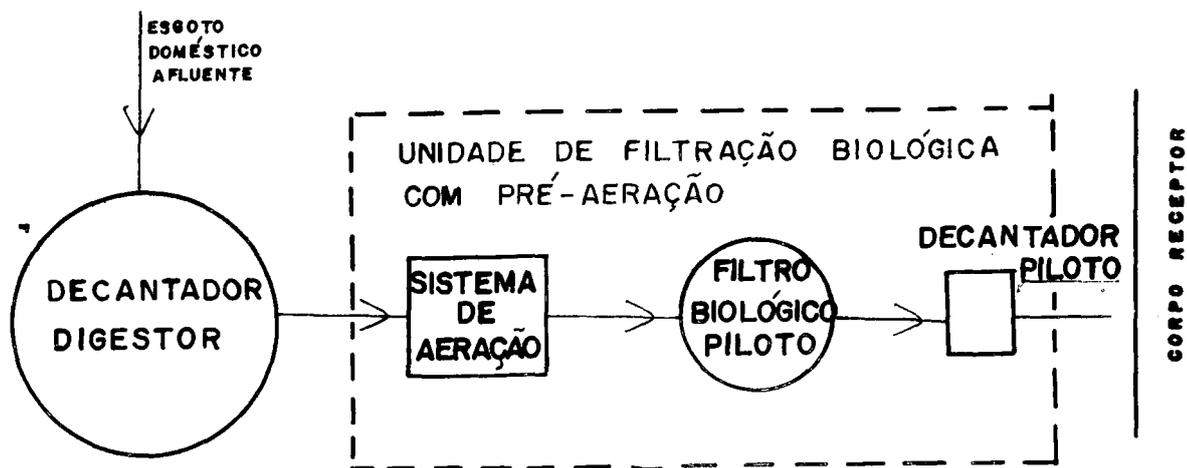


Fig.3.1- Esqema do sistema de tratamento com pré-aeração

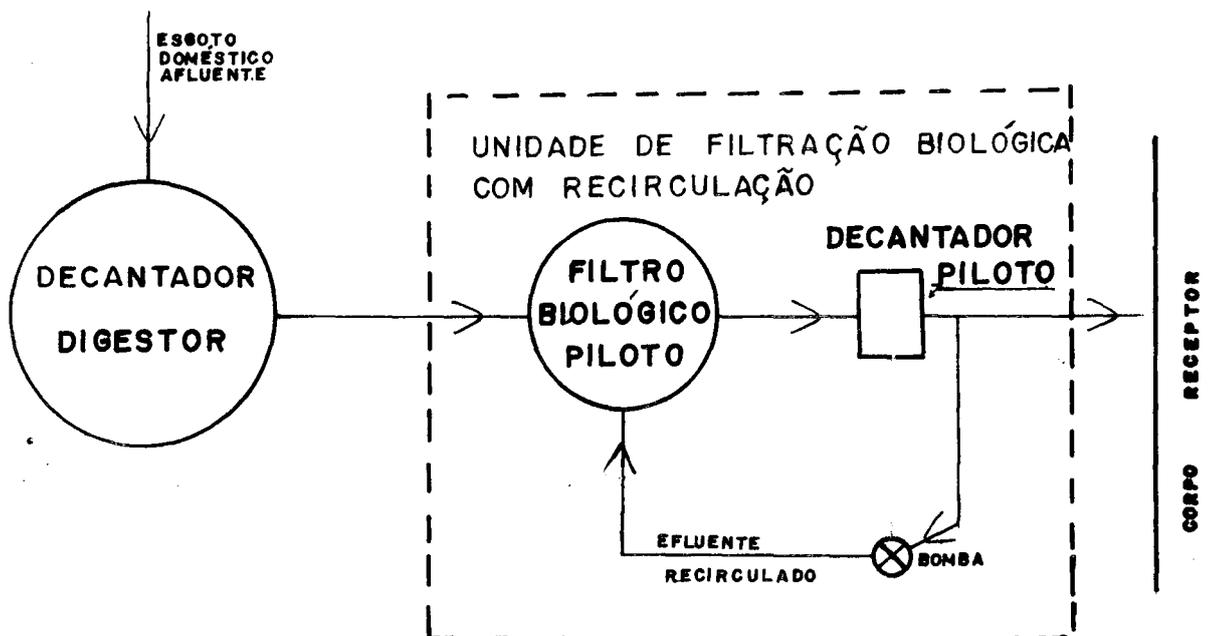


Fig.3.2 - Esquema do sistema de tratamento com recirculação

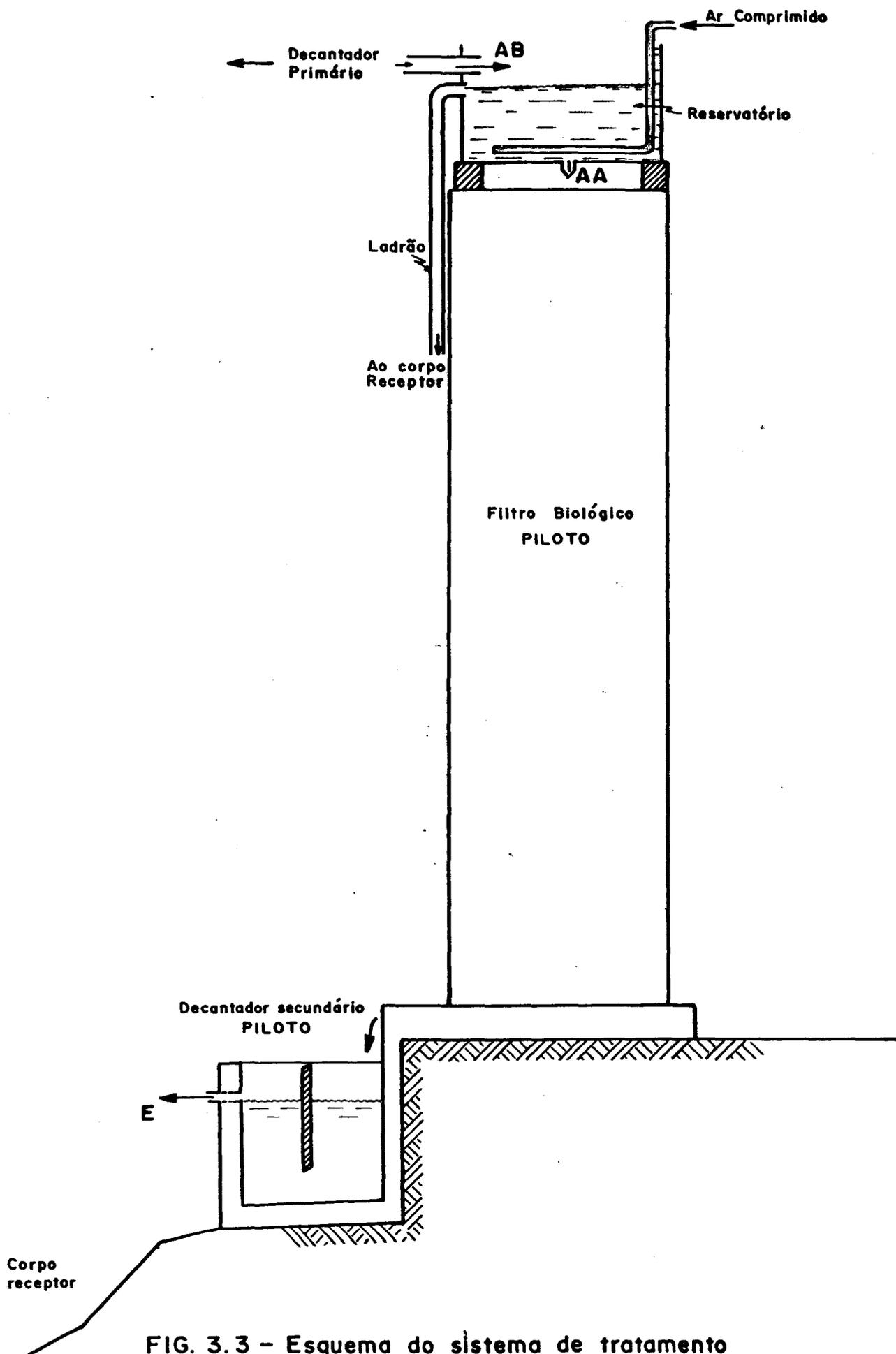


FIG. 3.3 - Esquema do sistema de tratamento com pré-aeração

O sistema de aeração era constituído por 2 tubos de PVC de diâmetro de 12,4 mm com furos em torno de 2 mm a cada 10 cm, colocado próximo ao fundo do reservatório.

O ar para a unidade de aeração foi fornecido por um compressor tipo pistão de 7,5 hp e introduzido no sistema pela conexão de uma mangueira plástica ao tubo de PVC. Para controle da vazão de ar aduzida foi utilizado um rotâmetro conectado à respectiva tubulação.

A aeração visou apenas elevar o nível de oxigênio do esgoto proveniente do decantador primário.

3.2.3. Recirculação

A coluna piloto com o sistema de recirculação está apresentado na figura 3.4.

O reservatório superior ao filtro foi mantido com a finalidade de manter um nível constante do esgoto.

O efluente do filtro biológico foi bombeado de forma contínua para o disco central do gradeamento da distribuição da coluna piloto por uma bomba centrífuga Schneider modelo BC-25, 1/3 CV, a uma vazão de acordo com a taxa de recirculação desejada.

A canalização de sucção de 20 mm de diâmetro foi colocada no decantador secundário (em escala piloto). Na canalização de recalque de 15 mm foi colocado um rotâmetro para o controle da vazão recirculada.

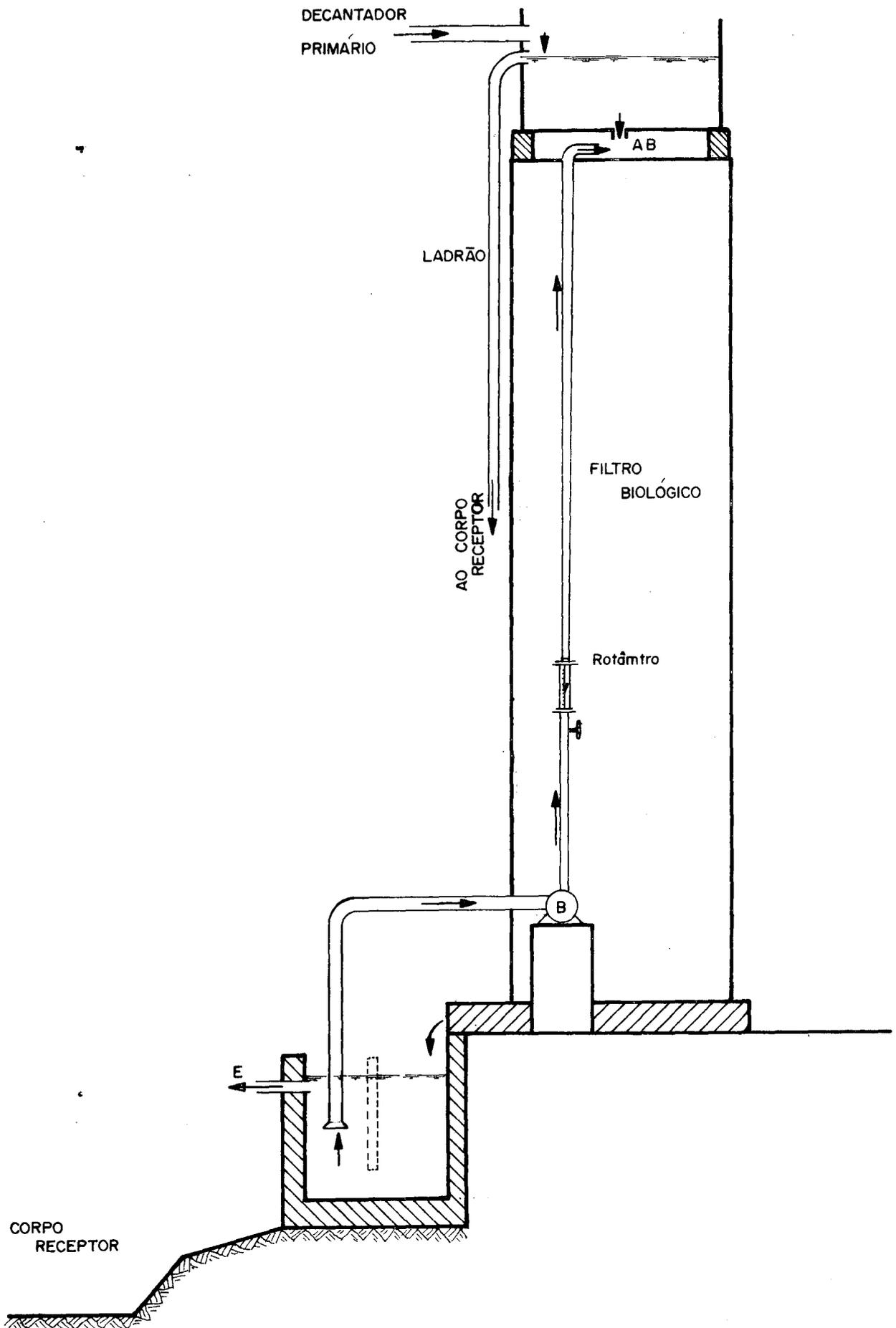


FIG.3.4 - Esquema do sistema de tratamento - com reciculação.

3.3. Metodologia

3.3.1. Operação do filtro biológico piloto

A operação do filtro foi de forma contínua de modo que para cada mudança na taxa de aplicação ou de recirculação o ciclo operacional ficasse em torno de 5 semanas. Com isso permitia-se a aclimatação do leito bem como ter-se-ia um número considerável de ensaios para a posterior análise.

O modelo experimental foi operado em duas etapas como já mencionamos anteriormente (item 3.1) e os períodos dos ensaios para cada taxa de aplicação e recirculação pode ser resumido nos quadros a seguir.

1a. etapa: Com pré-aeração

Taxa de Aplicação (m^3/m^2 dia)	5	10	20	2
Ciclo operacional	10/09 a 21/10/81	31/10 a 21/11/81	23/11 a 22/12/81	09/01 a 15/02/82

2a. etapa: Com recirculação

Taxa de Aplicação (m^3/m^2 dia)	20	20	10	10	5	5
Taxa de recirculação	0,70	1,50	1,50	0,70	1,50	0,70
Ciclo operacional	02/03 a 08/04/82	12/04 a 14/05/82	17/05 a 19/06/82	21/06 a 24/07/82	26/07 a 27/08/82	30/08 03/10/82

As taxas de aplicação adotadas estão dentro das faixas correspondentes a filtros biológicos de baixa a alta capacidade (24, 32).

As amostras para análise foram coletadas em geral entre as 7 e 8 horas.

A amostragem constou da retirada de amostra do afluente e do efluente conforme segue:

Na etapa 1:

- Amostra do esgoto bruto foi coletada na canalização proveniente do decantador primário que alimentava a unidade de aeração. Esse ponto foi denominado de AB.

- Amostra do esgoto aerado coletada na canalização que alimentava o filtro, situado na parte inferior do reservatório. Denominou-se esse ponto de AA.

- Amostra do efluente coletada na canalização de saída do decantador secundário (em escala piloto). Esse ponto foi chamado de E.

Na etapa 2:

- Amostra do afluente coletada na parte inferior do reservatório. Esse ponto foi chamado de AB.

- Amostra do efluente do decantador secundário. Ponto denominado de E.

3.3.2. Parâmetros Analisados

Na verificação do desempenho do filtro biológico foram realizadas coletas de amostras do afluente e efluente nos pontos estabelecidos.

Para o monitoramento do processo de tratamento foram feitas determinações de temperatura, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica dos esgotos, bem como a temperatura do ar e verificação da vazão afluente à coluna.

Para avaliar a eficiência do filtro piloto fez-se determinações da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) numa frequência que variou de acordo com a disponibilidade de equipamento do laboratório. A determinação da demanda química de oxigênio (DQO) foi realizada uma vez por semana e diariamente nas duas últimas semanas de um ciclo de operação (campanha intensiva).

Análises de alcalinidade e acidez dos esgotos foram realizadas 2 vezes na semana.

Determinações de nitrogênio total de Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal, nitratos, sólidos suspensos e dissolvidos, sulfetos, sulfatos, fosfatos, detergentes (ABS), metais como Cu, Pb e Zn e mais as descritas anteriormente foram determinados de amostras do afluente e efluente coletadas uma vez na semana.

Nas campanhas intensivas que se realizaram nas duas últimas semanas de um ciclo de operação com determinada taxa de apli

cação e/ou recirculação foram realizadas determinações de nitratos diariamente.

Os métodos empregados na determinação dos parâmetros analisados foram os seguintes:

a) Temperatura

A temperatura do ar foi determinada pelo uso de termômetro de mercúrio, colocado a uma distância de 2,0 m do solo.

A temperatura do líquido foi obtida pela introdução da sonda YSI 5739 com sensor de temperatura e essa lida na escala de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do mostrador do oxímetro, ao qual a sonda era acoplada.

b) pH

O pH das soluções a serem estudadas foi determinado pelo método eletrométrico descrito no "Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater" (31), seção 424. O aparelho usado foi um medidor de pH DIGI-SENSE MODELO 5985-20 fabricado pela Cole-Parmer Instrument Co. (EUA).

c) Oxigênio dissolvido

As medições do oxigênio dissolvido (OD) dos esgotos foi realizada pelo método do eletrodo e membrana descrito pelo "Standard Methods for the Examination Water and Wastewater (31), seção 422 F. O aparelho usado foi um oxímetro USI MODELO 57 e sonda MODELO-5739, fabricados pela Yellow Springs Instruments Co.

d) Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi obtida de acordo com o "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (31), seção 205. O aparelho usado foi condutivímetro YSI MODELO 33.

e) Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias)

O teste da demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) foi obtido pelo método de DBO manométrico de acordo com o manual de instruções da Hach Company (11).

f) Demanda Química de Oxigênio

A demanda química do oxigênio (DQO) do afluente e efluente foi medida pelo método colorimétrico usando um aparelho "Hach COD REACTOR MODELO 16500), e fabricado pela Hach Chemical Co. (EUA), de acordo com as instruções do manual "Hach Company - COD REACTOR - MODELO 16500" (12).

g) Nitrogênio Kjeldahl total (NTK)

O NTK foi obtido conforme prescreve o "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 421.

h) Nitrogênio Amoniacal

O nitrogênio amoniacal foi determinado pelo método acidimétrico conforme seção 418 D do "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31).

i) Nitratos

Os nitratos do afluente e efluente foi obtido pelo Método da Brucina. A medida é por método colorimétrico no comprimento

de onda de 410 nm. Usou-se um espectrofotômetro digital B 242, fabricado pela Micronal (Brasil).

j) Sólidos

Os sólidos totais das amostras afluente e efluente foram determinados segundo o "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 208. Os sólidos dissolvidos conforme prescreve a seção 208 C. A parte volátil dos respectivos sólidos foram obtidos pela secagem da amostra a 550°C conforme determina o "Standard Methods" em sua seção 208 E.

1) Fosfato total

O fosfato total foi determinado colorimetricamente, espectrofotômetro digital Micronal B-242 (Brasil), conforme prescreve o "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 425 C-III para a digestão preliminar e seção 425 E - Método do cloreto estânico.

m) Alquil Benzeno Sulfonato

A determinação do Alquil Benzeno Sulfonato (ABS) nos esgotos foi feita conforme descrito no "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 512 A, colorimetricamente pela leitura em espectrofotômetro digital Micronal B-242, Brasil.

n) Sulfetos

A determinação dos sulfetos foi realizada por método titulométrico do Iodo, seção 428 D do "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31).

o) Sulfatos

Os sulfatos presentes nos esgotos foi medido pelo método Turbidimétrico, usando um aparelho "Turbidimer modelo 2100 A" fabricado pela Hach Chemical Co. (USA), conforme descrito no "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 425 C.

p) Alcalinidade e Acidez

A alcalinidade e acidez foi obtida segundo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (31), seção 402 e 403, respectivamente, através de titulação potenciométrica. O aparelho usado foi um medidor de pH DIGI-SENSE, MODELO 5985-20 fabricado pela Cole-Parmer Instrument Co. (EUA).

q) Metais

A determinação de metais nos esgotos foi feita utilizando o método de espectrofotometria de absorção atômica descrito no "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 301 A. O aparelho usado foi um "Atomic Absorption Spectrophotometer - série AA-275", fabricado pela Varian Techtion Pty. Ltd. (Austrália).

A preparação das amostras para a determinação do Pb, Cu e Zn foi executada conforme prescreve o "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (31), seção 311, 308 e 323, respectivamente.

3.3.3. Determinação do Tempo de Detenção

A avaliação do tempo de detenção na coluna piloto foi

realizada para todas as taxas de aplicação e recirculação usando como afluente líquido o esgoto proveniente do decantador primário e em outra fase água de abastecimento.

A técnica envolveu o uso do Cloreto de Sódio no afluente ao filtro e a detecção da variação da condutividade elétrica ao longo do tempo produzida por ele no efluente.

Os equipamentos para a obtenção da curva da condutividade elétrica no tempo foram:

a) Condutivímetro com respectiva sonda YSI MODELO 33, fabricado pela Yellow Springs Instruments (EUA).

b) Registrador KIPP e ZONEN MODELO DB9-725E com papel de 25 cm de amplitude com velocidade de impressão ajustada para 1 cm/minuto.

O procedimento para a obtenção da curva de condutividade elétrica no tempo foi como descrevemos abaixo:

1 - Ajuste da taxa de aplicação desejada afluente a coluna piloto.

2 - Colocação do sensor da condutividade no efluente da coluna e ajuste do condutivímetro.

3 - Em um copo Becker preparou-se uma solução saturada de NaCl.

4 - Retirou-se uma porção de solução saturada e de uma só vez foi jogado no afluente e ao mesmo tempo marcava-se o início da curva no papel.

5 - A operação estava terminada quando o valor da condutividade elétrica voltava a ser igual a da etapa 4.

A figura 3.5 exemplifica uma das curvas obtida durante o teste. Nesse exemplo a taxa de aplicação é de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia sendo o afluente água de abastecimento.

Com a finalidade de avaliar a possível influência da película biológica presente no filtro no tempo de detenção, foram ob- tidos valores de tempo de detenção utilizando como afluente água de abastecimento. O teste foi realizado após dois meses de ter si- do encerrada a operação com a coluna piloto. Para assegurar a lim- peza do filtro foi ele lavado continuamente com água durante os dois dias anteriores a realização do teste. Os valores do tempo de detenção foi obtido conforme técnica descrita para o esgoto.

A obtenção do valor do tempo de detenção a partir da curva de condutividade no tempo obtida na fase experimental é con- forme segue:

- Segundo Cook e Katzserger (6) o tempo de detenção é o intervalo de tempo que inicia quando o traçador é injetado no flu- xo afluente ao filtro até a máxima concentração observada no fluxo efluente.

- Eckenfelder e Barnhart (9) definiram o tempo de deten- ção como o intervalo de tempo da injeção do traçador no afluente até o centro de gravidade da curva obtida.

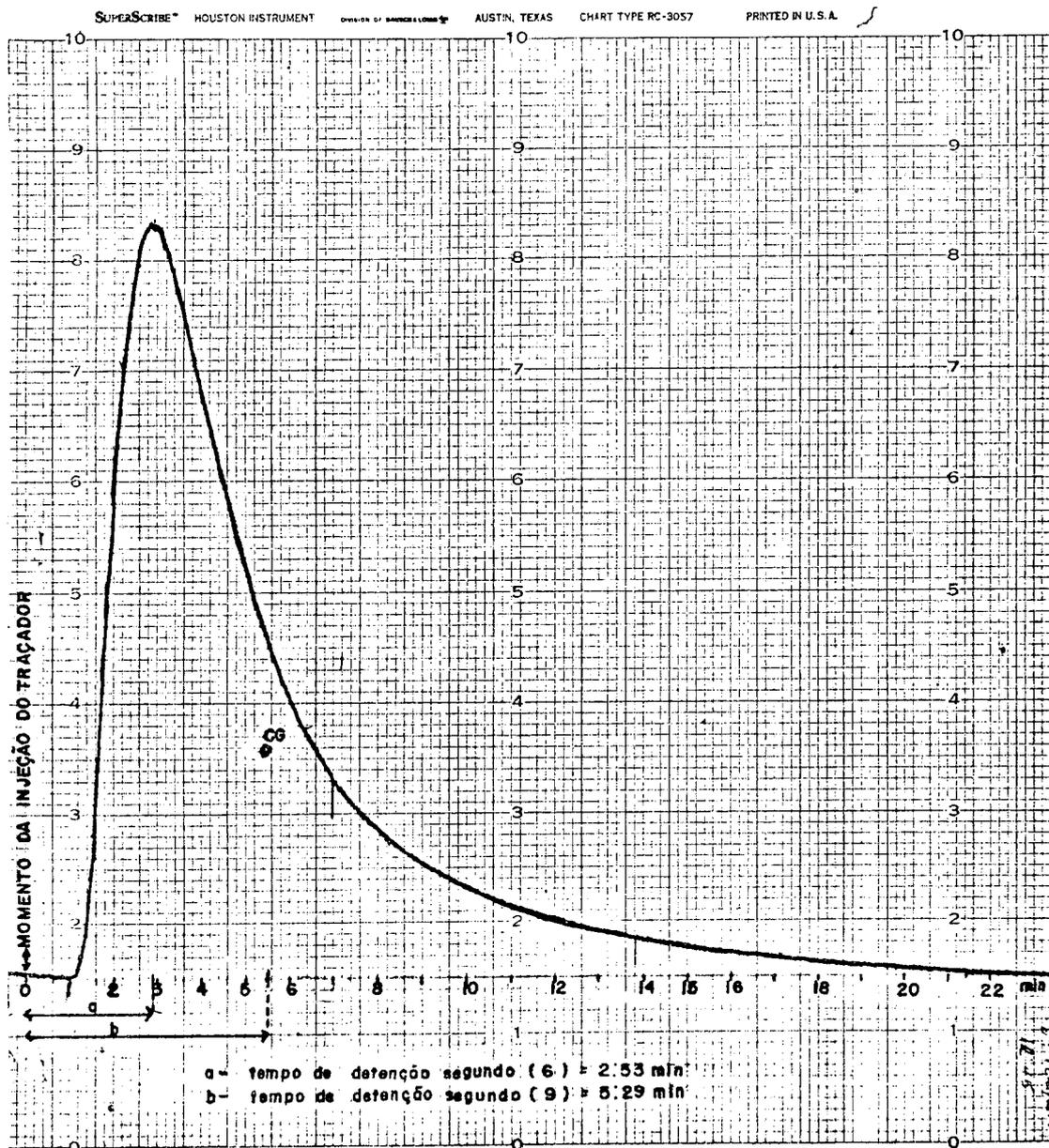


Fig. 3.5 - Curva da condutividade elétrica no tempo para obtenção do tempo de detenção

T. A = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$ afluyente = Água

- O tempo de detenção teórico segundo Howland (15) é proporcional a profundidade do filtro e inversamente proporcional a dois-terços da taxa de aplicação.

$$t = \frac{D}{Q^{2/3}}$$

t = tempo de detenção (minutos)

D = profundidade do filtro em pés

Q = taxa de aplicação

Os valores do tempo de detenção obtidos conforme os autores estão resumidos nos quadros 3.1 e 3.2.

1	2	3	4	
Taxa de aplicação (m^3/m^2 dia)	Taxa de recirculação	Tempo de detenção (minutos)	Tempo de detenção (minutos)	Tempo de detenção teórico (minutos)
2	0	7:24	15:06	7:53
5	0	5:30	10:09	4:17
5	0,70	2:42	8:06	3:00
5	1,50	2:18	7:00	2:19
10	0	3:42	7:24	2:41
10	0,70	2:18	6:12	1:53
10	1,50	2:06	5:36	1:27
20	0	1:33	4:09	1:41
20	0,70	1:30	4:36	1:11
20	1,50	1:18	5:21	0:55

Quadro 3.1 - Valores medidos do tempo de detenção na coluna experimental - afluente = esgoto

Coluna 3 - Tempo de detenção segundo Cook e Katzberger (6)

Coluna 4 - Tempo de detenção segundo Eckenfelder e Barnhart (9)

(1)	(2)	(3)	(4)
Taxa de aplicação (m ³ /m ² dia)	Taxa de recirculação	Tempo de detenção (minutos)	Tempo de detenção (minutos)
2	0	6:42	13:42
5	0	4:39	7:36
5	0,70	2:48	10:48
5	1,50	2:18	8:18
10	0	2:53	5:29
10	0,70	1:54	8:06
10	1,50	1:36	5:21
20	0	1:48	3:51
20	0,70	1:18	2:15
20	1,50	1:16	2:10

Quadro 3.2 - Valores medidos do tempo de detenção na coluna experimental - afluente: água

Coluna 3 - Tempo de detenção segundo Cook e Katzberger (6)

Coluna 4 - Tempo de detenção segundo Eckenfelder e Barnhart (9)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Com Pré-Aeração

Os valores obtidos da temperatura de ar e do líquido, oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio de Kjeldall (NTK), Nitrogênio Amoniacal (NH_3), Nitrato (NO_3), Detergentes (ABS), sulfatos (SO_4), sulfetos (S^-), sólidos e metais pesados foram compilados nos quadros I, II, III, IV (do apêndice 1), durante os vários períodos de operação correspondentes as taxas de aplicação 5, 10, 20 e $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia respectivamente.

Dos dados dos quadros I a IV foram construídas as figuras 4.1 a 4.4 que permitem a visualização da variação do pH, alcalinidade e acidez, condutividade elétrica, OD e temperatura ao longo do tempo de operação da coluna piloto.

Pela observação da figura 4.1 vê-se que a aeração provocou sempre um aumento do pH devido a remoção do dióxido de carbono do líquido. Para as taxas de aplicação 2, 5 e $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, na grande maioria dos dias observados, o efluente apresentou um pH inferior ao afluente do filtro. Para a maior taxa de aplicação observa-se o pH do efluente maior que o afluente pré-aerado. Segundo Walter (36), toda vez que esgoto com pH alcalino é aplicado ao filtro, os organismos do filtro agem no sentido da redução do pH para valor próximo a neutralidade, o pH médio do efluente da coluna piloto ficou numa faixa entre 6,8 e 7,1.

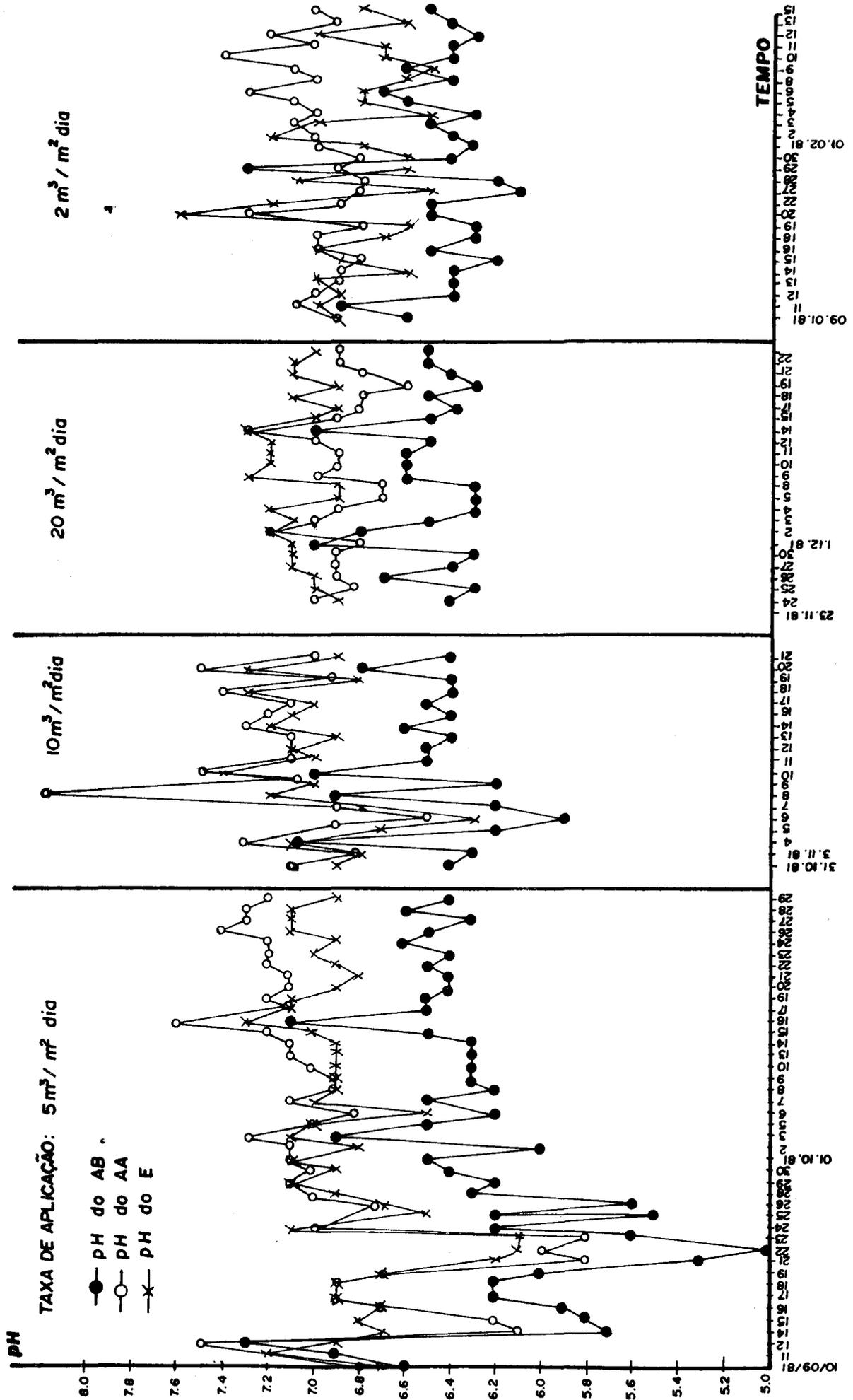


Fig. 4.1 - VARIACÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO COM PRÉ AERAÇÃO

Com o tratamento os valores de alcalinidade tenderam a decrescer (fig. 4.2). Chamando de Δ a diferença entre a alcalinidade do afluente aerado e alcalinidade do efluente observa-se que es se Δ decresce a medida que cresce a taxa de aplicação. Constatou-se que existiu boa correlação entre os Δ médios e as médias de remoção de DBO para cada período de operação (fig. 4.5a), embora dentro do período de operação, não tenha havido influência da variação de Δ na remoção da DBO. Parece ser o tempo de detenção mais importante na redução da alcalinidade, pois a medida que aumenta permite maior tempo para a reação do dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos organismos no interior do filtro com a alcalinidade dos esgotos (36), fig. 4.5b.

A figura 4.3 mostra o comportamento da condutividade elétrica ao longo do tempo. Houve, no geral, um decrescimento da condutividade elétrica com o tratamento. Os picos altos observados coincidem com os dias em que a coleta foi feita após o horário costumeiro. Os picos baixos encontrados coincidiram com dias de chuva durante a coleta.

O comportamento do OD e T durante todos os períodos de operação estão ilustrados na figura 4.4.

O efeito da temperatura sobre a remoção do substrato pode ser observado na figura 4.6. Houve tendência do aumento da remoção da DBO com o aumento da temperatura para as taxas de aplicação de 2, 5 e 10 m^3/m^2 dia. Na taxa de aplicação de 20 m^3/m^2 dia os pontos ficaram dispersos não sendo possível observar tendência.

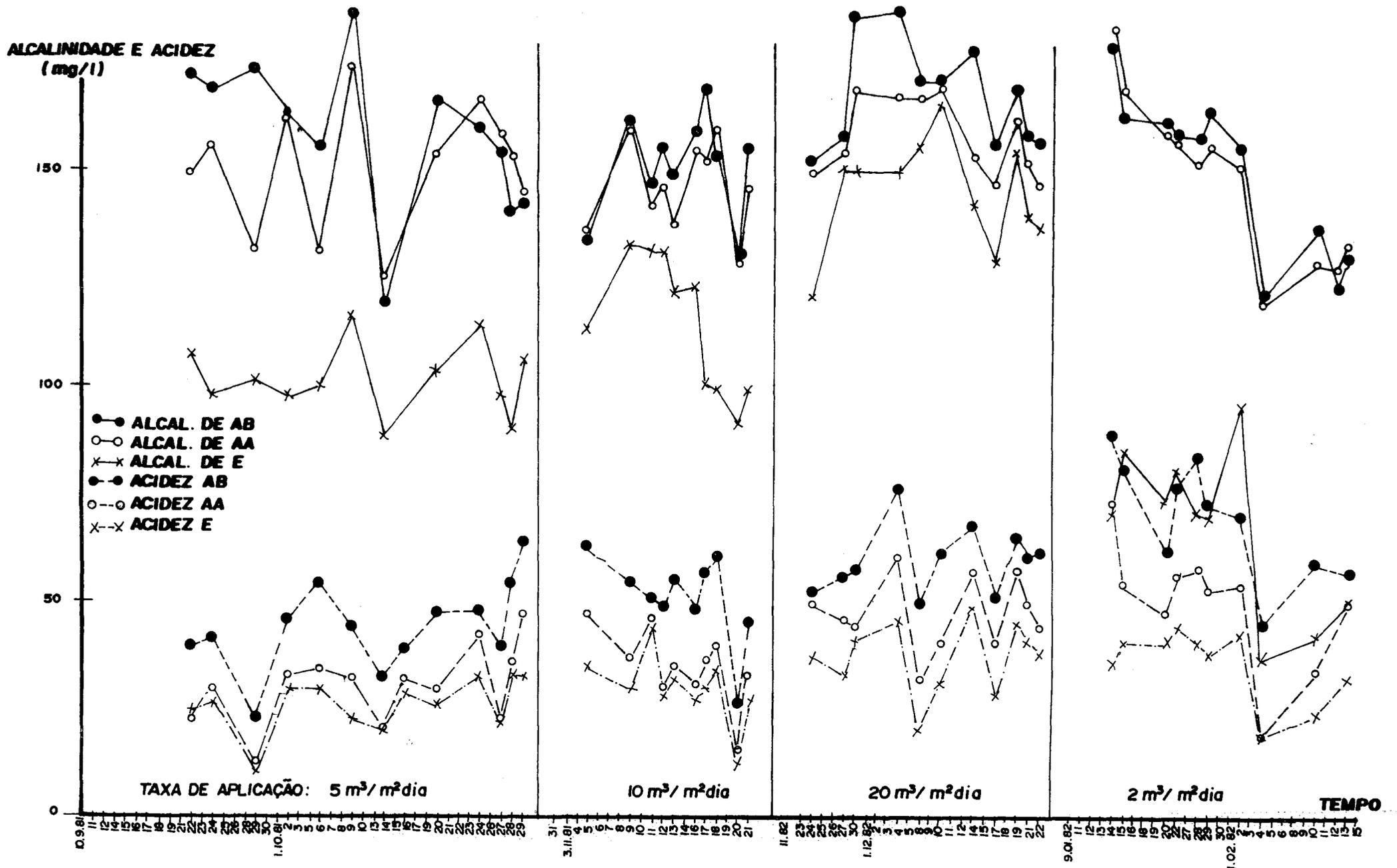


Fig. 4.2 - VARIAÇÃO DA ALCALINIDADE E ACIDEZ AO LONGO DO TEMPO COM PRÉ-AERAÇÃO.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
(μ mhos/cm)

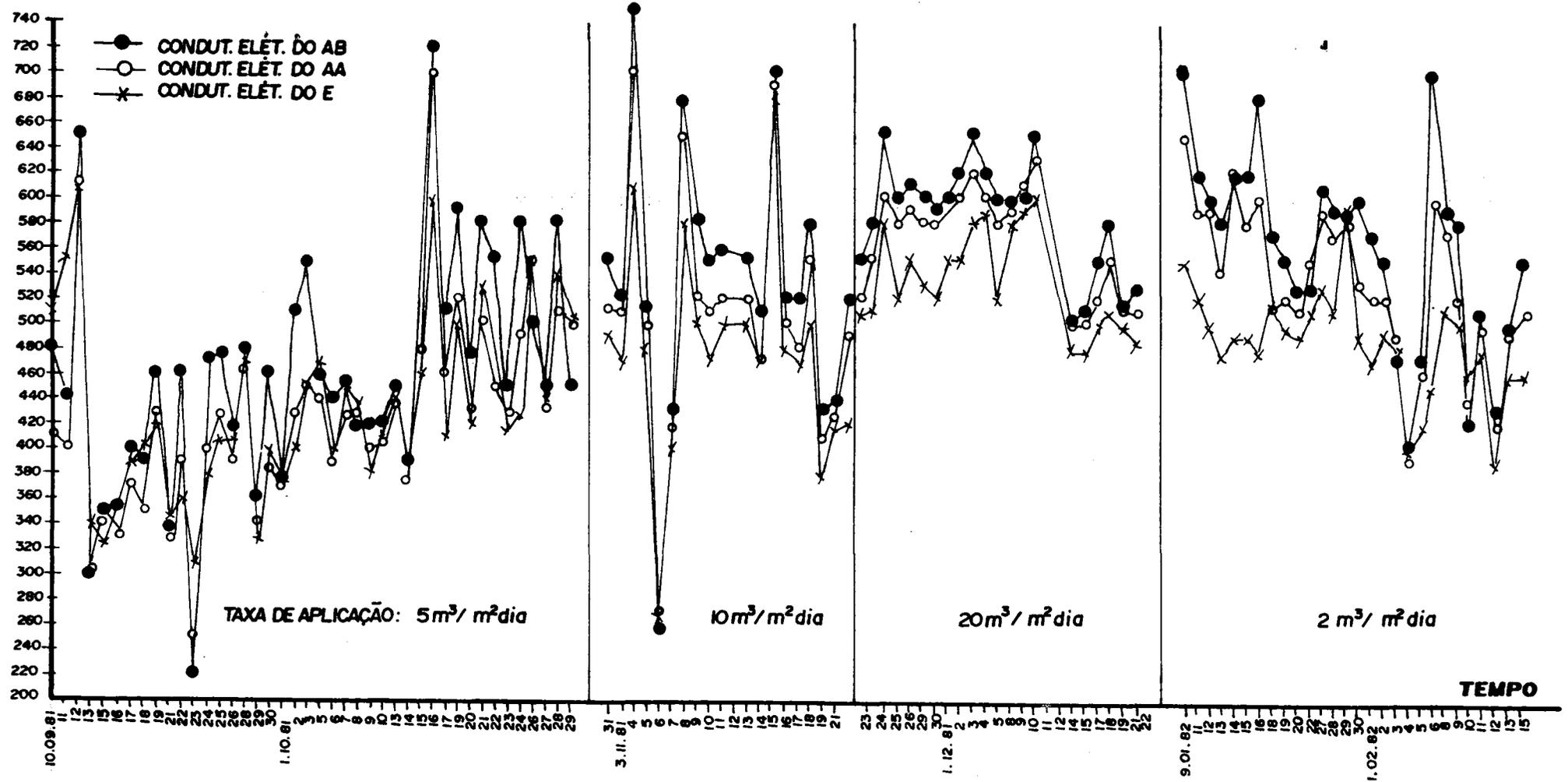


Fig. 4.3 - VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA AO LONGO DO TEMPO COM PRÉ AERAÇÃO.

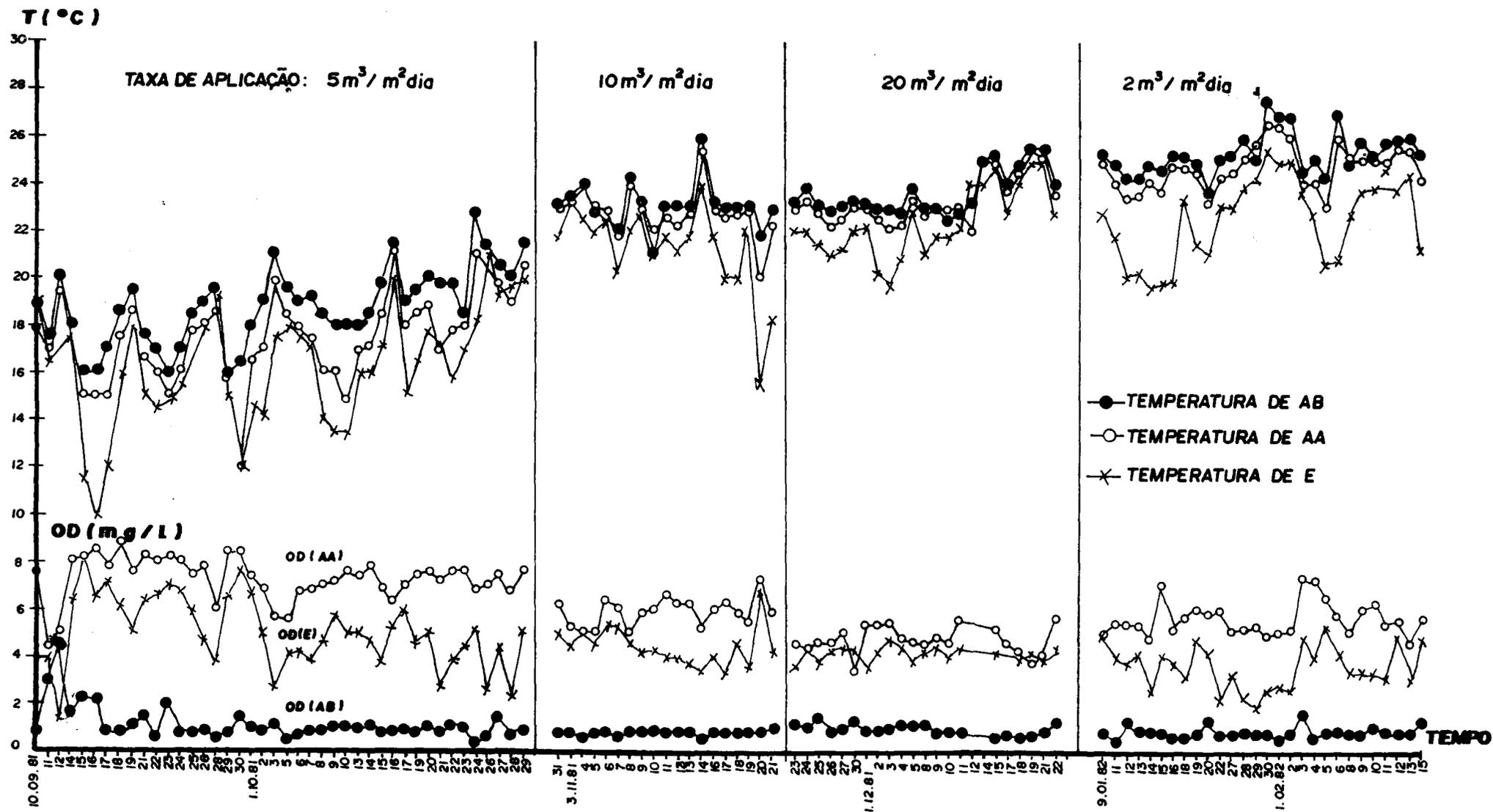
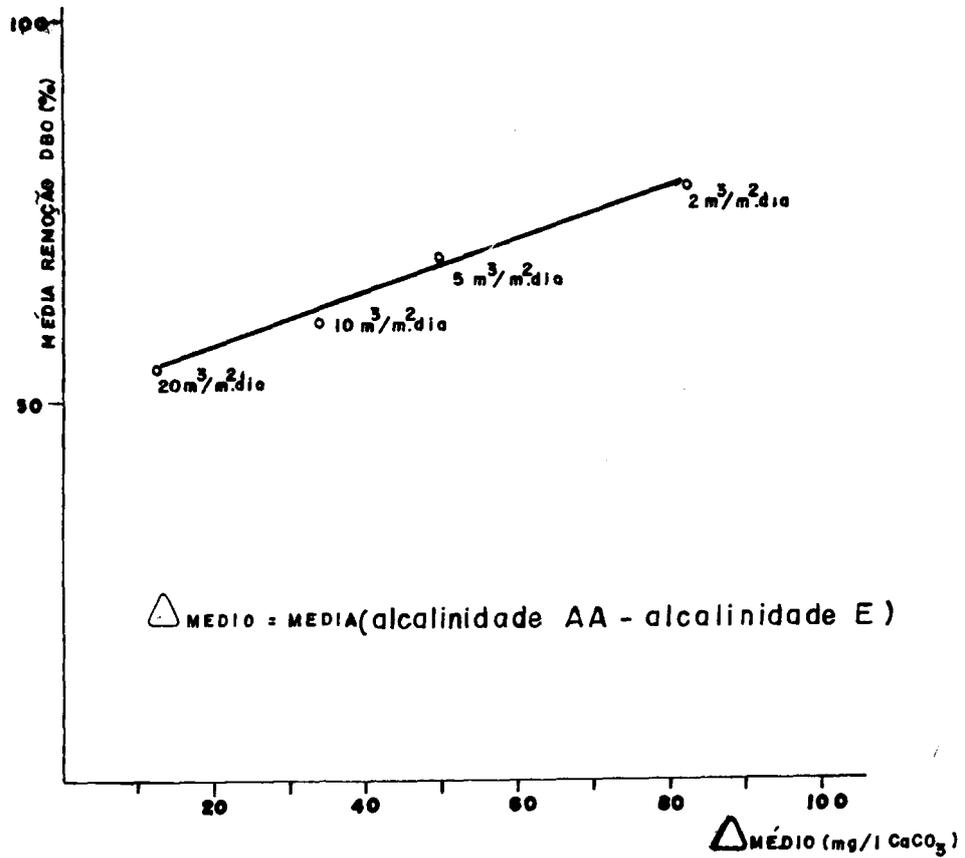
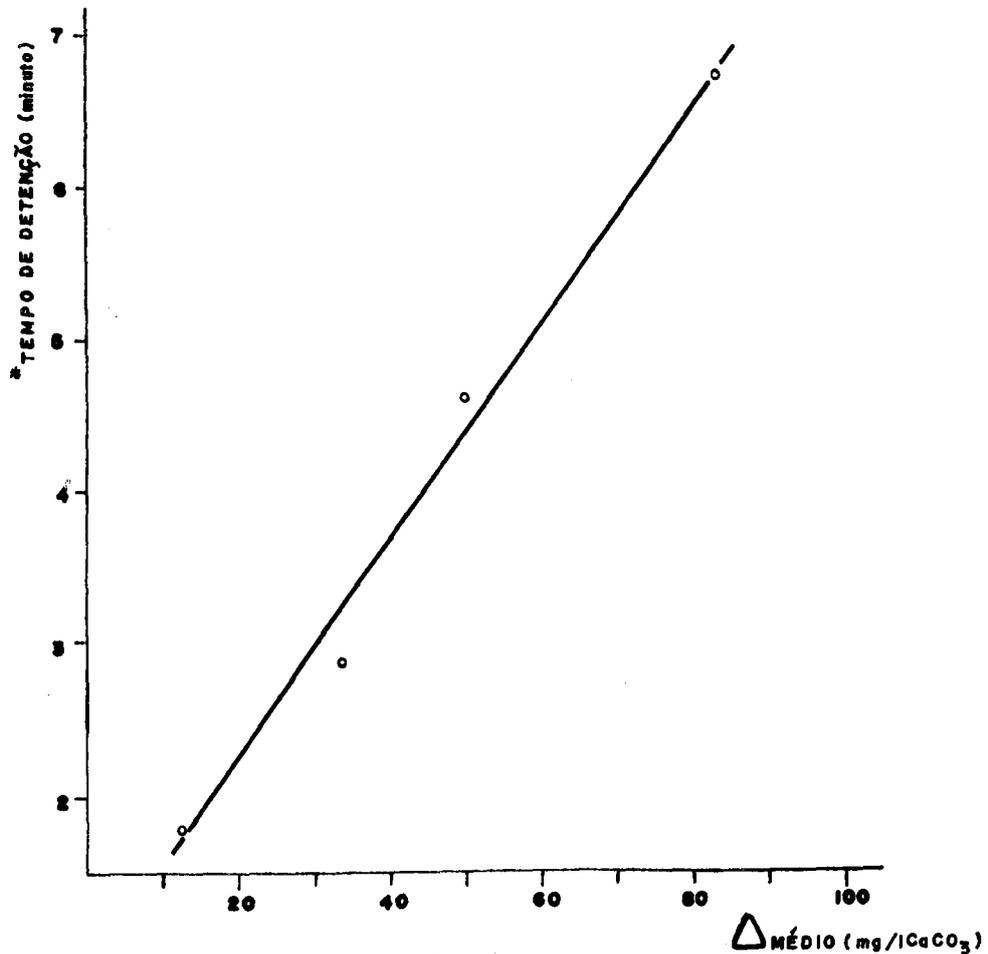


Fig. 4.4 - VARIACÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) E DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO COM PRÉ - AERAÇÃO.



a) Na remoção de DBO



b) No tempo de detenção
(*COLUNA 3 do QUADRO 3.2)

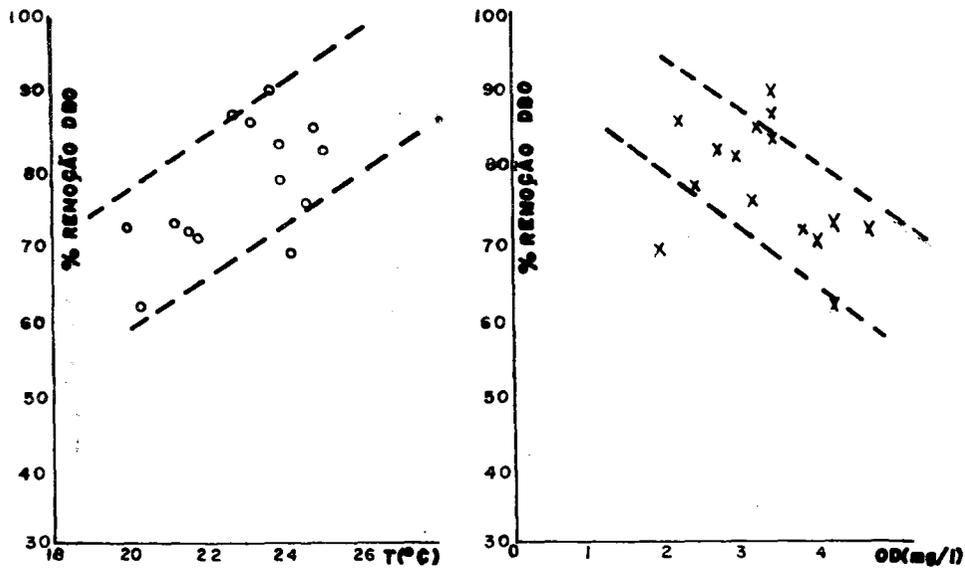
Fig. 4.5 - Influência do Δ MÉDIO (com pré-aeração)

Quanto a relação entre OD e remoção de DBO, e temperatura e remoção de DBO (fig. 4.6), observa-se a inversão das tendências observadas no estudo dos filtros biológicos do Rio Grande do Sul e em escala piloto (33), figuras 2.6 à 2.11. Com isso parece que o oxigênio deixou de ser um fator limitante do processo nas três menores taxas de aplicação. Quando na maior temperatura obteve-se maior remoção de DBO era nesse ponto que tinha-se a menor concentração de oxigênio, porque maior temperatura, menor é a concentração do oxigênio. Com isso, tem-se que a remoção de DBO é dependente da temperatura e não mais da concentração de oxigênio.

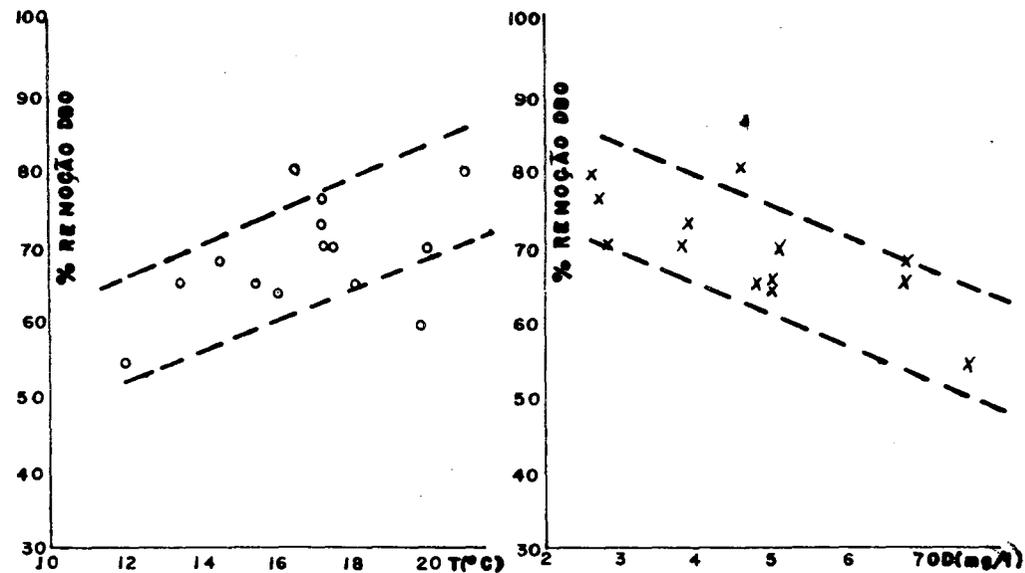
Para a taxa de $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia pode ter acontecido que a aeração não atingiu níveis desejados compatíveis com o suprimento de alimento ou que em cargas maiores a temperatura deixa de ser um fator importante na remoção de DBO.

Para verificar o efeito sobre o desempenho do filtro quanto à carga orgânica aplicada em termos de DBO e DQO foram constituídas as figuras 4.7 e 4.8. Os valores da carga aplicada (g/m^3 dia) variaram de acordo com a concentração de DBO do afluente aerado durante cada período de observação.

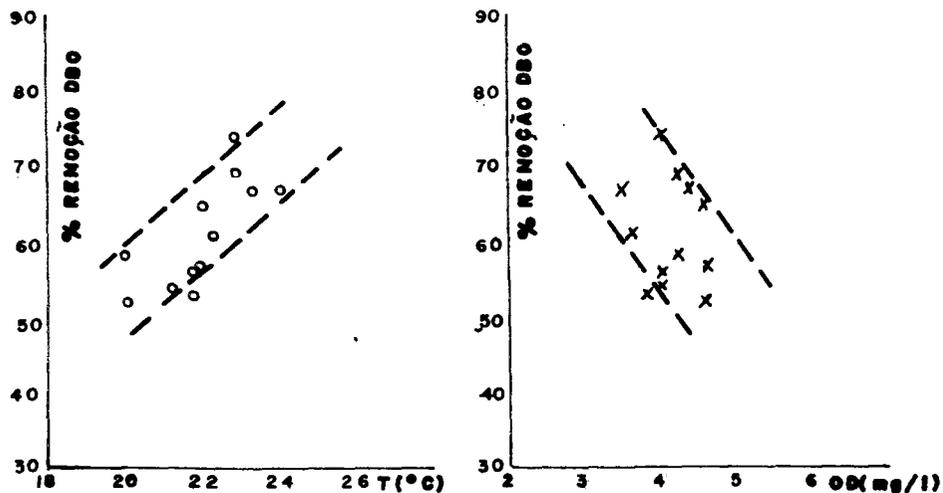
As equações referentes ao comportamento da remoção (R) e do efluente (E) de acordo com a carga de DBO ou DQO aplicada foram obtidas através do método dos mínimos quadrados.



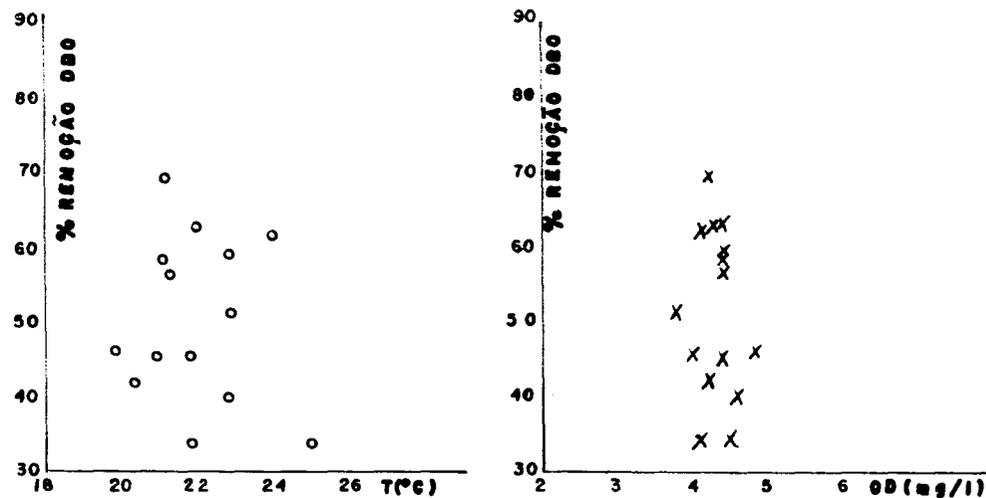
T.A = 2 m³/m².dia



T.A = 5 m³/m².dia



T.A = 10 m³/m².dia



T.A = 20 m³/m².dia

Fig.4.6 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO₅ (°)

Remoção de DBO₅ em relação ao ODefluente (x)

Pela figura 4.7 pode ser visto que com o aumento da carga aplicada há também aumento na remoção da DBO. A DBO do efluente também aumenta. As inclinações das retas de remoção de DBO são mais ou menos constantes, variando de 0,65 a 0,80, sendo que os menores valores corresponderam às maiores cargas orgânicas resultantes das maiores taxas de aplicação. Nas taxas de 2 e 5 m³/m² dia as inclinações das retas de remoção tiveram valores muito próximos.

Na figura 4.8 estão os resultados obtidos com a aplicação da carga de DQO. Observa-se também o aumento da carga removida e do efluente com o aumento da carga aplicada. Os valores das inclinações das retas de remoção de DQO foram próximas.

Através das retas teóricas R e E da figura 4.7 observa-se que dentro de um mesmo período de operação aumentando-se a concentração de DBO afluente há um acréscimo em termos de percentagem na remoção de DBO. Por exemplo, aumentando a concentração afluente de 128 mg/l (160 g/m³ dia) para 192 mg/l (240 g/m³ dia), na taxa de aplicação de 5 m³/m² dia, a remoção de DBO passa de 67,8% para 72,2%. A concentração de DBO efluente passa de 41,2 mg/l (51,5 g/m³ dia) para 53,4 mg/l (66,7 g/m³ dia). Observa-se também que para uma mesma concentração de DBO afluente, por exemplo 128 mg/l, e variando a taxa de aplicação de 2, 5, 10 e 20 m³/m² dia a percentagem de remoção correspondente decrescem respectivamente de 77,6; 67,8; 60,4 e 46,7% embora a carga orgânica removida cresce (49,7; 108,5; 193,3; 299,1 g/m³ dia).

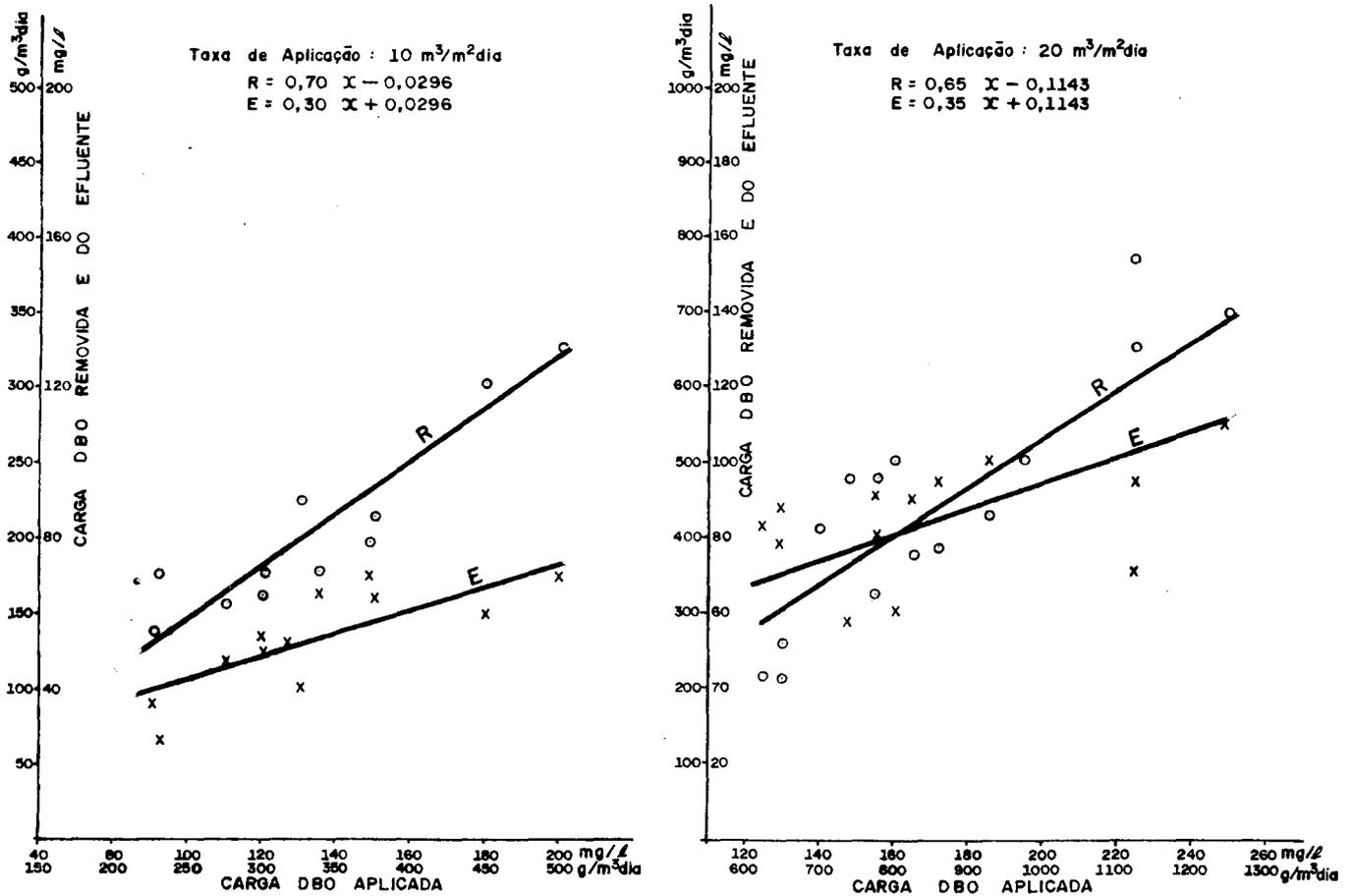
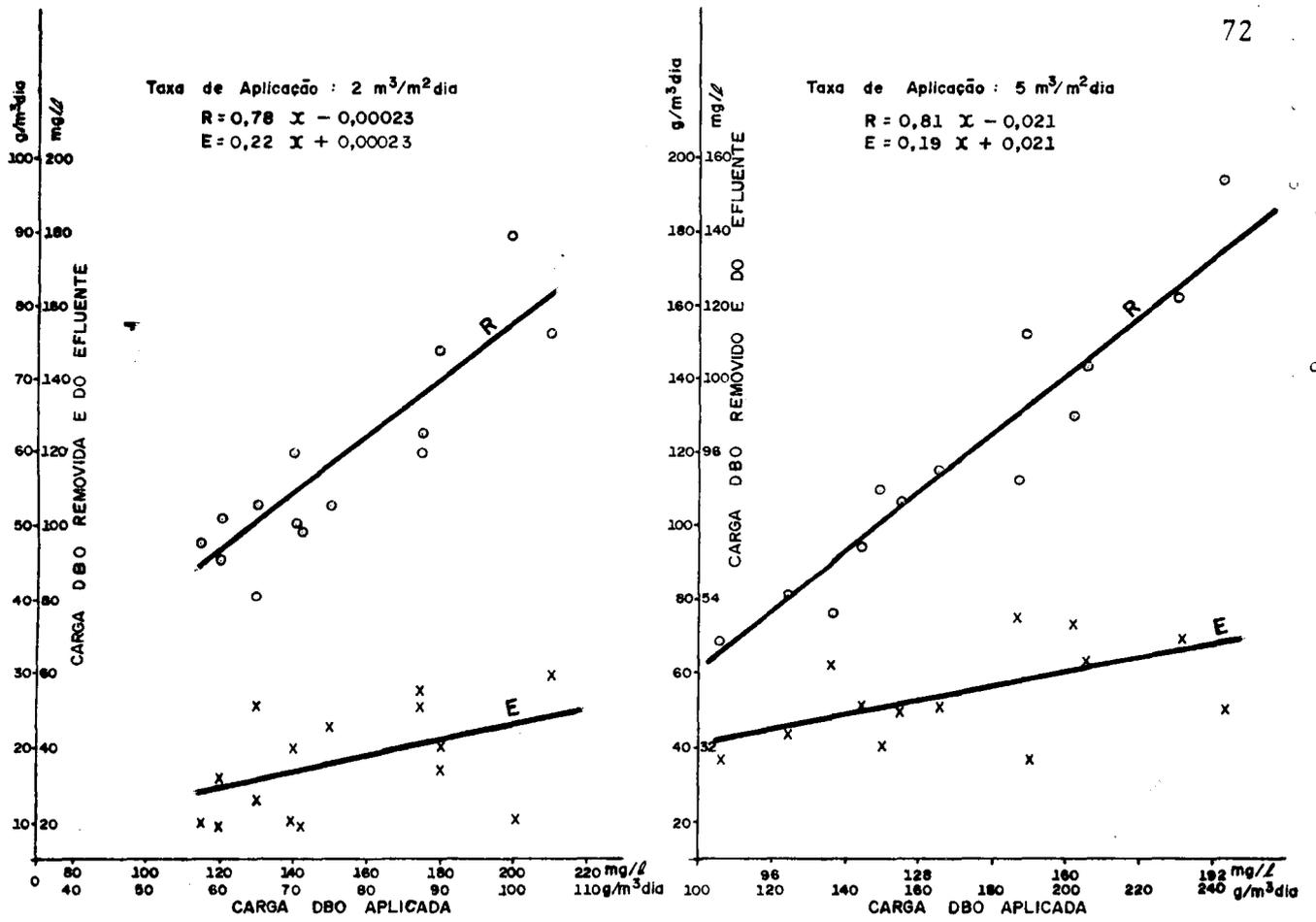


FIG. 4.7 Desempenho do filtro em relação a carga de DBO aplicada - com pré-aeração (x = carga aplicada kg/m³dia).

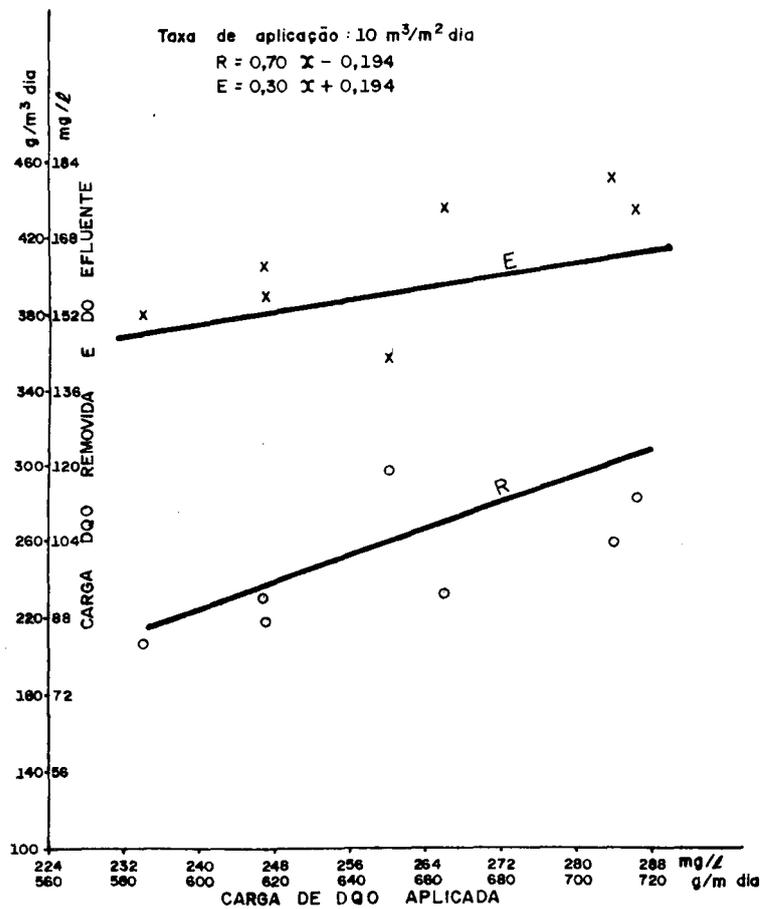
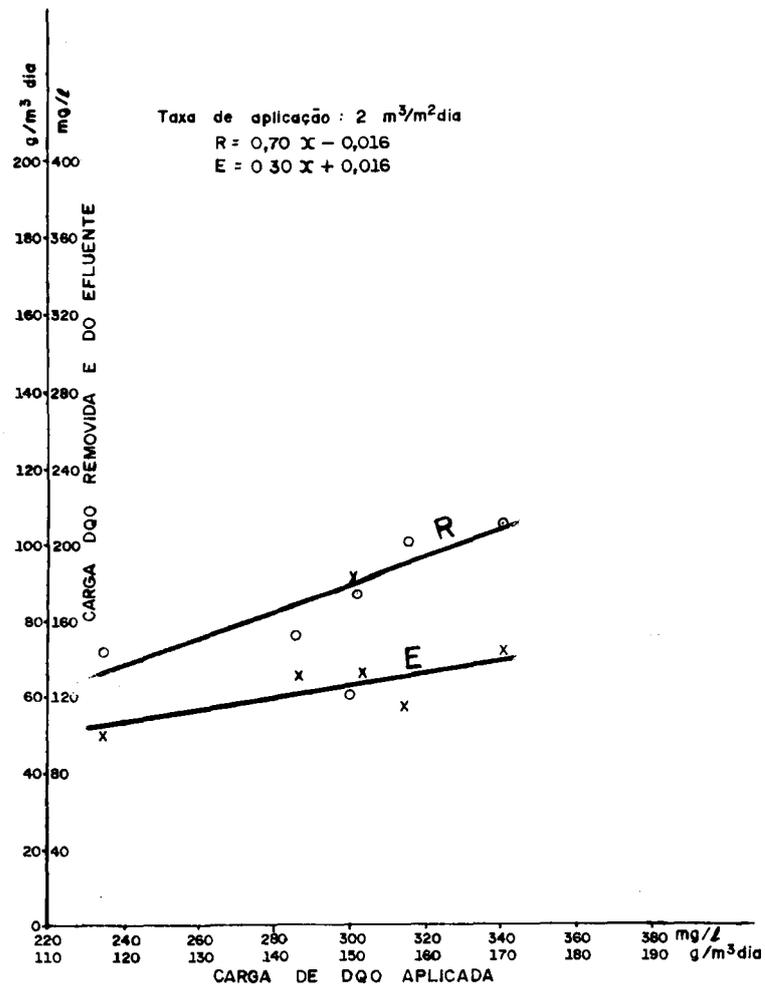
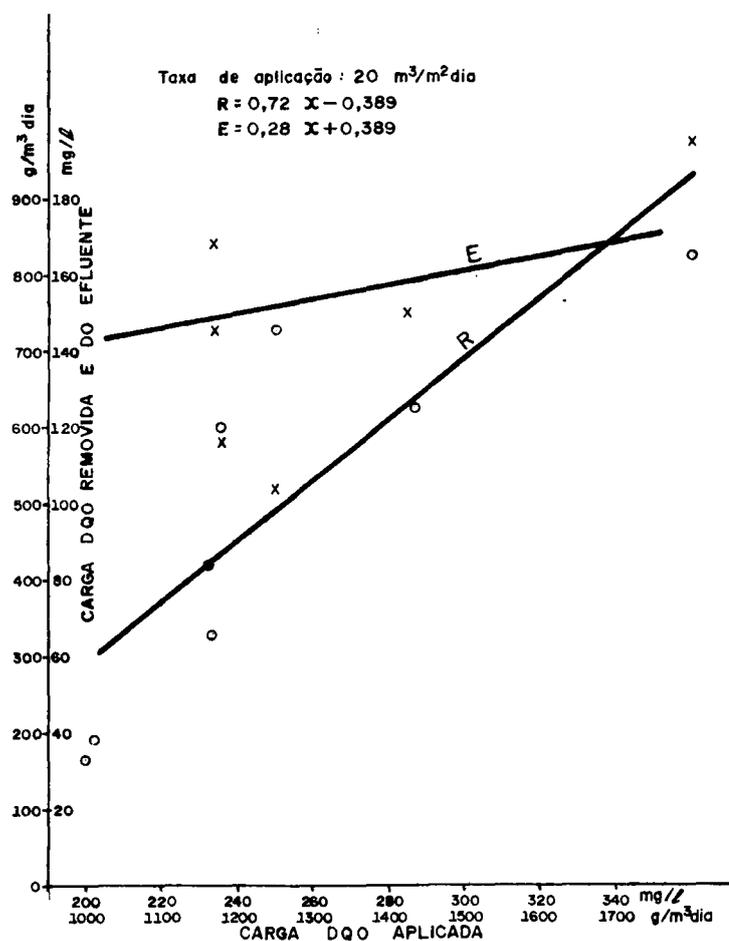
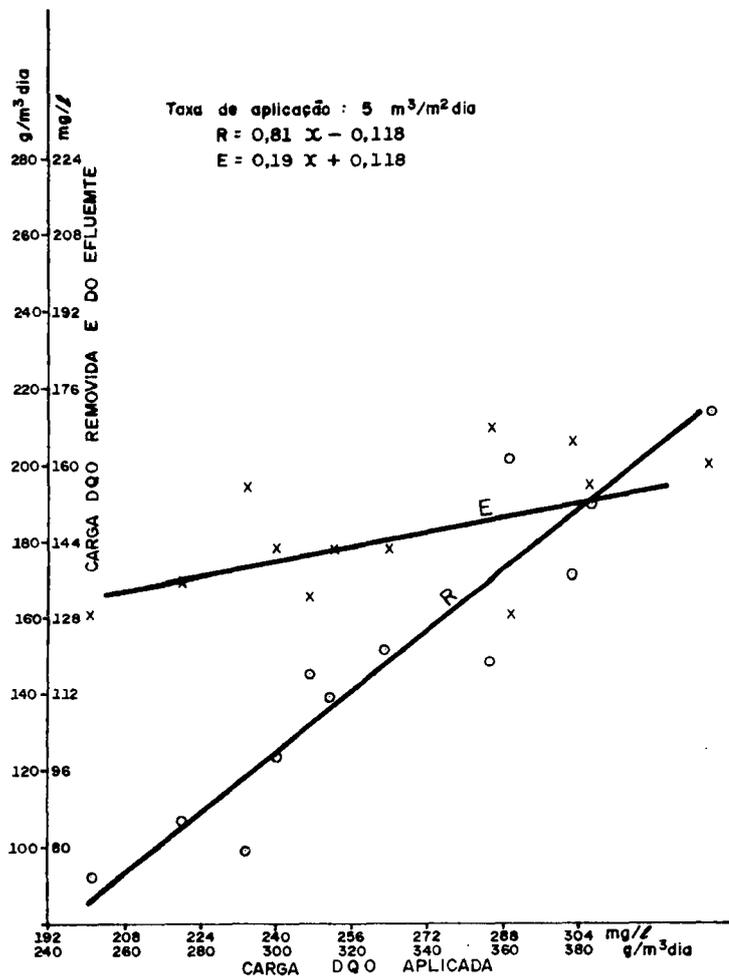


FIG. 4.8 Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada com pré-aeração (x = carga aplicada kg/m³dia).



cont.

FIG. 4.8 - Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada com pré-aeração (x = carga aplicada kg/m³ dia).

Como a relação entre carga aplicada e % remoção de DBO e DQO pode ser útil para dimensionamento de filtros biológicos compilou-se todos os valores obtidos com a pré-aeração nas figuras 4.9 e 4.10. As figuras 4.11 e 4.12 nos dão a concentração efluente para as diversas cargas orgânicas de DBO e DQO aplicadas à coluna piloto.

Algumas determinações da concentração de alquil-benzeno-sulfonato (ABS) foram realizadas para as taxas de 2,10 e 20 m^3/m^2 dia.

Embora com uma série de dados reduzida é possível se observar que com o aumento da concentração de ABS no afluente da coluna houve tendência de diminuir a eficiência em termos de remoção de DBO fig. 4.13. A remoção do detergente pelo filtro biológico foi em média 22% para a taxa de aplicação de 2 m^3/m^2 dia. Para as outras duas taxas praticamente não houve nenhuma remoção. Isso confirma em parte o que diz Braile (5):

"Estudos intensivos de biodegradabilidade do ABS, vieram comprovar que os sulfonatos de alquilbenzila, oferecem grande resistência à degradação biológica; essa resistência deve-se ao fato de que somente poucos microrganismos são capazes de romperem ligações de átomos de carbono quaternário e qualquer cadeia ramificada de alquila possui átomos de carbono terciário e/ou quaternário. Assim, frações consideráveis do detergente atravessam incólumes as estações de tratamento de esgoto, persistindo, por longos períodos, nas águas receptoras. Em filtros biológicos a percentagem de remoção média de ABS é 35%." (5)

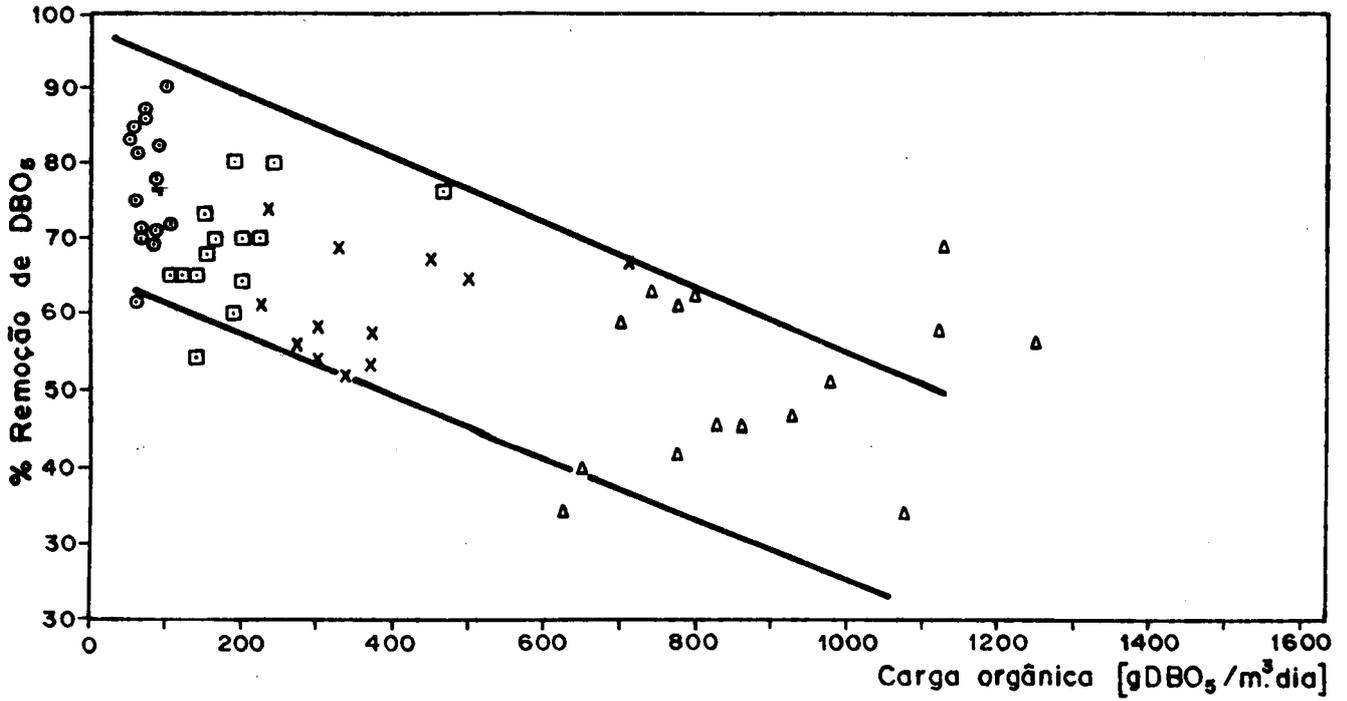


FIG. 4.9 - Remoção de DBO em relação à carga orgânica aplicada com pré-aeração

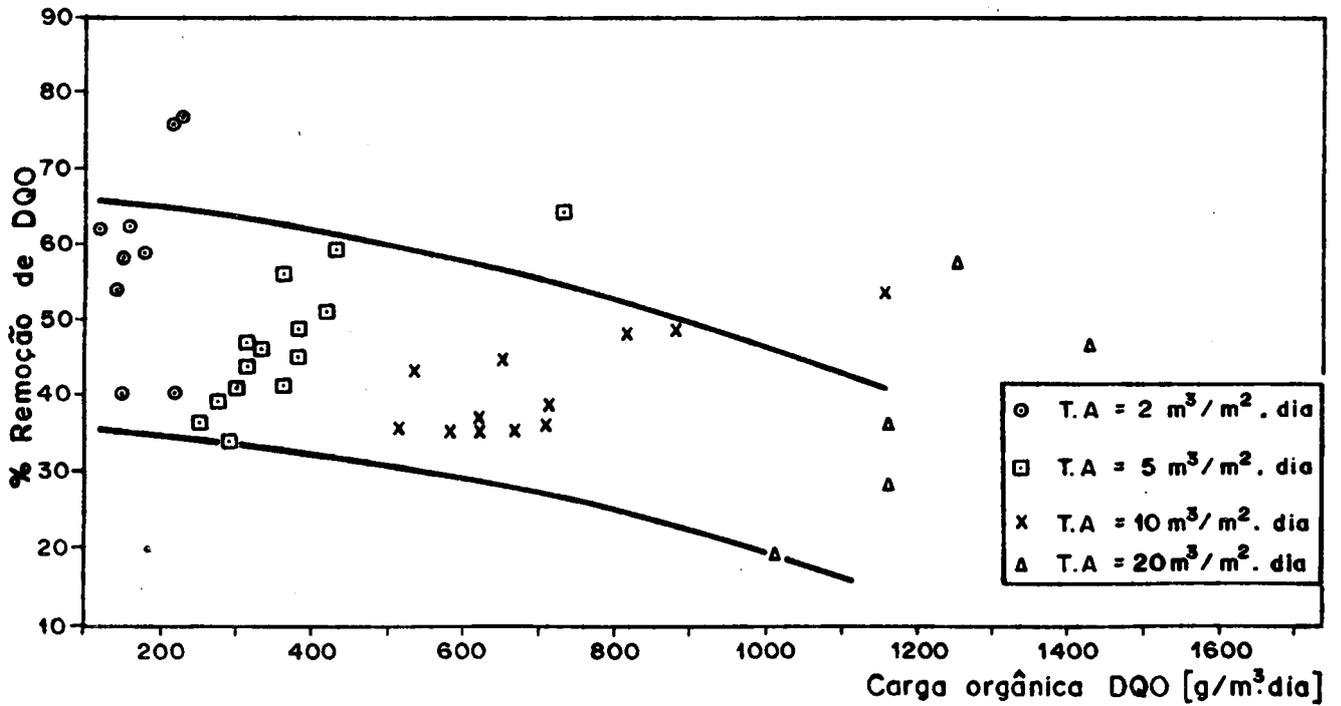


FIG. 4.10 - Remoção de DQO em relação à carga orgânica aplicada com pré-aeração

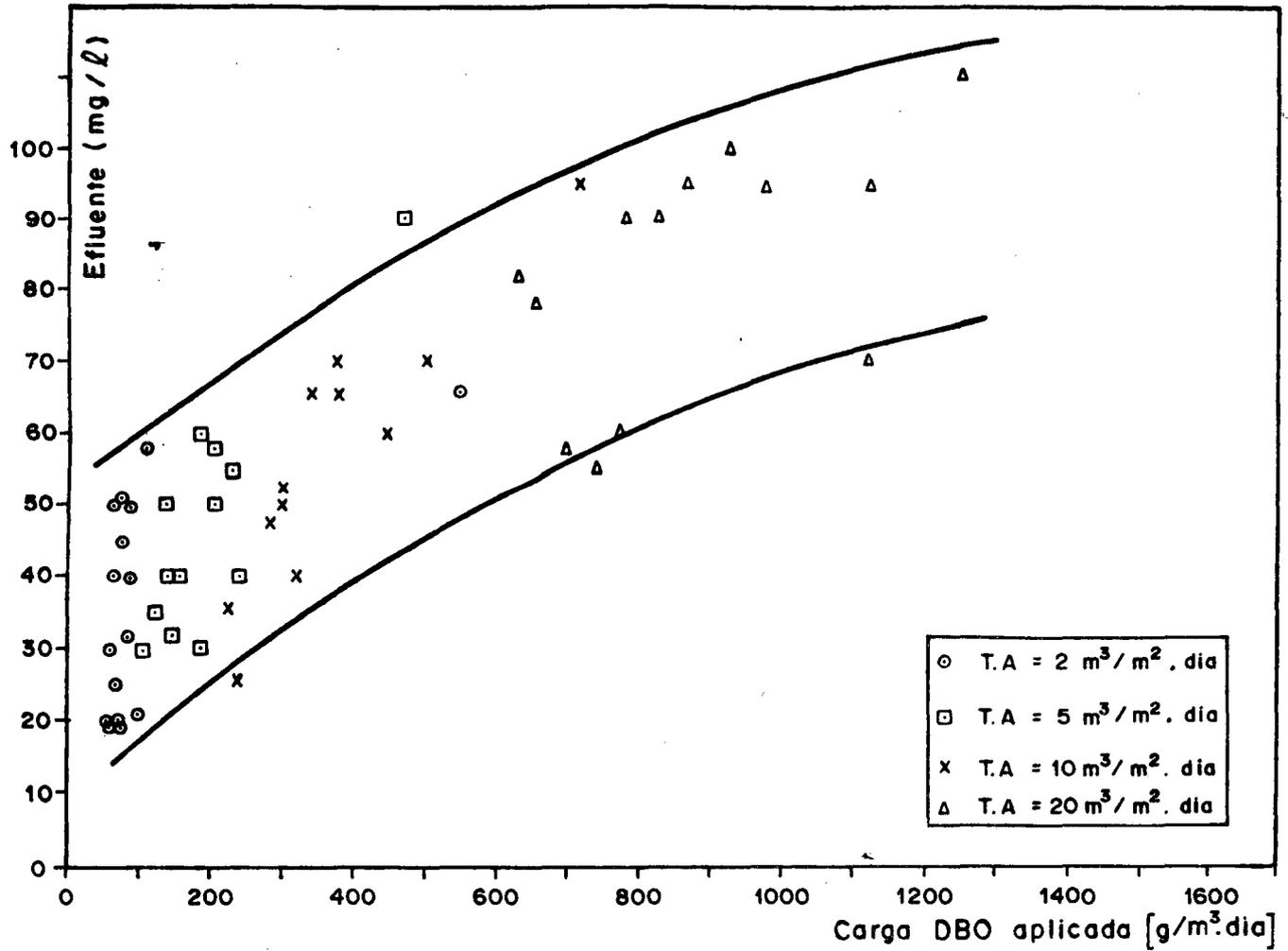


FIG. 4.11 - Concentração de DBO₅ no efluente em relação a carga aplicada - com pré-aeração

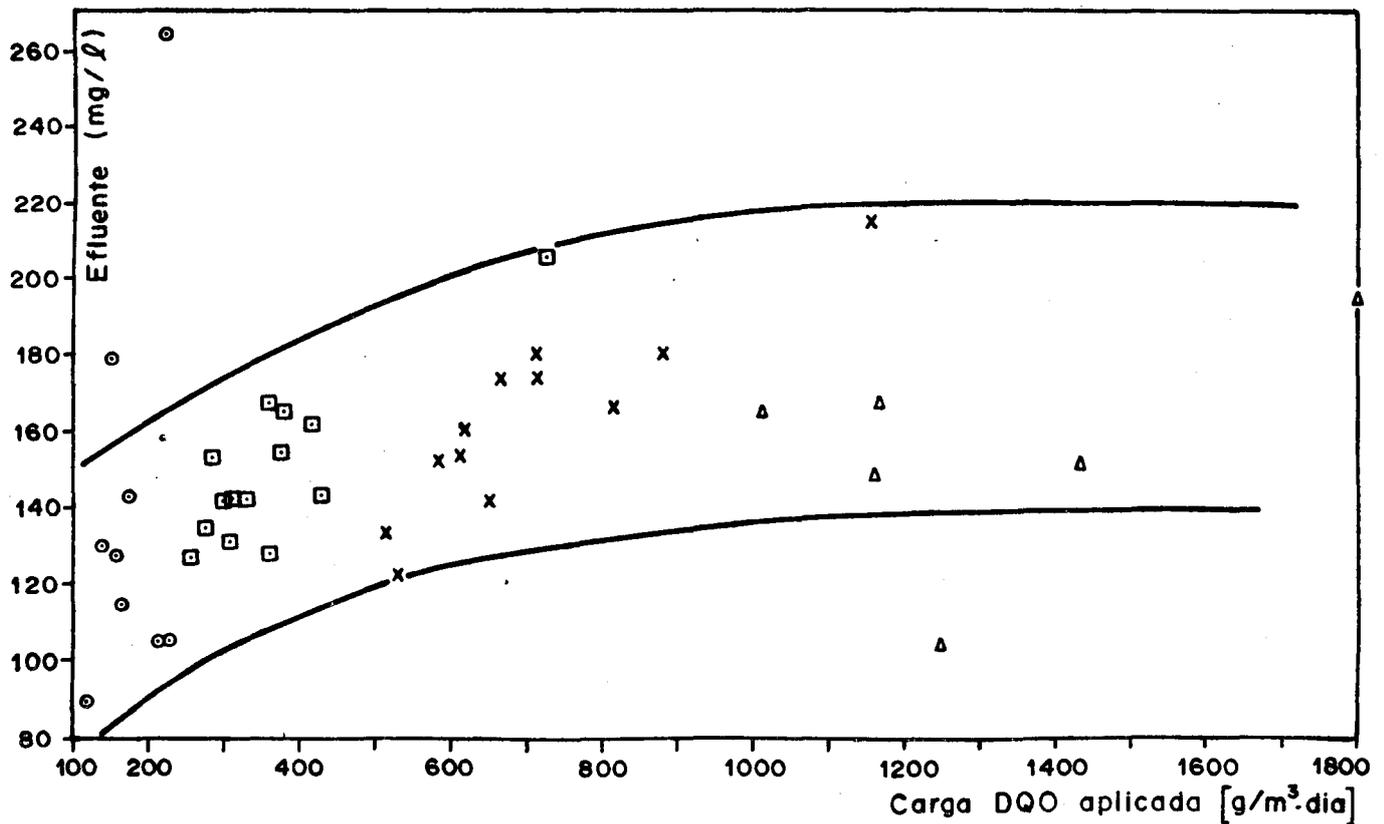


FIG. 4.12 - Concentração de DQO no efluente em relação a carga aplicada - com pré-aeração

A diminuição do desempenho do filtro quanto à remoção de DBO na presença de ABS pode ser devida a "alterações físico-químicas na superfície do líquido provocadas pelos detergentes, dificultando a transferência do oxigênio" (5).

Durante os períodos de operação de 2, 10 e 20 m³/m² dia foram obtidos valores de alguns elementos traços, como Zn, Pb e Cu, cujos resultados estão no quadro 4.1.1.

As concentrações afluentes desses elementos traços são relativamente pequenas, certamente devido as características do esgoto doméstico. Pesquisa feita em estações de tratamento de esgoto doméstico indicou que 95% das amostras coletadas durante um período de 20 meses tinham concentrações afluentes iguais ou menores do que 0,85, 1,14 e 0,20 mg/l e efluente à estação de 0,55, 0,88 e < 0,20 mg/l de cobre, zinco e chumbo respectivamente (22). Portanto, no tratamento desse tipo de esgoto a remoção desses elementos traços não é preocupante, uma vez que a concentração do efluente tem valores dentro dos padrões de Emissão de Efluentes Líquidos (29).

Para verificar a habilidade da coluna em remover metais seriam necessários testes específicos da capacidade adsortiva do meio filtrante com concentrações mais expressivas desses elementos. Dos dados aqui analisados pode-se observar que obteve-se maior remoção quando o afluente à coluna tinha uma concentração maior e, no geral, não houve remoção, obtendo-se concentração maior no efluente.

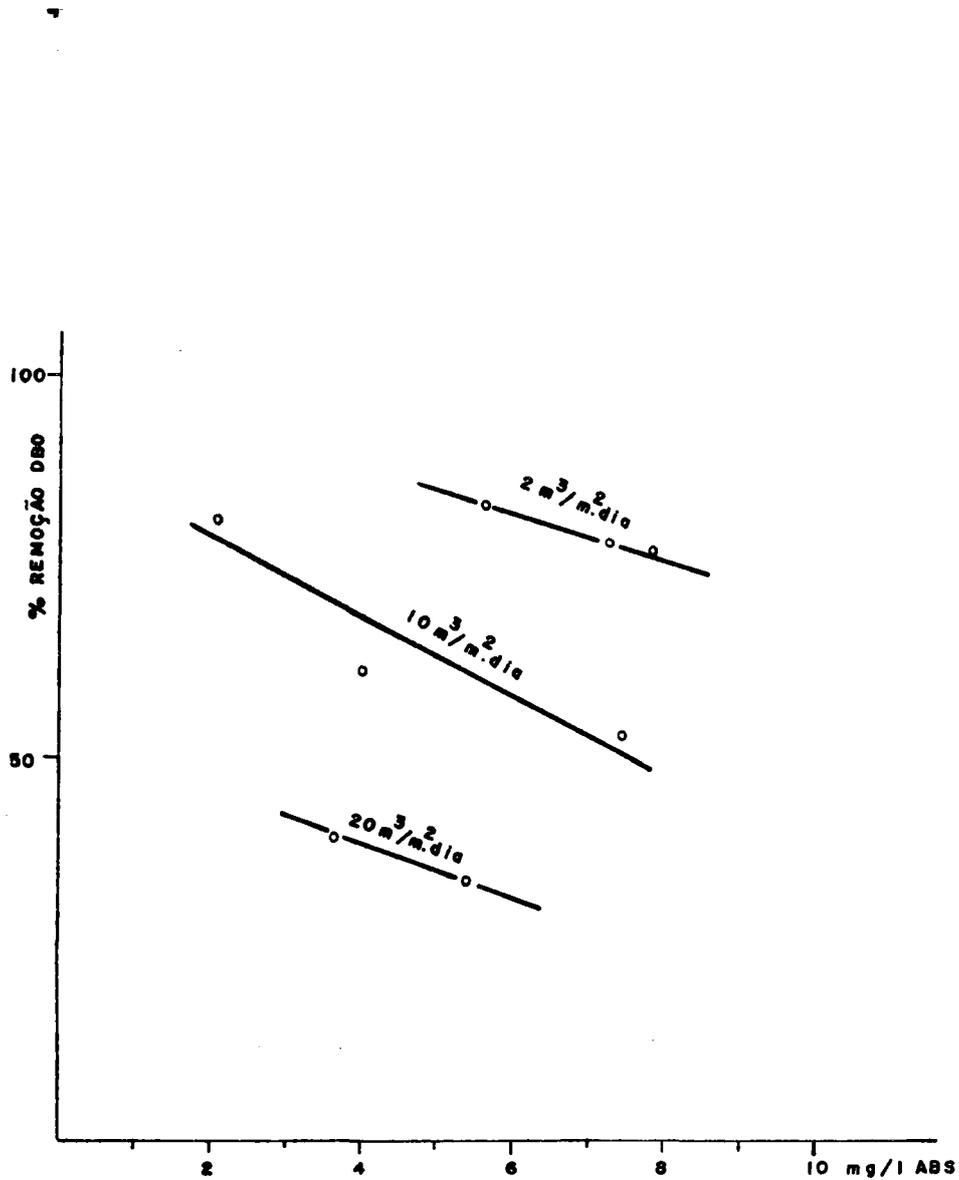


Fig. 4.13 - Influência da concentração de ABS afluente no desempenho da coluna piloto

Os valores do tempo de detenção realizados com água e esgoto conforme determina (6 e 9) estão nos quadros 3.1 e 3.2.

Dos resultados obtidos constituiu-se as figuras 4.14 e 4.15. Por essas figuras observa-se que o valor do tempo de detenção obtido segundo Eckenfelder (9) são maiores que os obtidos pelo método de Cook (6). Observa-se também que a taxa de aplicação influencia no tempo de detenção segundo uma ordem inversa. O tempo de detenção obtido para o esgoto foi maior do que quando usou-se água de abastecimento para afluente ao filtro e esse estava fora de operação a algum tempo. Com isso parece correta a afirmativa que a presença da película biológica aumenta o tempo de detenção, com influência menor em altas taxas de aplicação. Observação tirada da figura 4,14 é a do aumento da remoção de DBO com o aumento do tempo de detenção.

O tempo de detenção teórico segundo Howland deu resultados próximos aos valores obtidos com água e obtidos conforme Cook e Katzberger (6).

TAXA DE APLICAÇÃO	ELEMENTO		Zn		Cu		Pb	
	DATA	PONTO	AA	E	AA	E	AA	E
2 m ³ /m ² dia	13/01/82		0,30	0,40	ñ.d.	ñ.d.	0,5	0,20
	20/01/82		0,10	0,10	0,2	0,3	-	-
10 m ³ /m ² dia	13/11/81		0,16	0,34	0,18	0,20	-	-
	15/11/81		0,32	0,29	0,66	0,23	-	-
	18/11/81		0,22	0,32	0,08	0,07	0,54	0,59
20 m ³ /m ² dia	30/11/81		0,33	0,18	0,06	0,03	0,27	0,29
	14/12/81		0,16	0,18	0,03	0,03	0,37	0,40
	17/12/81		0,15	0,18	0,02	0,05	0,33	0,59
	21/12/81		1,40	0,50	2,00	0,9	-	-

Quadro 4.1.1. Remoção de elementos traços

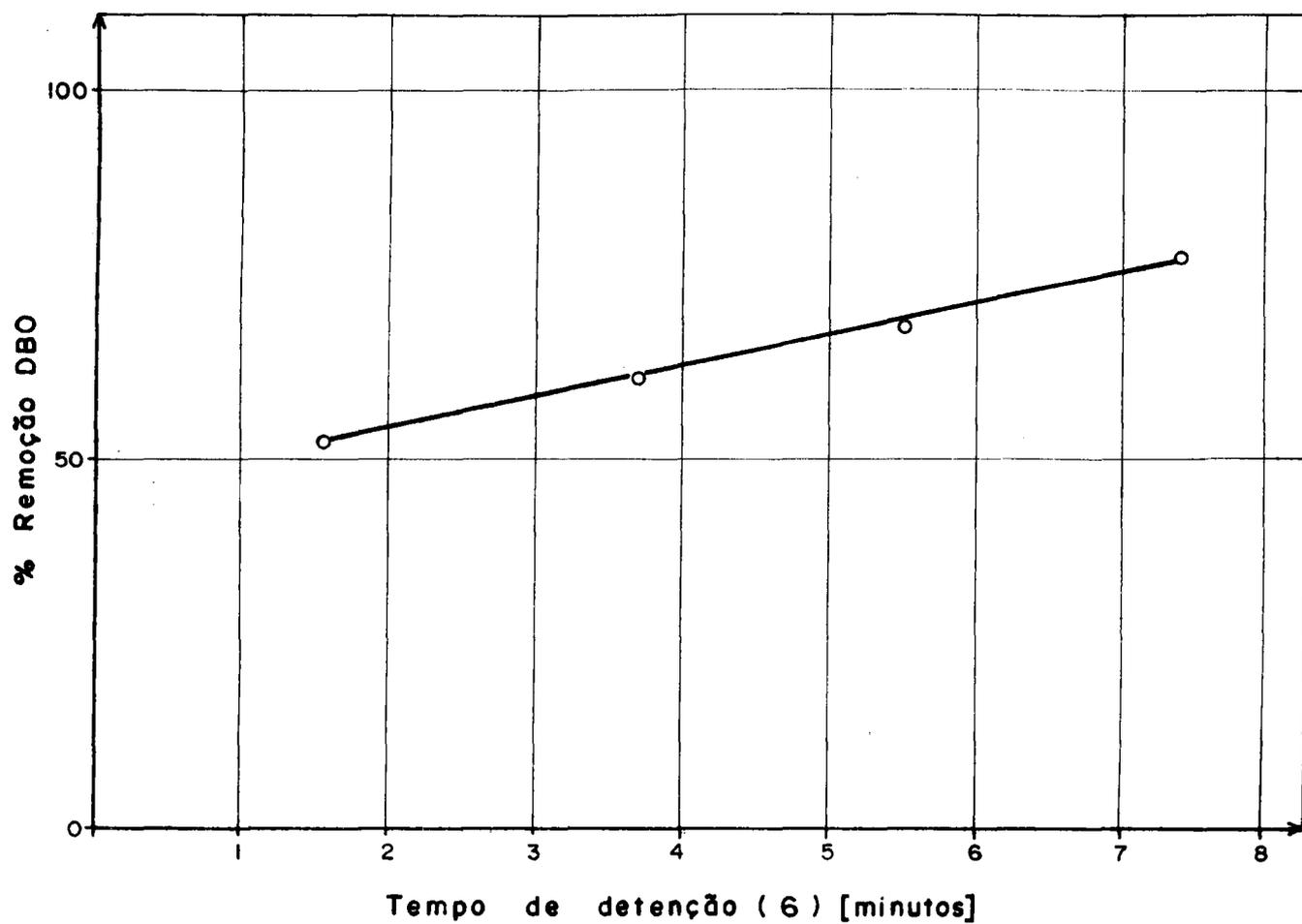


FIG. 4.14 — Efeito do tempo de detenção sobre o desempenho do filtro. com pré-aeração

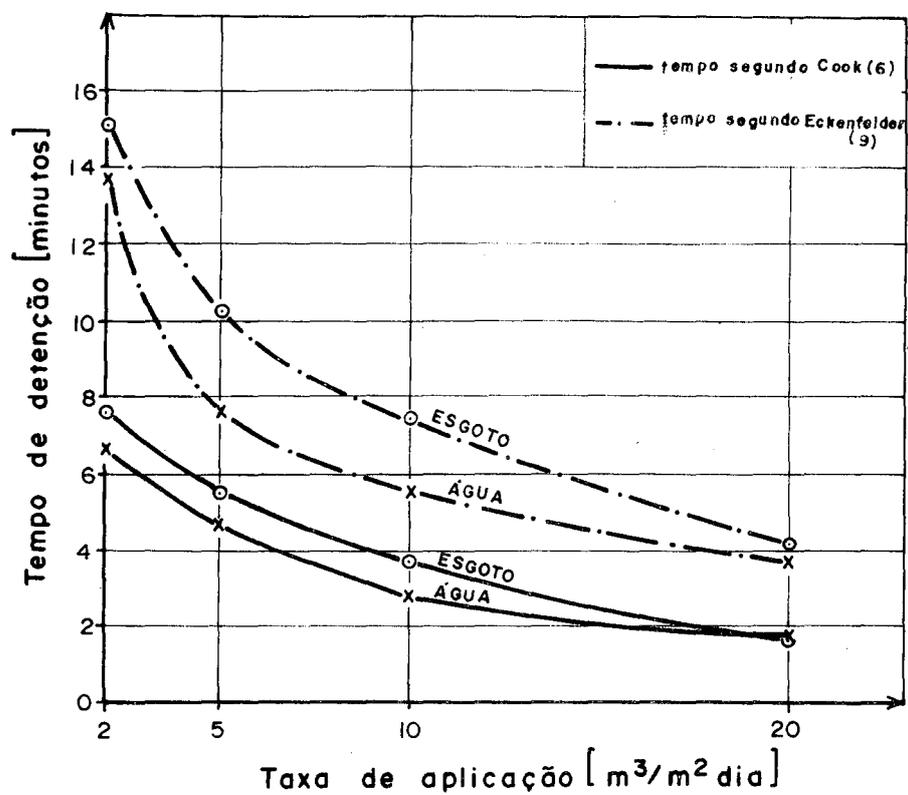


FIG. 4.15 — Relação entre taxa de aplicação e tempo de detenção com pré-aeração

A fim de dar uma visão geral do desempenho do filtro biológico com aeração, construiu-se o quadro 4.1.2.

Para cada parâmetro analisado no afluente e efluente ali indicado, tabulou-se as concentrações em que foram obtidas as máximas e mínimas remoções para cada período de operação. O valor médio foi obtido das concentrações médias do afluente e efluente.

A maior remoção de DBO foi de 90% quando operou-se com taxa de aplicação de $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e a mínima remoção foi de 34% com taxa de aplicação de $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia. As remoções médias foram de 77%, 70%, 56,5% e de 51,7% correspondentes as taxas de aplicação de 2, 5, 10 e $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, respectivamente. Nota-se a influência da taxa de aplicação na remoção da DBO, isso pode estar ligado ao fato de que aumentando a taxa de aplicação diminuiu-se o tempo de detenção e aumenta-se a carga de DBO aplicada.

No quadro 4.1.3 estão alguns valores da DBO obtida com efluente não filtrado e com efluente filtrado em laboratório. Nota-se uma considerável diferença entre esses valores. Há de se esclarecer que o decantador secundário piloto não foi projetado tecnicamente e que foi o mesmo para todas as taxas de aplicação. Portanto, pode-se esperar melhores resultados quando o decantador secundário for melhor projetado.

A remoção de DQO também decresceu com o aumento da taxa de aplicação, Os valores médios foram de 58,7, 48,8, 42,2 e 40,6% da menor para a maior taxa de aplicação.

Taxa aplicação		2 m ³ /m ² dia			5 m ³ /m ² dia			10 m ³ /m ² dia			20 m ³ /m ² dia		
Pontos		AA	E	% re- moção	AA	E	% re- moção	AA	E	% re- moção	AA	E	% re- moção
DBO (não filtrado)		200	20	90	152	30	80,3	95	25	73,7	225	70	68,9
		154	35	77,3	155	46	70,0	147	56,5	61,6	176	85	51,7
		135	50	61,5	110	50	54,5	135	65,0	51,8	216	142	34,3
DQO		460	105	77,2	582	207	64,4	464	214	53,9	250	104	58,4
		303	125	58,7	293	150	48,8	282	163	42,2	261	155	40,6
		440	265	39,8	201	128	36,3	207	135	34,8	202	164	18,8
SS		110	50	54,5	250	45	82	55,0	12,5	77,3	59	25,0	57,6
		97	56,5	41,7	149	55	63,1	61,0	28,0	54,1	53	30,0	43,4
		42,5	27,5	35,3	80	55	31,2	72,5	52,5	27,6	37,5	32,5	13,3
S ²⁻		8,8	0,0	100%	-	-	-	-	-	-	5,2	0,0	100
		6,5	0,7	89,2	-	-	-	-	-	-	10,8	6,9	36,1
		3,8	2,0	47,4	-	-	-	-	-	-	8,9	7,9	11,2
ABS		3,8	2,0	47,4	-	-	-	4,0	3,6	10	5,4	4,5	17
		7,1	5,4	23,9	-	-	-	4,5	4,4	2,2	4,5	4,4	2,2
		7,2	5,8	19,4	-	-	-	2,1	2,1	0	3,6	4,3	0
NTK		38,1	16,9	56	48,4	32,3	67	46,7	27,4	41	47,0	34,7	26
		40,5	21,8	46,2	43,5	26,1	40,1	42,9	31,3	27,0	49,5	38,9	21,3
		51,3	29,8	42	23,4	16,5	29,5	44,6	36,4	18	49,7	45,1	9
NH ₄		28,1	11,9	58	29,8	19,5	34,6	30,7	20,9	32	39,7	32,7	18,0
		29,8	17,2	42,3	23,4	18,3	21,7	30,1	23,3	22,6	33,7	29,5	12,3
		13,5	10,9	15	11,2	10,6	5,0	24,2	20,2	16,5	30,2	27,3	9,6
N _{orgânico}		8,4	0,6	93	24,4	4,8	80	16,0	6,5	59,0	17,9	8,8	51
		10,7	4,6	57,2	20,2	7,7	61,7	12,8	8,1	37,0	16,0	9,7	39,5
		8,4	6,9	18	12,2	5,9	52	13,5	13,2	2,0	11,8	10,9	8,0
NO ₃	Med	5,1	23,1	-	3,2	5,6	-	2,6	7,4	-	8,3	12,0	-

Quadro 4.1.2 - Remoções máximas, médias e mínimas obtidas com o filtro biológico com pré-aeração (concentrações em mg/l).

Taxa de aplicação	Data	DBO (mg/l)		% remoção	DBO (mg/l)	% remoção
		AA	E	DBO	E _{filtrado}	DBO
2 m ³ /m ² dia	22/01/82	140	25	82%	20	86%
	04/02/82	48	25	<u>48%</u>	19	<u>60%</u>
				Med 65%		Med 73%
5 m ³ /m ² dia	19/10/81	152	30	80%	10	93%
	21/10/81	375	90	76%	38	90%
	28/10/81	150	60	<u>60%</u>	40	<u>73%</u>
				72%		85,3%
10 m ³ /m ² dia	19/11/81	90	35	61%	23	74%
	21/11/81	120	50	<u>58%</u>	35	<u>71%</u>
				59,5%		72,5%
20 m ³ /m ² dia	08/12/81	225	70	69%	48	79%
	10/12/81	165	90	45%	70	58%
	22/12/81	140	58	<u>59%</u>	30	<u>79%</u>
				57,7%		72%

Quadro 4.1.3 - Comparação entre eficiência com efluente não filtrado e filtrado. (Com pré-aeração)

A remoção dos sólidos suspensos decresceu de 63,1% para 54,1% e 43,4% correspondendo as taxas de aplicação de 5, 10 e 20 m^3/m^2 dia. O menor valor de remoção foi de 41,7% para a taxa de 2 m^3/m^2 dia.

Em relação aos componentes nitrogenados observa-se um decréscimo na remoção do NTK com o crescimento da taxa de aplicação variando de 46,2% para 21,3% de remoção. Os nitratos que são produtos finais resultantes da estabilização biológica da matéria nitrogenada foram em média no efluente da coluna piloto de 21,1; 5,6; 7,4 e 12,0 mg/1 correspondentes a taxa de aplicação de 2, 5, 10 e 20 m^3/m^2 dia.

Quanto as concentrações de DBO, DQO e SS encontradas nos efluentes da coluna piloto pode-se observar que mesmo os valores máximos obtidos estão dentro dos padrões exigidos pela norma de Emissão de Efluentes Líquidos (29), em todas as taxas de aplicação usadas. As concentrações de ABS, sulfetos e nitrogênio total do efluente não estão dentro dos padrões exigidos.

4.2. Com Recirculação

Os valores de temperatura do ar e do líquido, OD, condutividade elétrica, pH, DBO, DQO, NTK, NH_3 , NO_3 , PO_4 , ABS, SO_4 , S^{--} , sólidos e metais pesados estão resumidos nos quadros VI a X (do apêndice 1), de acordo com os vários períodos de operação, a saber:

- Quadro V - Taxa de aplicação: $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 0,70$
- Quadro VI - Taxa de aplicação: $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 1,50$
- Quadro VII - Taxa de aplicação: $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 1,50$
- Quadro VIII - Taxa de aplicação: $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 0,70$
- Quadro IX - Taxa de aplicação: $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 1,50$
- Quadro X - Taxa de aplicação: $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, com
 $r = 0,70$

A partir desses resultados foram construídas as figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 que correspondem a variação do pH, alcalinidade e acidez, oxigênio dissolvido e temperatura e condutividade elétrica ao longo do tempo.

O pH do esgoto ao passar pelo filtro biológico aumentou, tendendo a neutralidade. O pH médio do efluente em todos os períodos de operação variou entre 7,0 e 7,3.

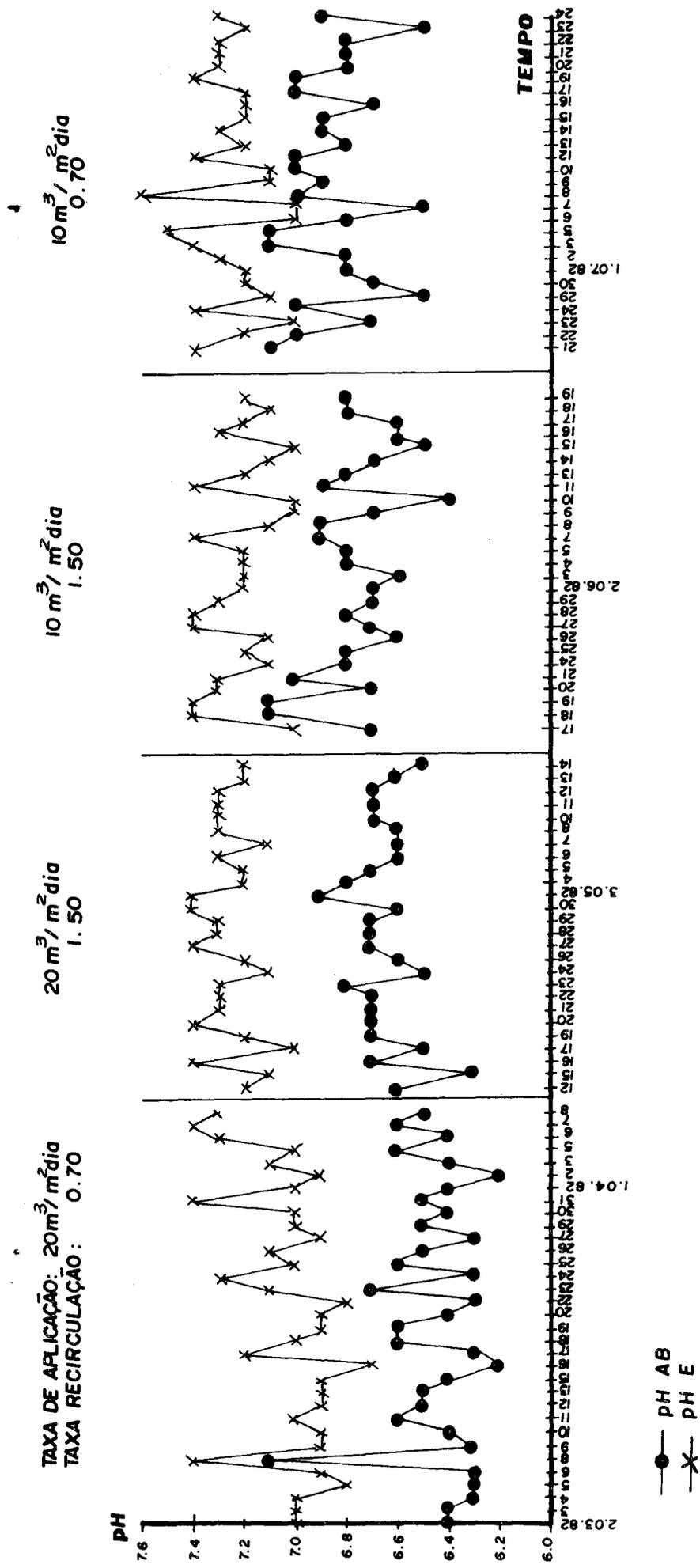
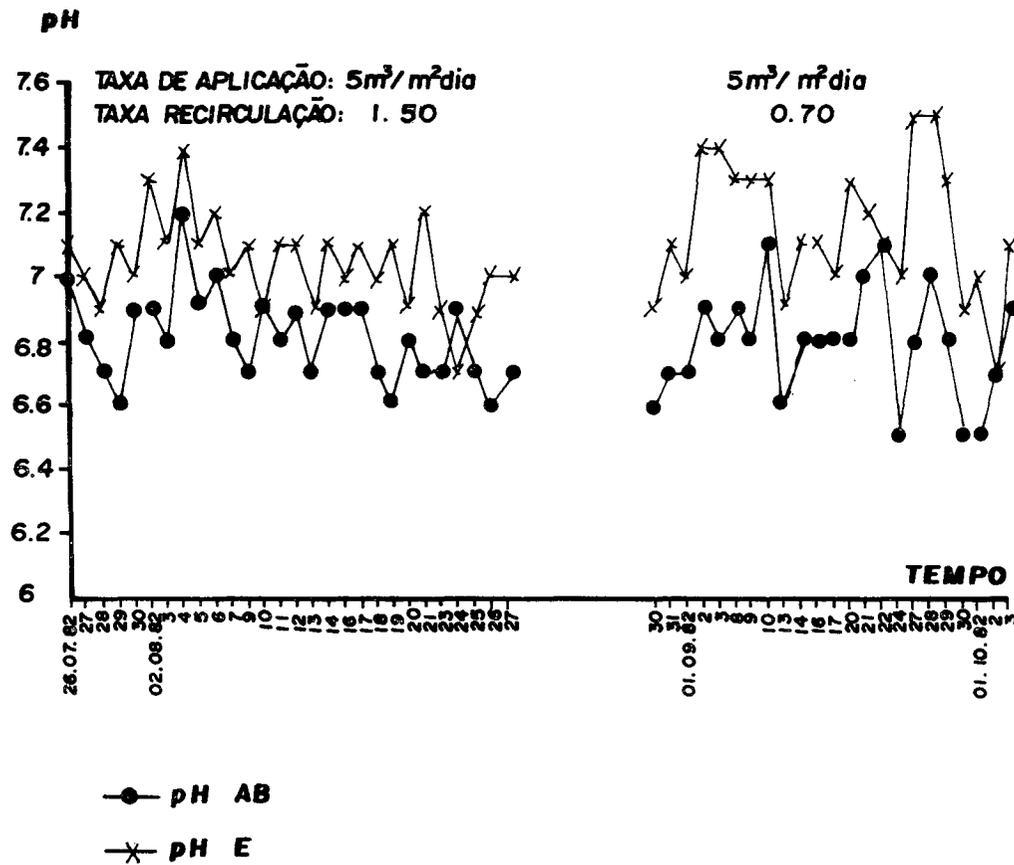


Fig. 4.16 - VARIACÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.



CONT.

Fig. 4.16 - VARIAÇÃO DO pH AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

A alcalinidade, no geral, diminuiu com o tratamento (fig. 4.17). Esse decréscimo tende a ser menor com o aumento da taxa de aplicação e recirculação. Considerando-se Δ a diferença entre a alcalinidade afluente e efluente verifica-se que há uma ligação com o tempo de detenção (fig. 4.20). Quanto maior o tempo, maior será Δ , isto é, há melhores condições para a reação entre o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos organismos do filtro com a alcalinidade dos esgotos (36).

A variação da condutividade elétrica ao longo do tempo é mostrada na figura 4.19. Observa-se que a condutividade diminui com o tratamento. Os picos altos observados devem-se aos dias em que a coleta foi feita após horário normal e os picos baixos à chuva durante a coleta.

Não houve uma tendência bem definida entre remoção de substrato e temperatura, nem entre remoção de substrato e oxigênio dissolvido do efluente como pode ser observado pela figura 4.21. Isso pode sugerir que a temperatura não influencia o desempenho do filtro biológico quando operado com recirculação.

As figuras 4.22 e 4.23 referem-se ao desempenho do filtro quanto à remoção de DBO e DQO. As retas foram obtidas através do método dos mínimos quadrados. As retas R e E significam como se comporta a remoção e o efluente quando se aumenta a carga aplicada (x).

TAXA DE APLICAÇÃO: 20m³/m²dia
TAXA RECIRCULAÇÃO: 0.70

20m³/m²dia
1.50

10m³/m²dia
1.50

10m³/m²dia
0.70

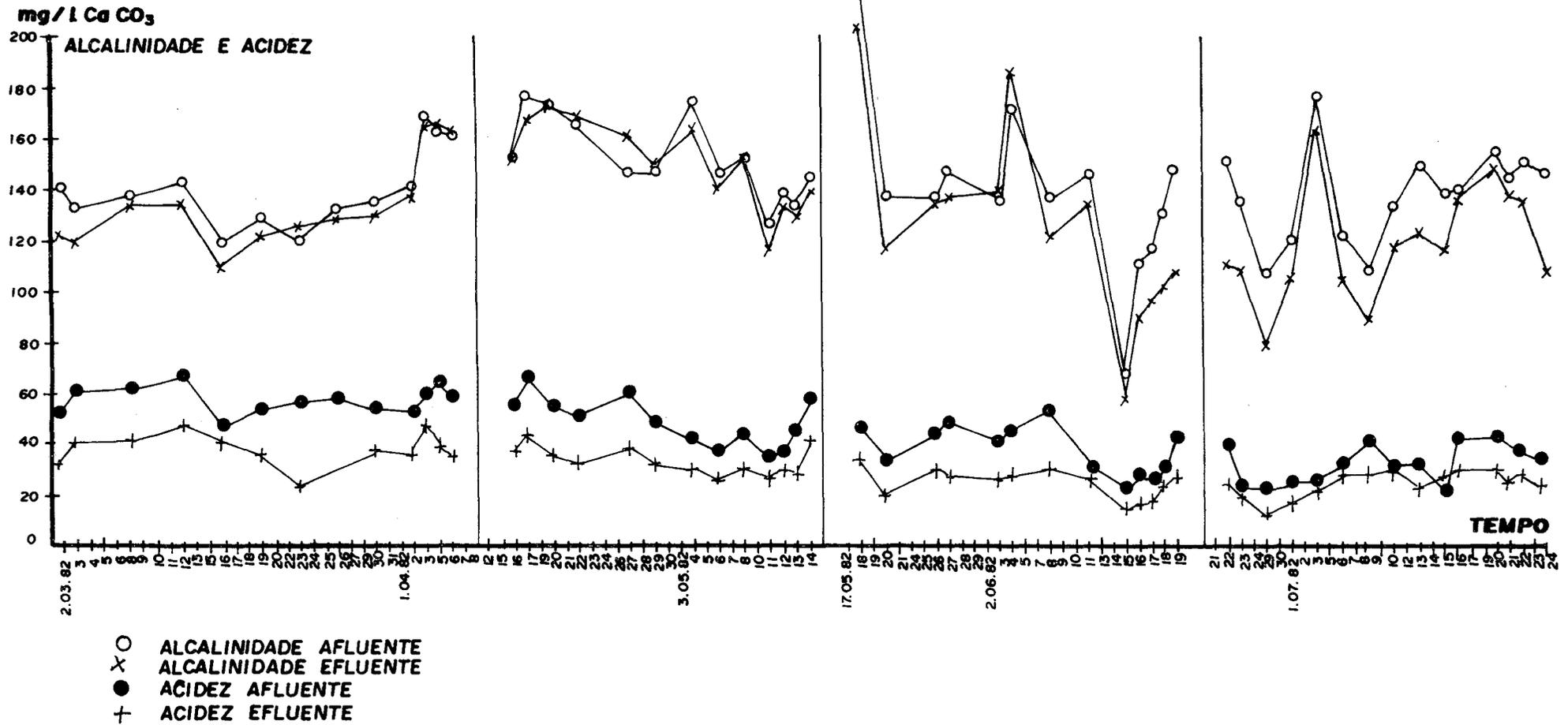
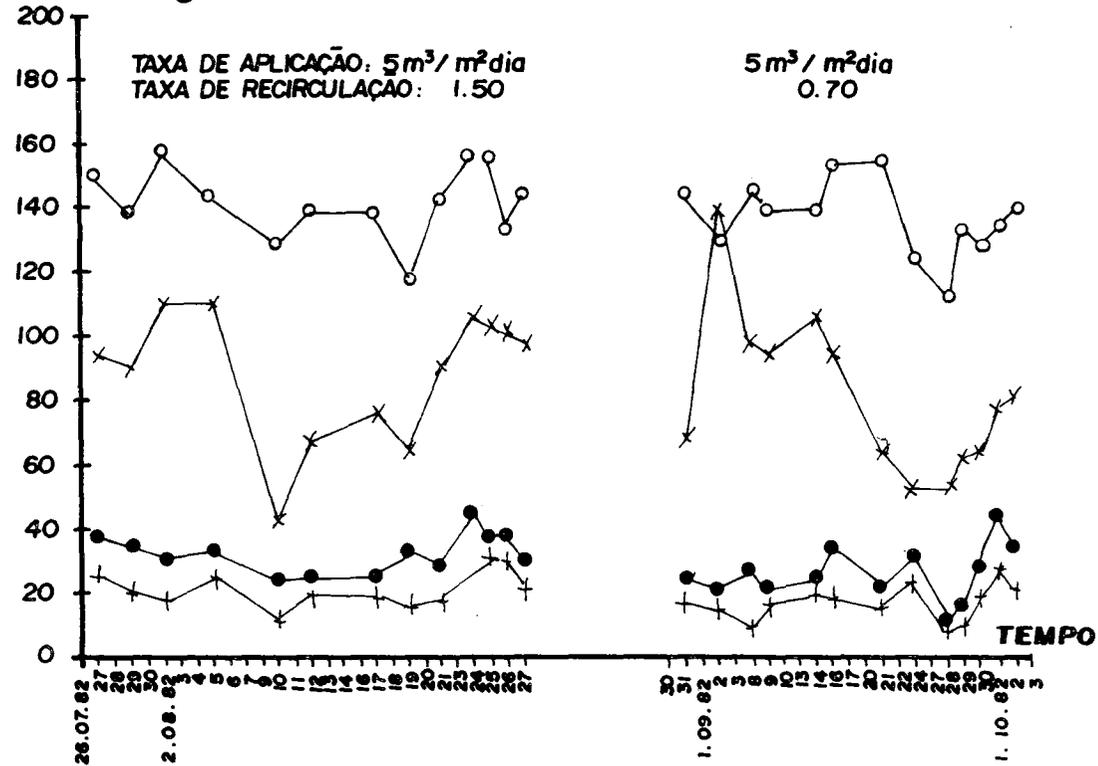


Fig. 4.17 - VARIÇÃO DA ALCALINIDADE E ACIDEZ AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

ALCALINIDADE ACIDEZ

mg / l CaCO₃



- ALCALINIDADE AFLUENTE
- ×— " EFLUENTE
- ACIDEZ AFLUENTE
- +— " EFLUENTE

CONT.

Fig. 4.17- VARIAÇÃO DA ALCALINIDADE E ACIDEZ AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

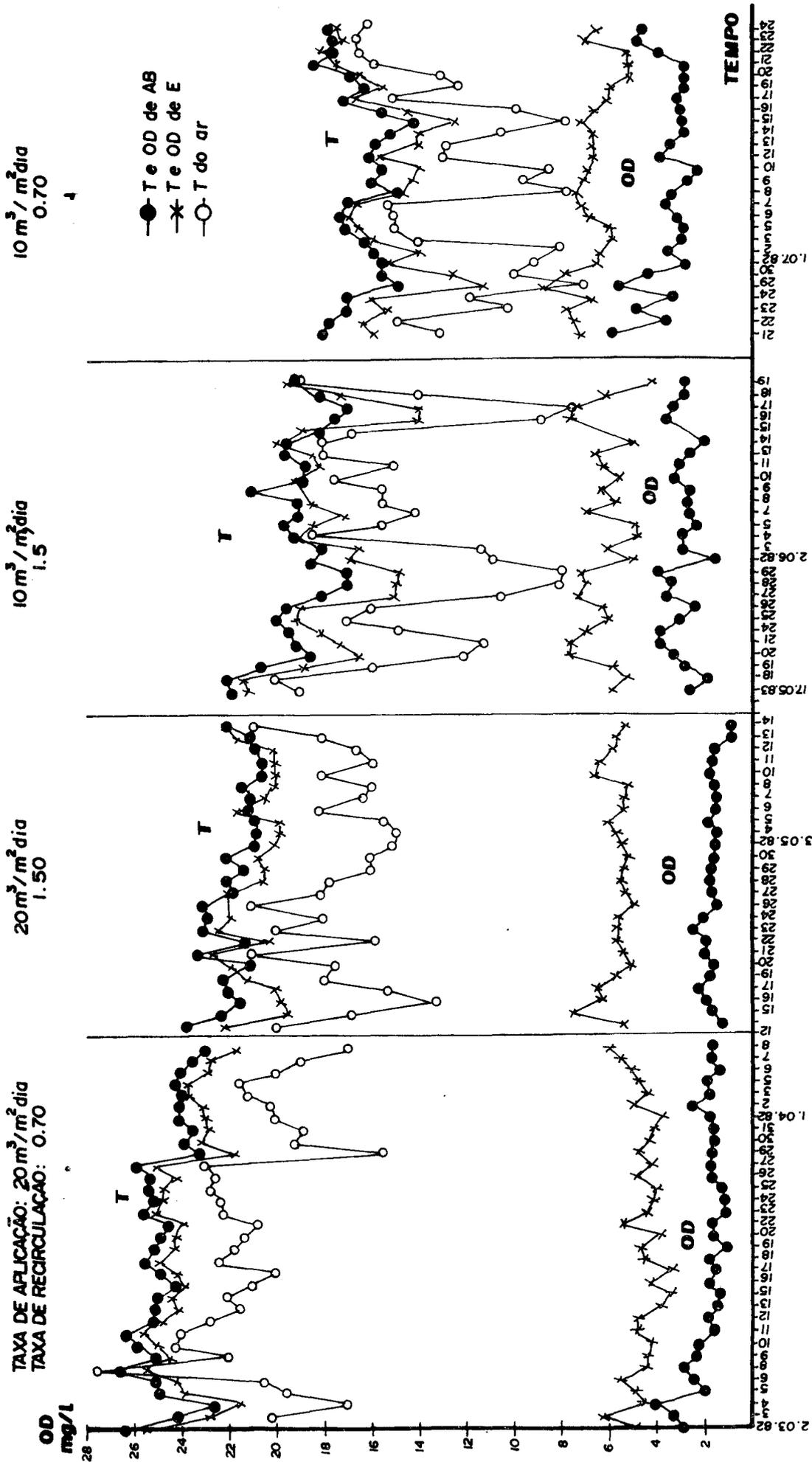
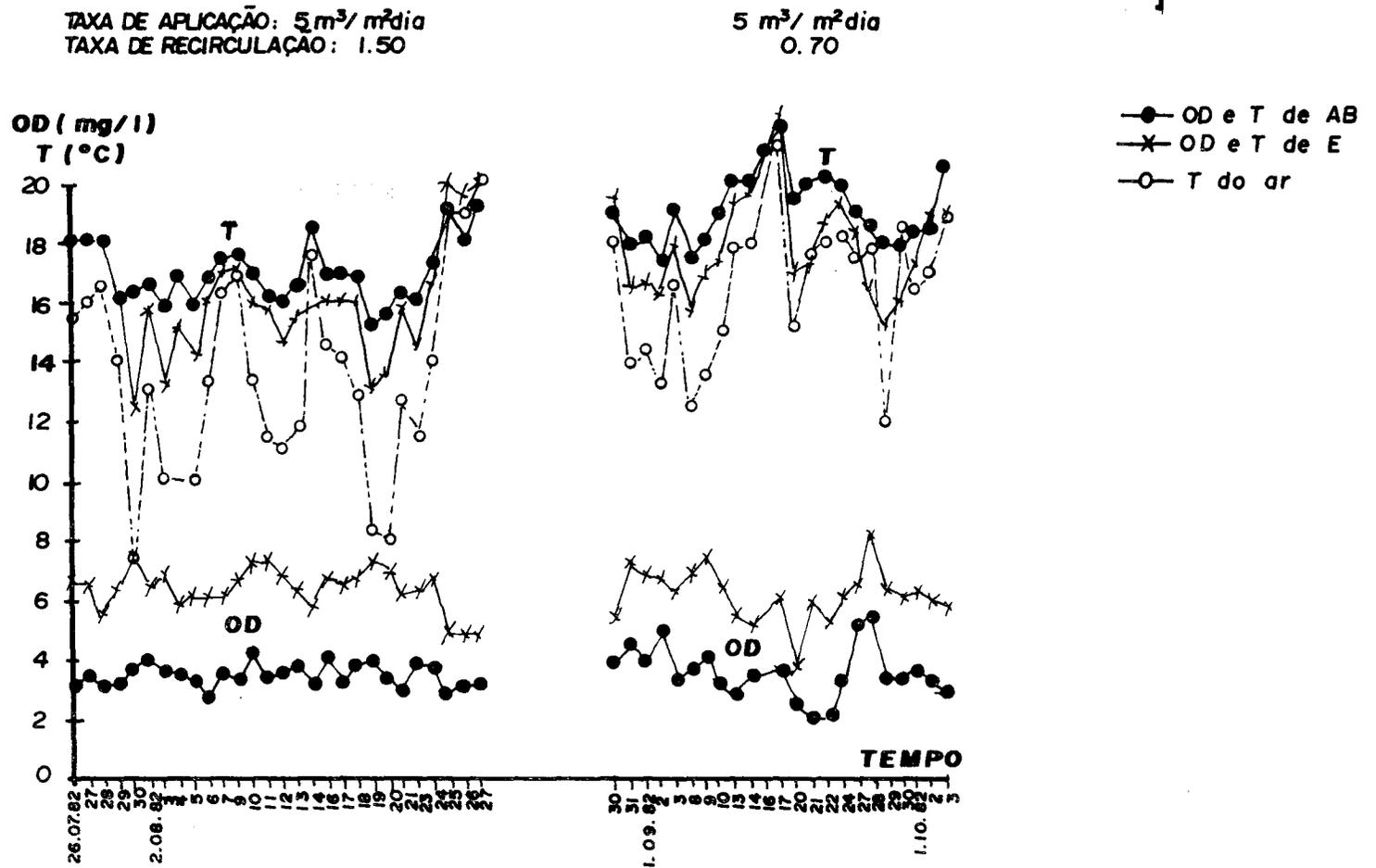


Fig. 4.18 - VARIACÃO DO OD E TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.



CONT.

Fig. 4.18 - VARIAÇÃO DO OD E TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
 $\mu\Omega / \text{cm}$

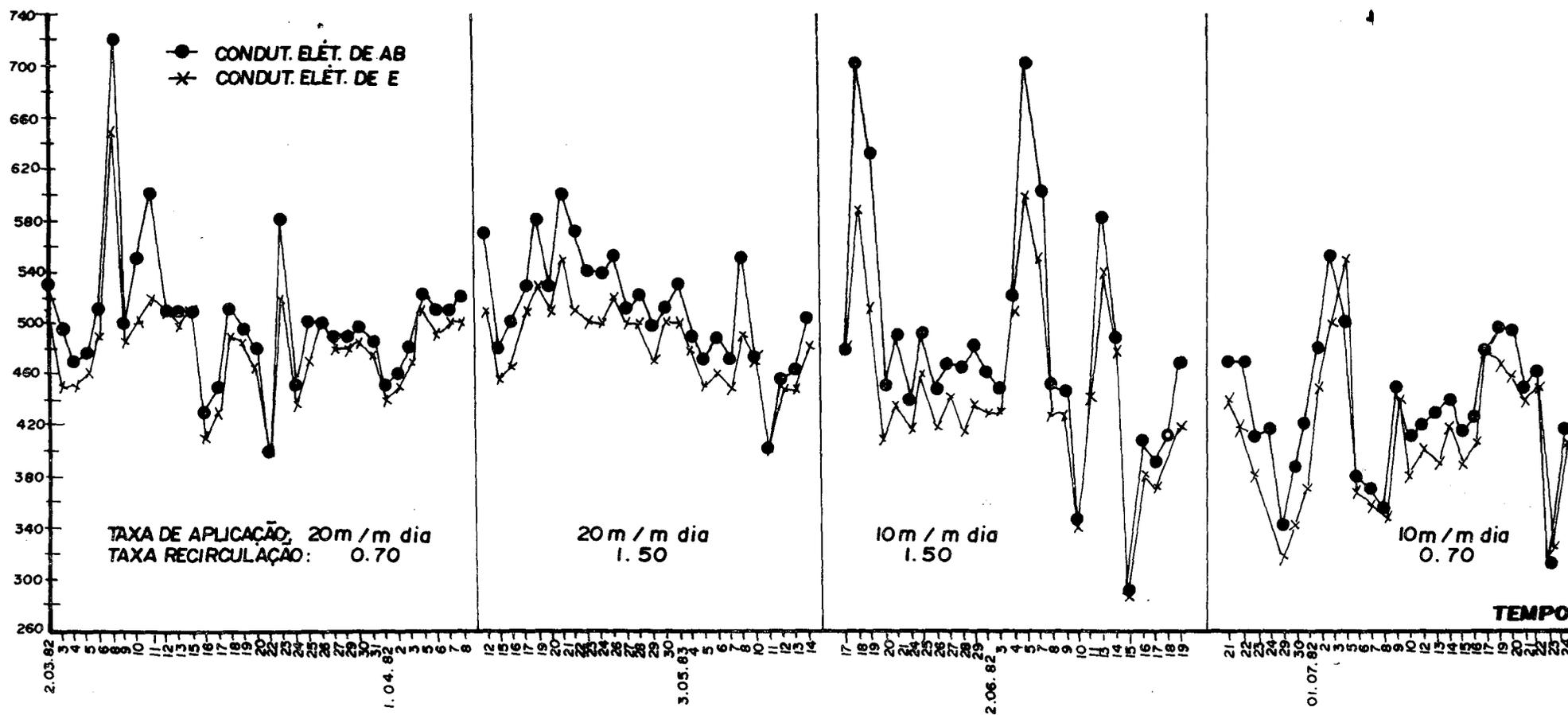
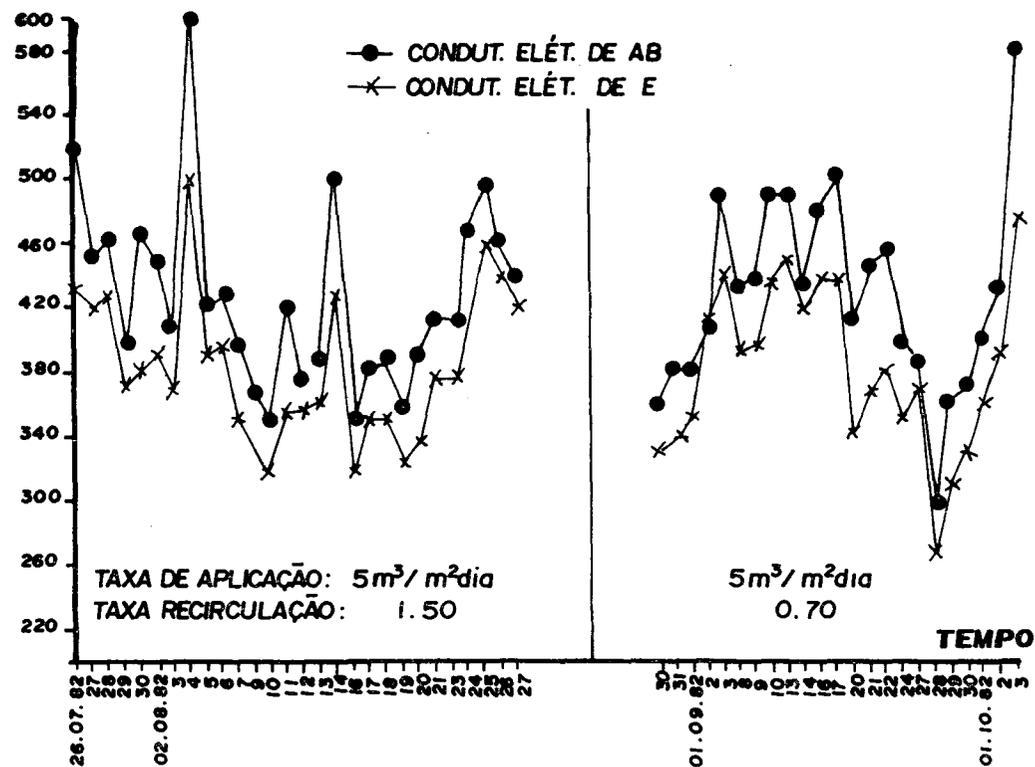


Fig. 4.19 - VARIACÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

CÔNDUTIVIDADE ELÉTRICA $\mu A / cm$



CONT.

Fig. 4.19 - VARIACÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA AO LONGO DO TEMPO COM RECIRCULAÇÃO.

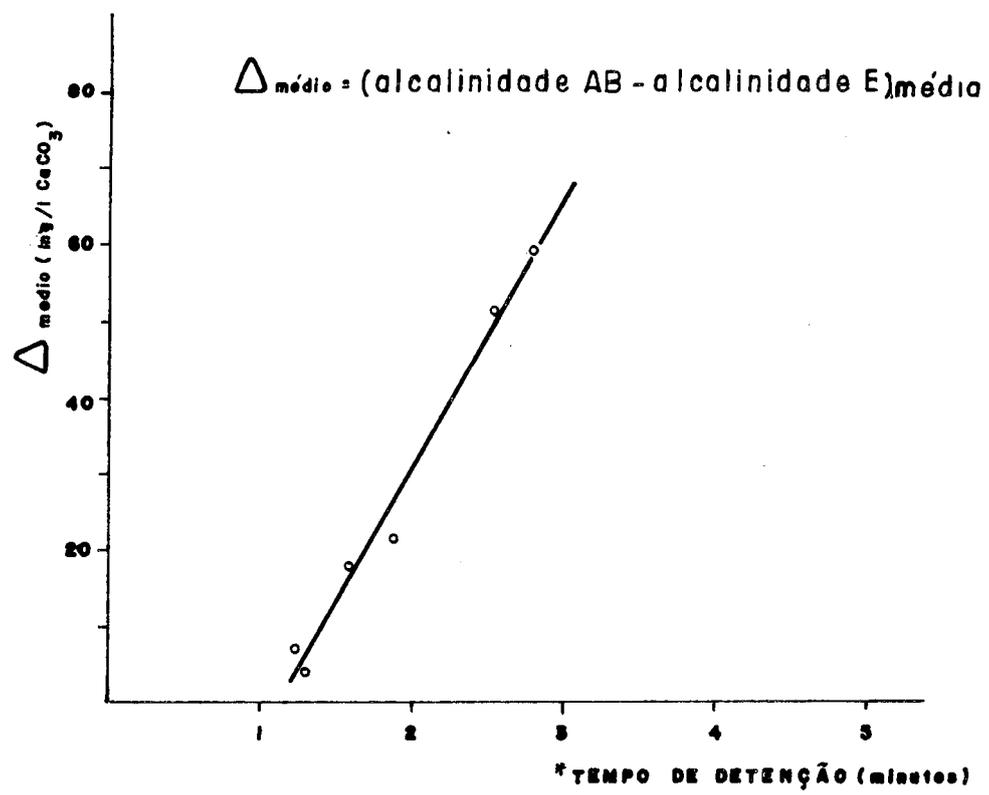
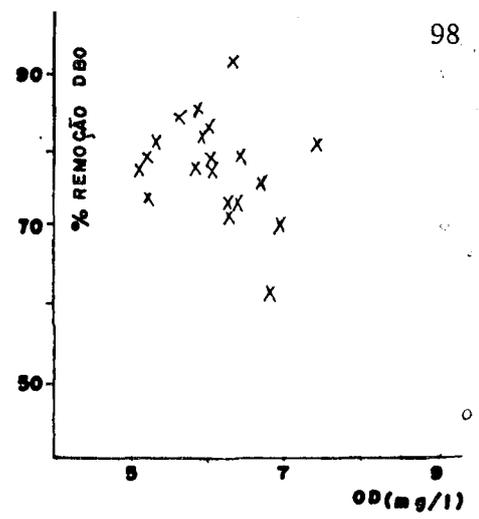
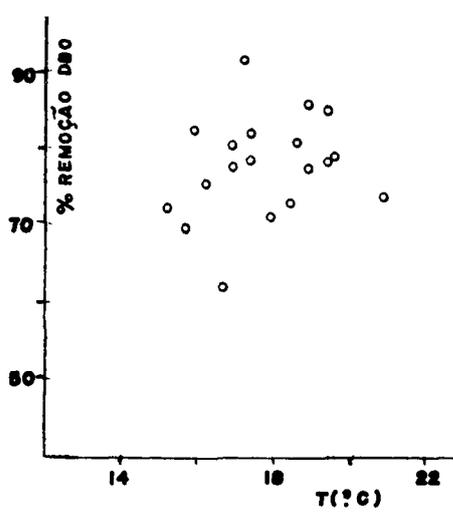
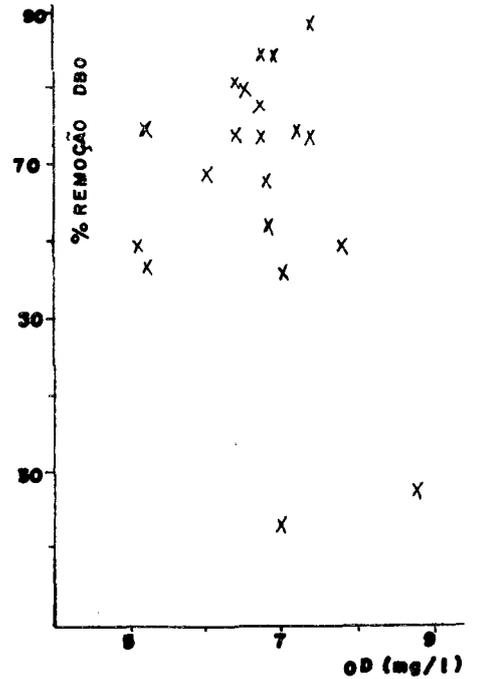
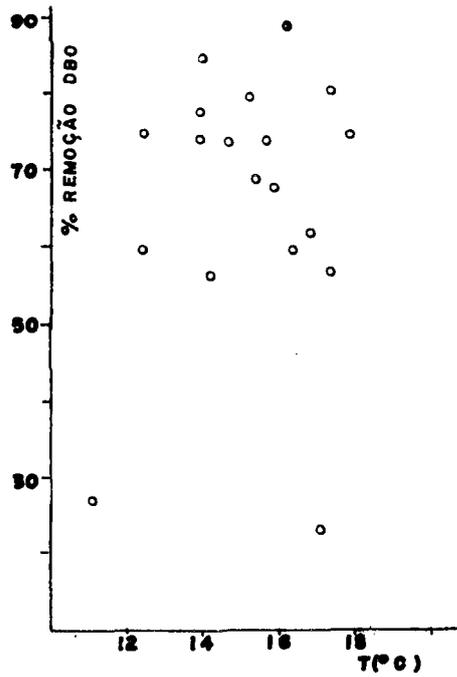


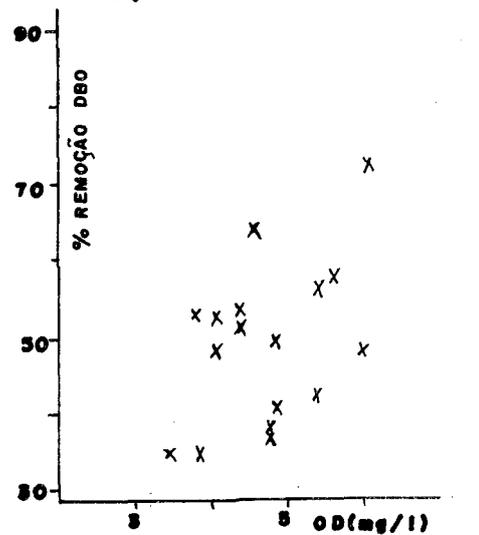
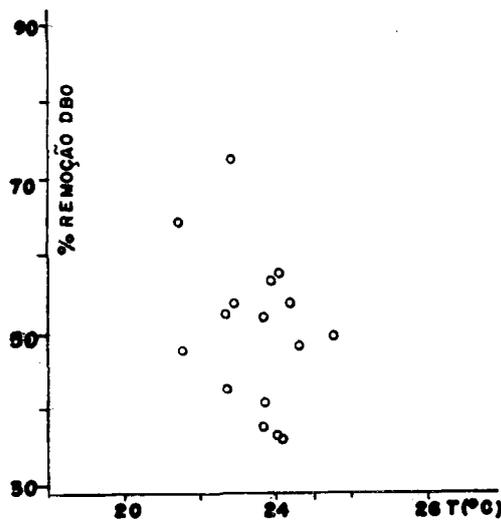
Fig. 4.20 - Relação entre $\Delta_{\text{médio}}$ e tempo de detenção com recirculação
(*COLUNA 3 do QUADRO 3.2)



T. A = 5 m³/m².dia - r = 0,70



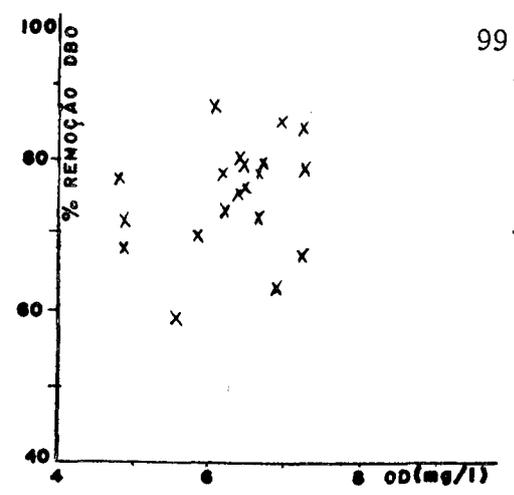
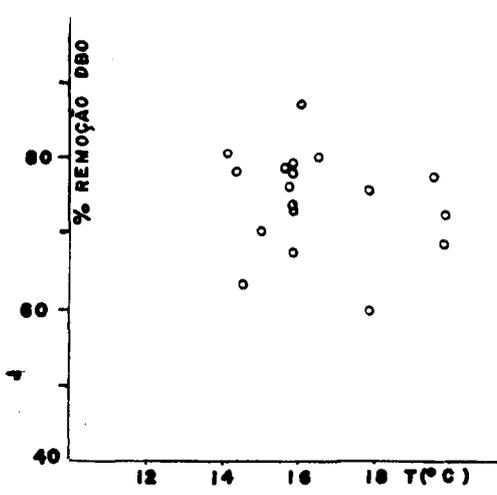
T. A = 10 m³/m².dia - r = 0,70



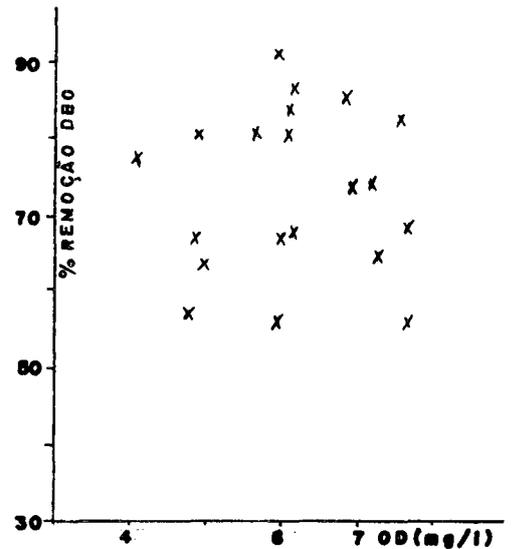
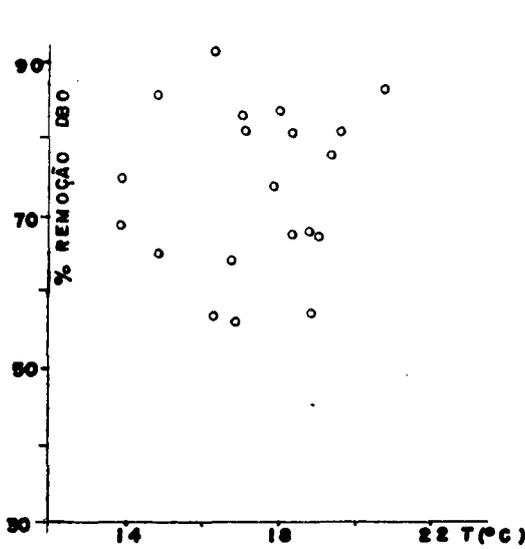
T. A = 20 m³/m².dia - r = 0,70

Fig. 4.21 - Efeito da temperatura sobre a remoção de DBO₅ (°)

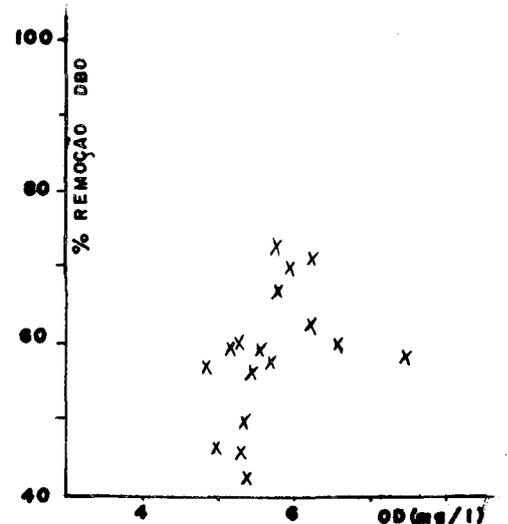
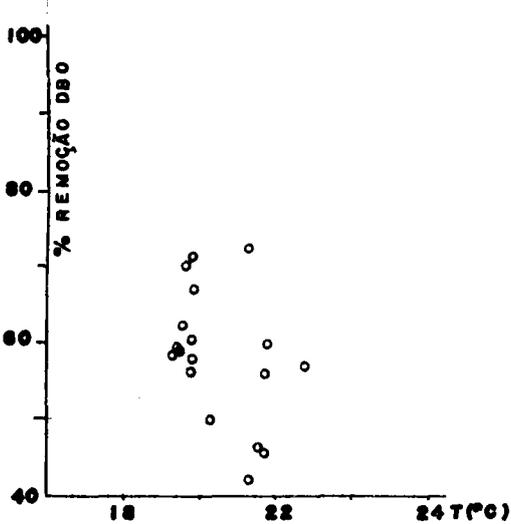
Remoção da DBO em relação ao ODefluente (x)



TA = 5 m³/m².dia r = 1,50



TA = 10 m³/m².dia r = 1,50



TA = 20 m³/m².dia r = 1,50

cont.
 Fig.4.21- Efeito da temperatura sobre a remoção de DBQ₅(°)
 Remoção da DBQ₅ em relação ao ODefluente (x)

Para a obtenção da carga aplicada ao filtro foi considerado somente a DBO e DQO proveniente do decantador primário.

A remoção e o efluente aumentam com o aumento da carga de DQO e DBO aplicada. As inclinações das retas de remoção de DBO foram decrescentes com o aumento da taxa de aplicação para uma mesma taxa de recirculação. Na remoção de DQO com taxa de recirculação de 0,70 as inclinações tiveram valores muito próximos e com taxa de recirculação de 1,50 tiveram valores diferenciados sem nenhuma ordem definida.

Das retas teóricas R e E, da figura 4.22 referentes a carga de DBO aplicada depreende-se que para concentração afluente (mg/l) e taxa de aplicação iguais, o aumento da taxa de recirculação provoca uma diminuição da % de remoção de DBO para as taxas de aplicação de 5 e 10 m³/m² dia. Por exemplo, com concentração afluente de 128 mg/l e taxa de 0,70 a remoção foi de 80,7 e 73,8% contra 74,2% e 72,2% na taxa de recirculação de 1,50. Na taxa de aplicação maior ocorreu o inverso, passou de 47,2 para 58,2% correspondentes a taxa de recirculação de 0,70 e 1,50 respectivamente.

As figuras 4.24 e 4.26 mostram a remoção de DBO e DQO em relação a carga orgânica aplicada. As concentrações de DBO e DQO no efluente de acordo com a carga orgânica aplicada estão ilustradas nas figuras 4.25 e 4.27.

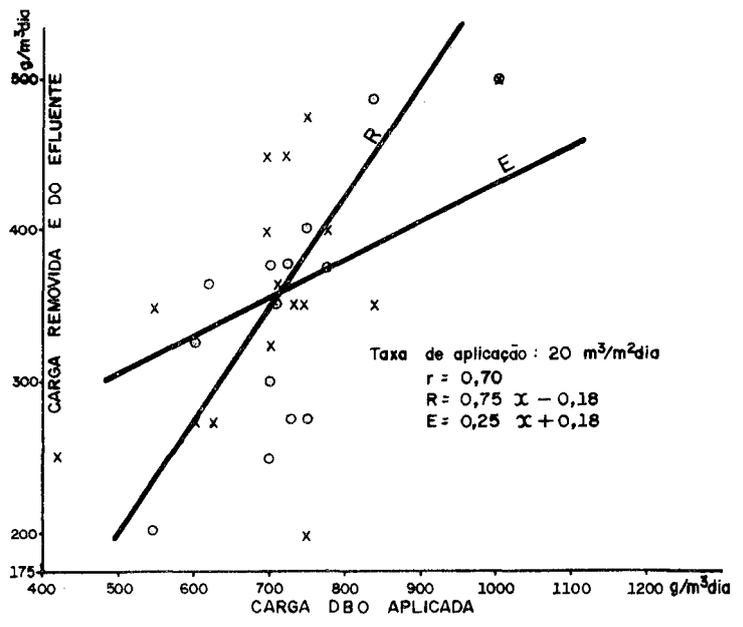
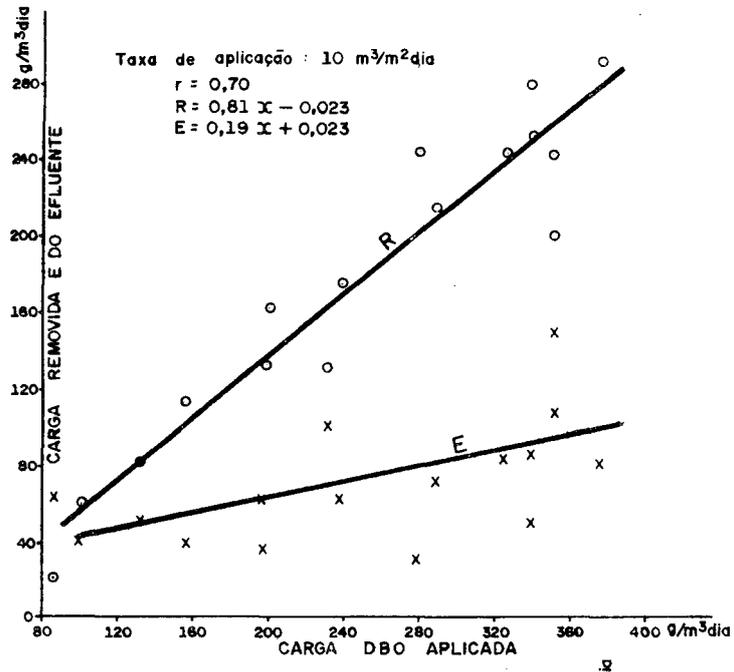
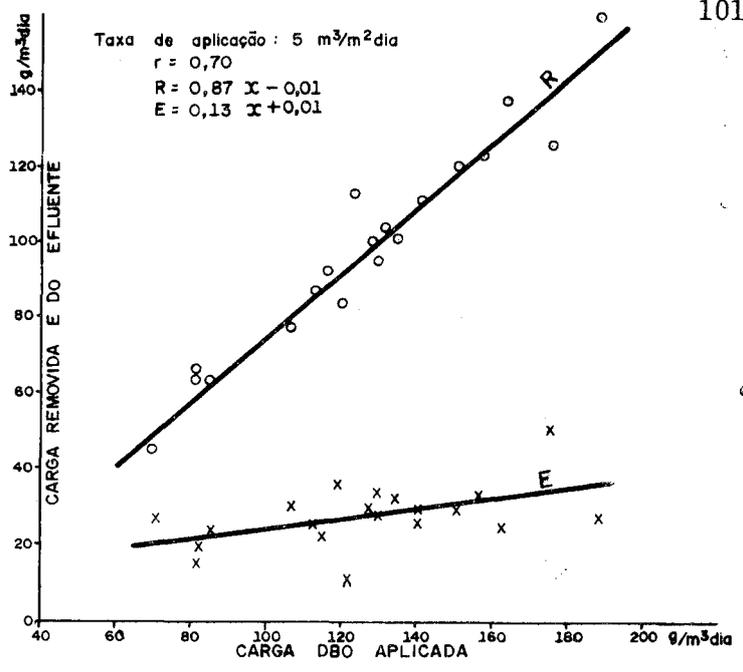
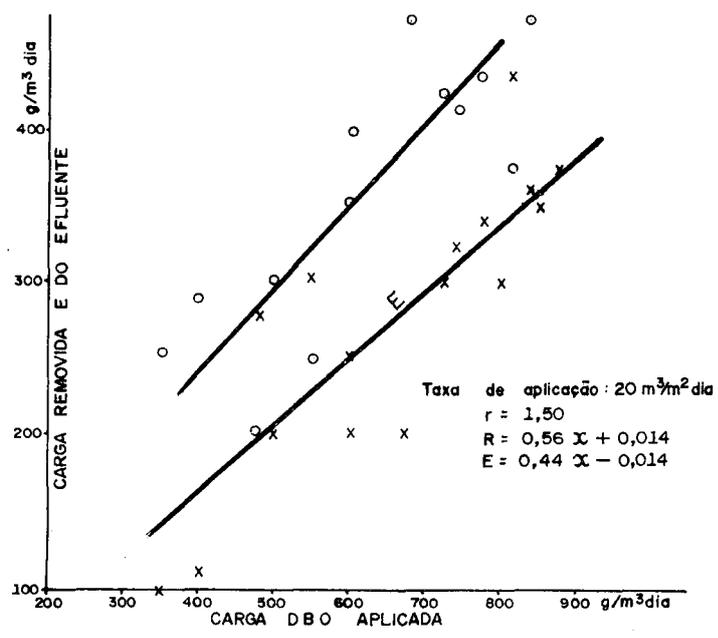
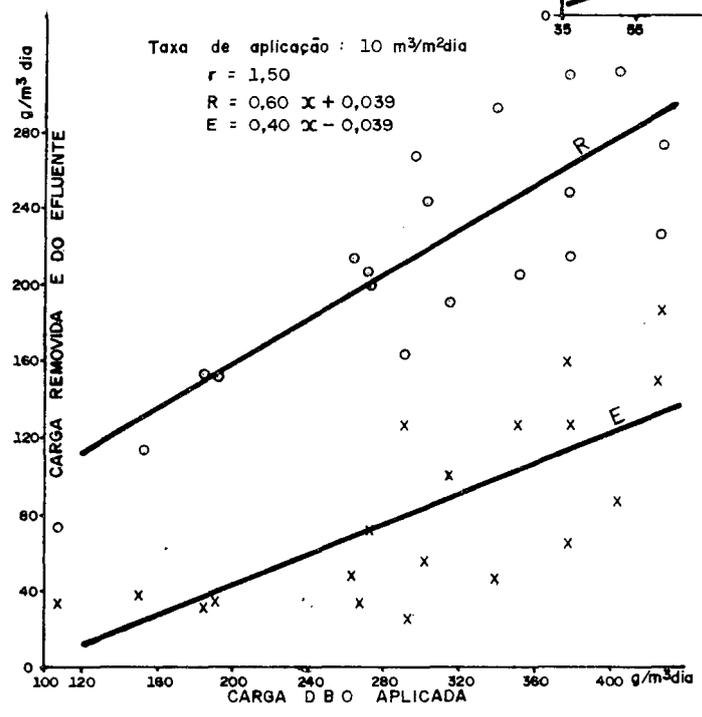
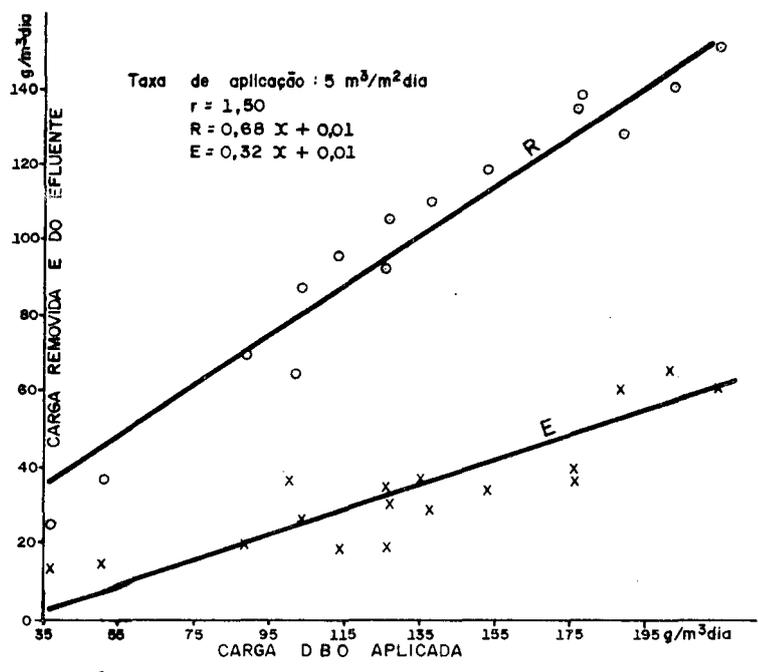


FIG.4.22-Desempenho do filtro em relação a carga de DBO aplicada com recirculação (x = carga aplicada em kg/m³ dia).



cont.
FIG. 4.22-Desempenho do filtro em relação a carga de DBO aplicada com recirculação (X = carga aplicada em kg/m³ dia).

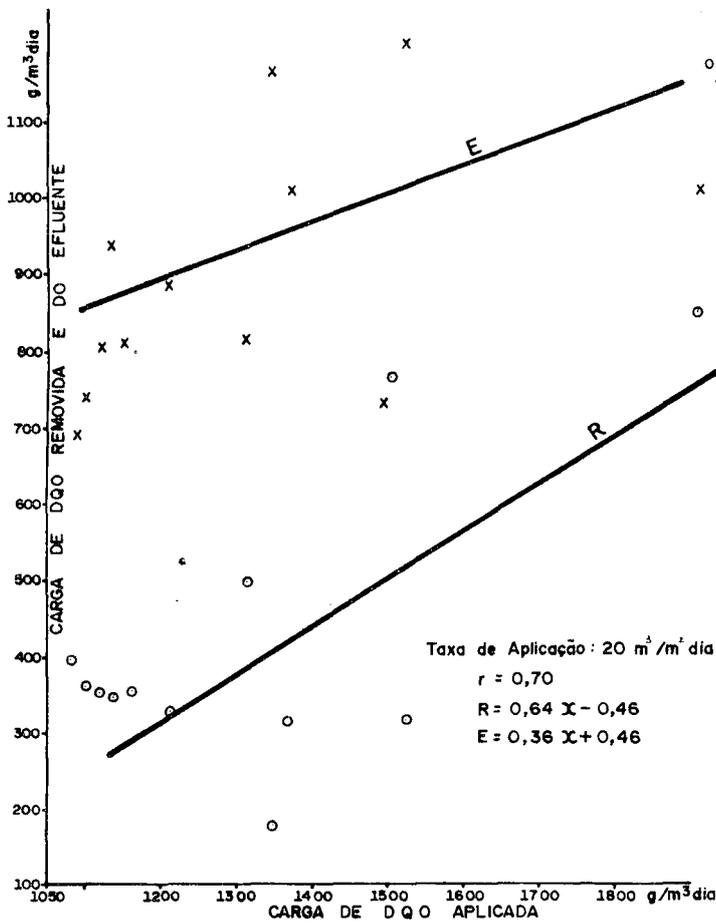
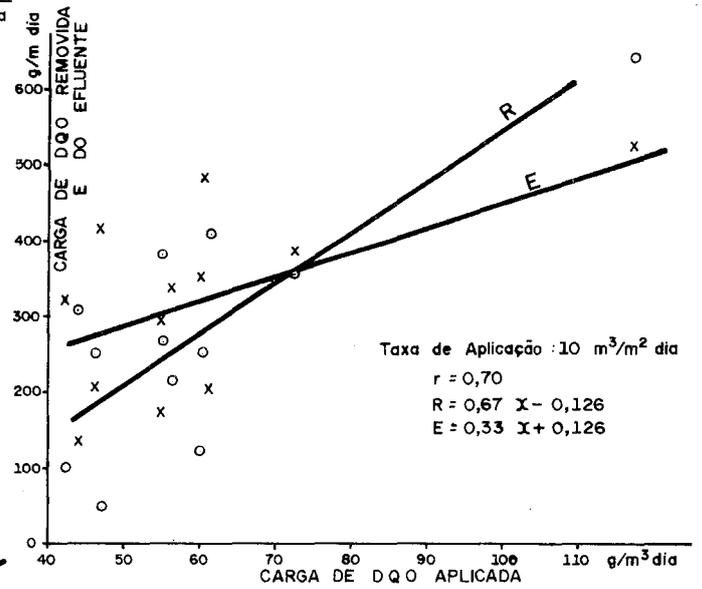
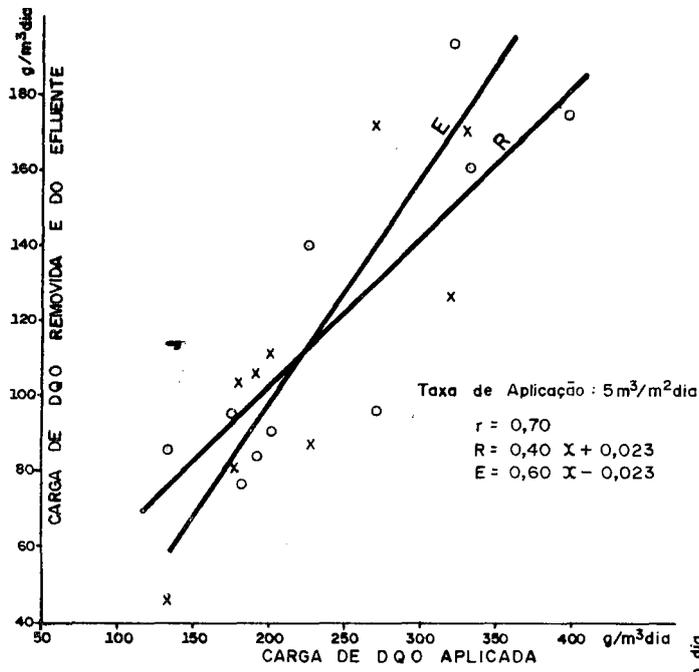
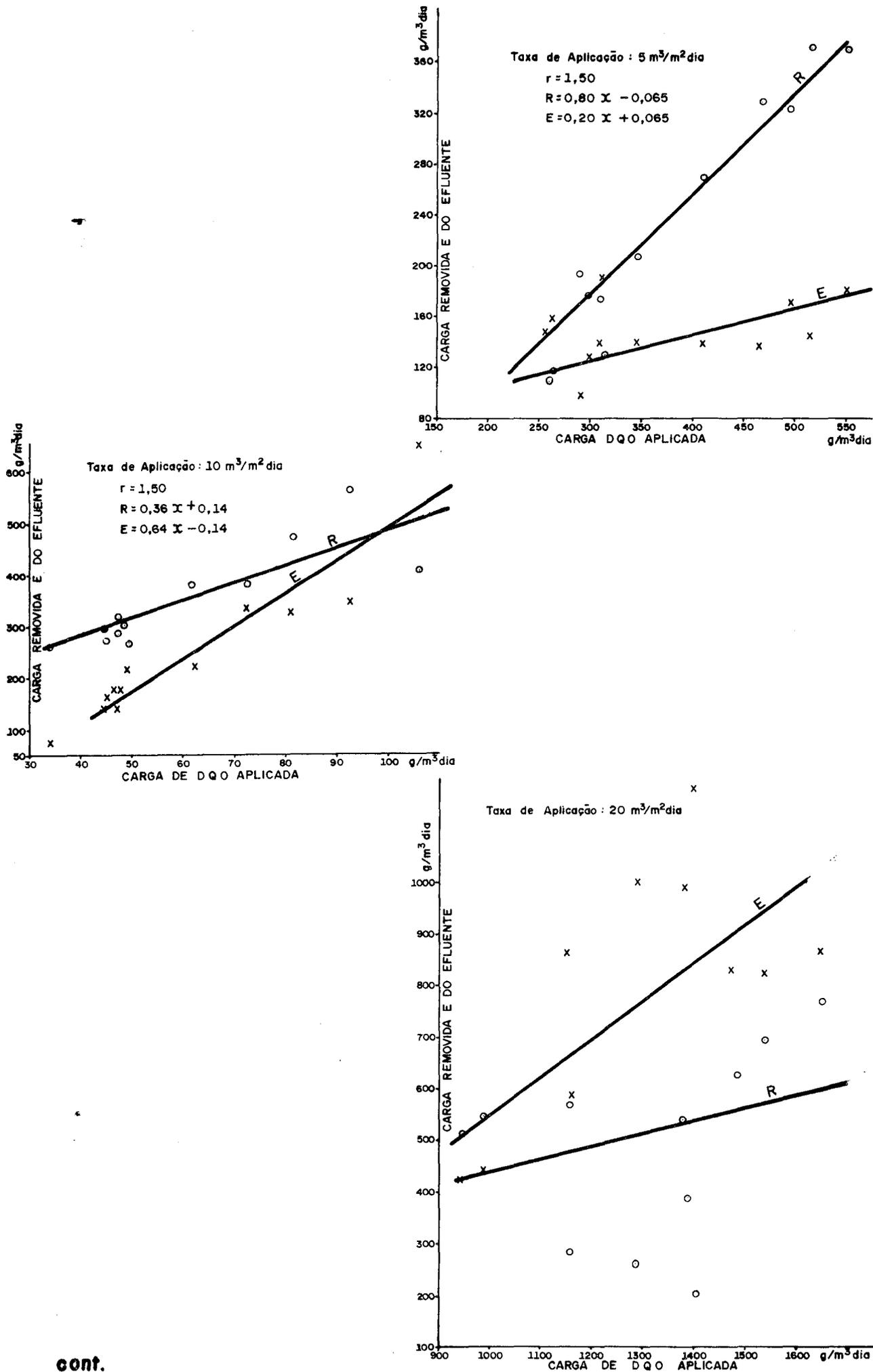
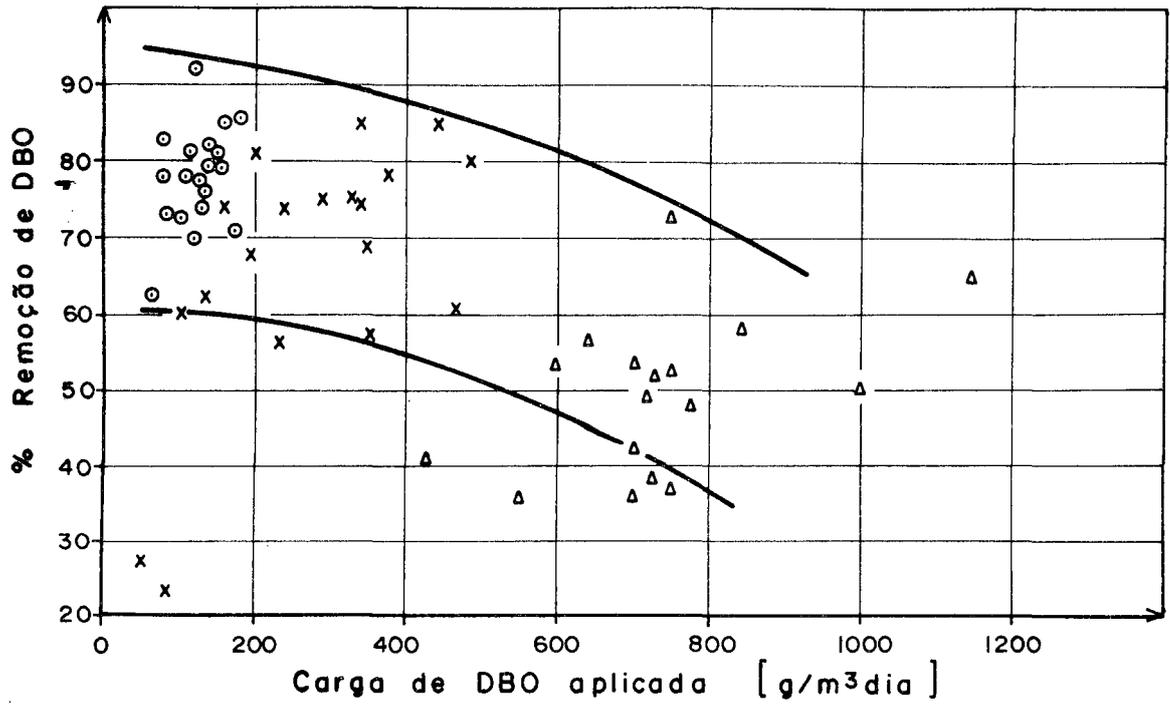


FIG. 4.23-Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada com recirculação - (X = carga aplicada em kg/m³ dia).

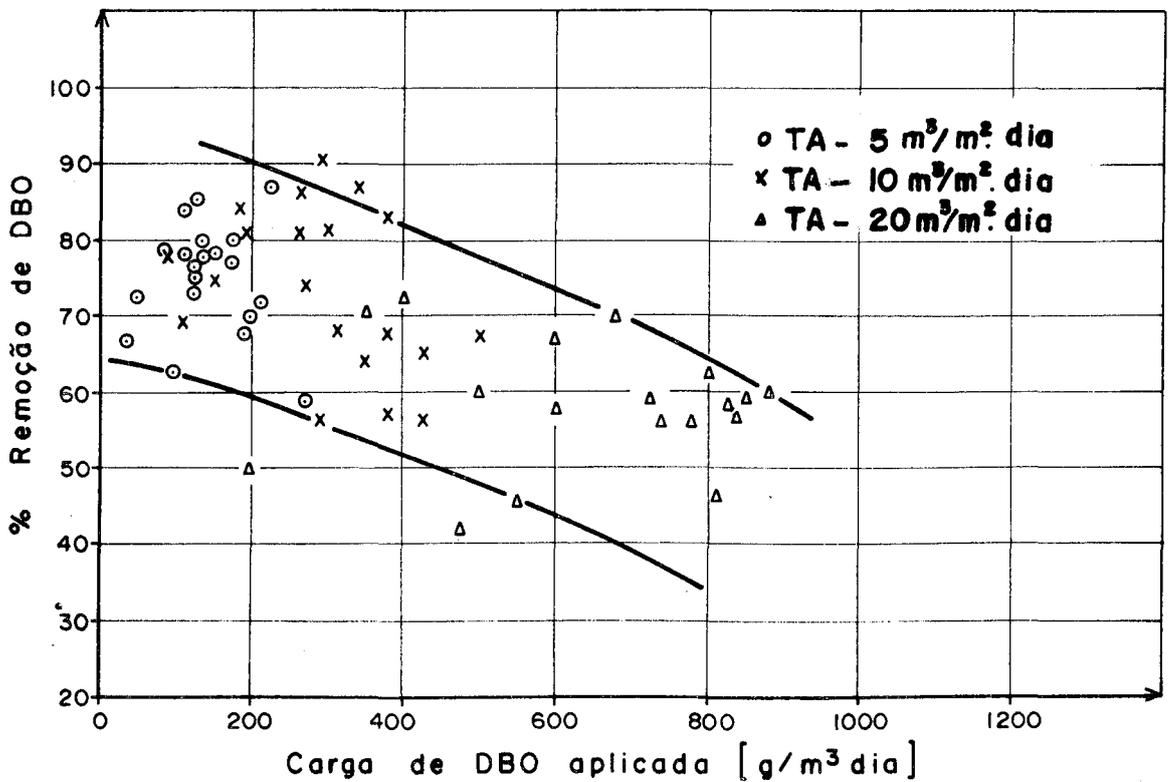


cont.

FIG.4.23 - Desempenho do filtro em relação a carga de DQO aplicada com recirculação - (X = carga aplicada em kg/m³ dia).

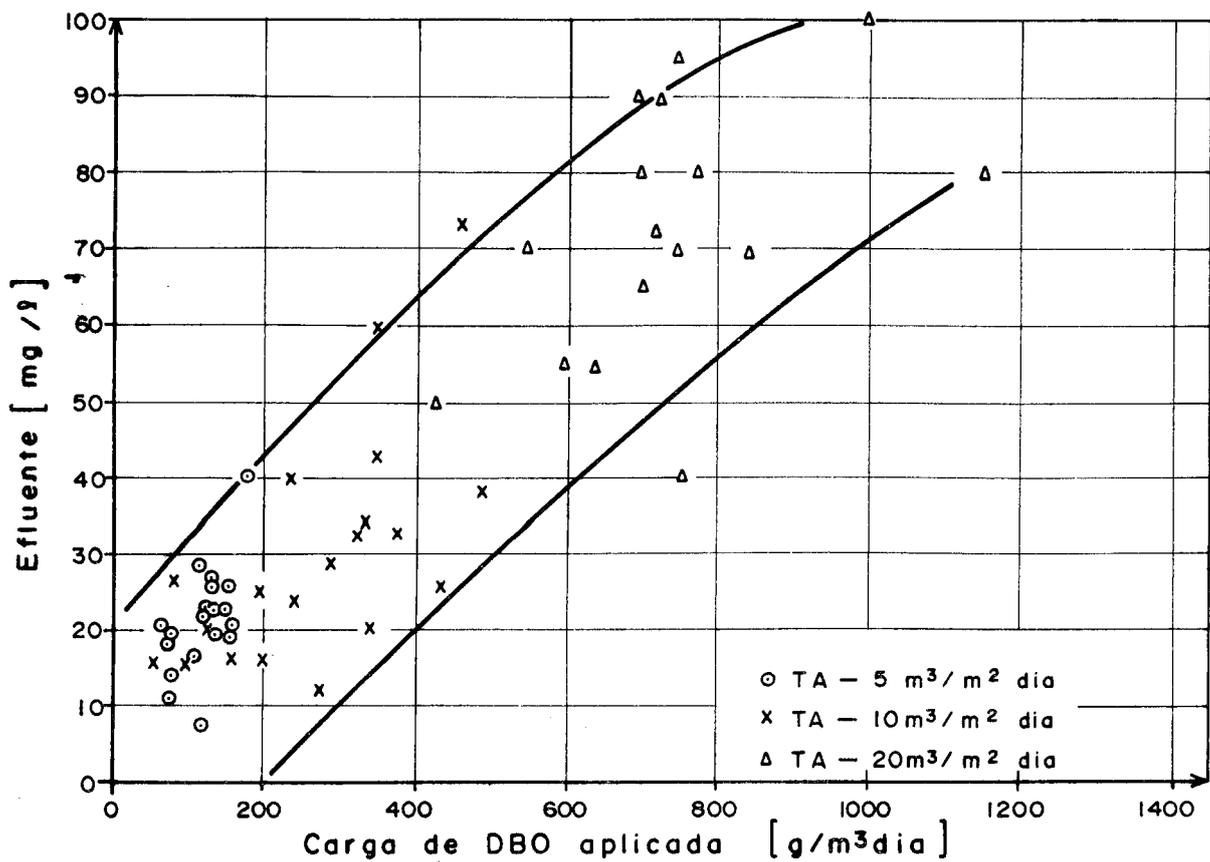


a - Com recirculação de 0,70

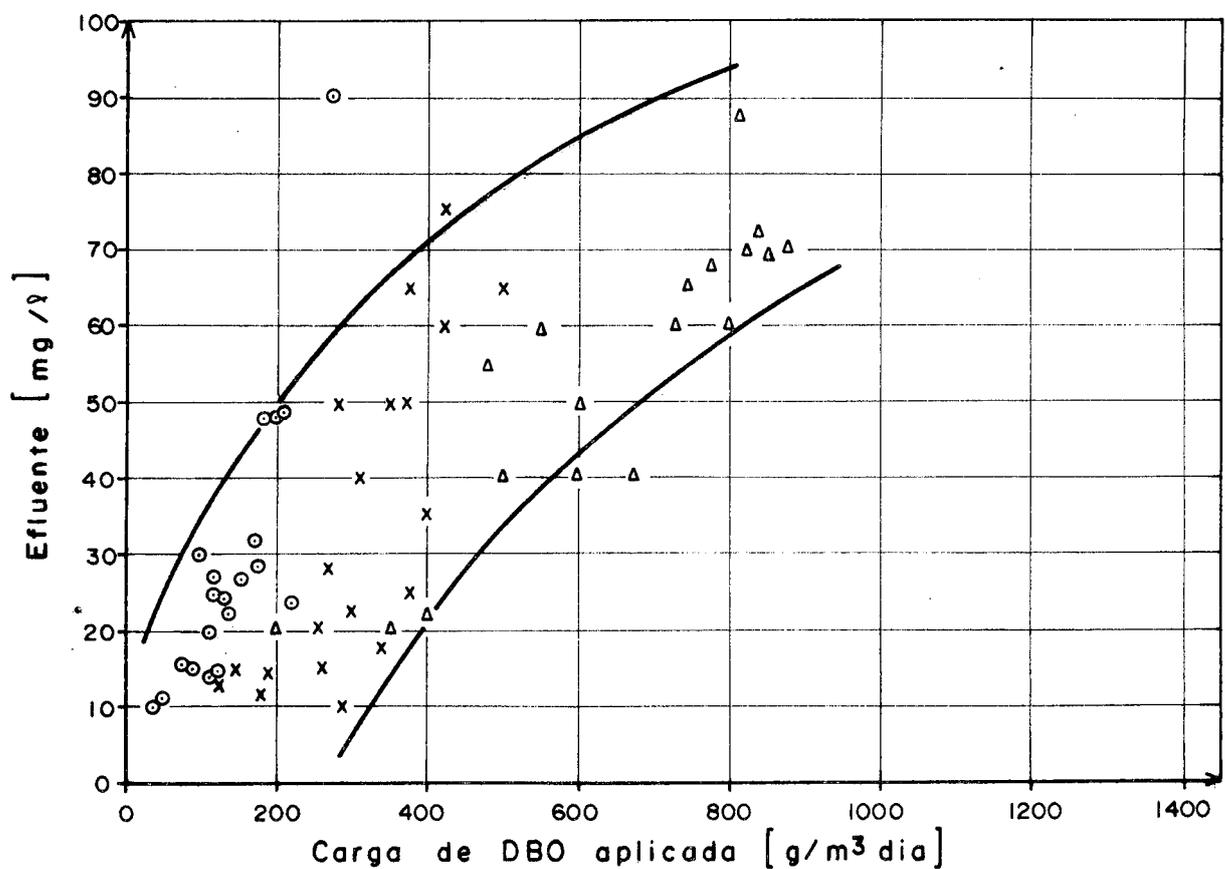


b - Com recirculação de 1,50

FIG. 4.24 - Remoção de DBO em relação a carga orgânica com recirculação.

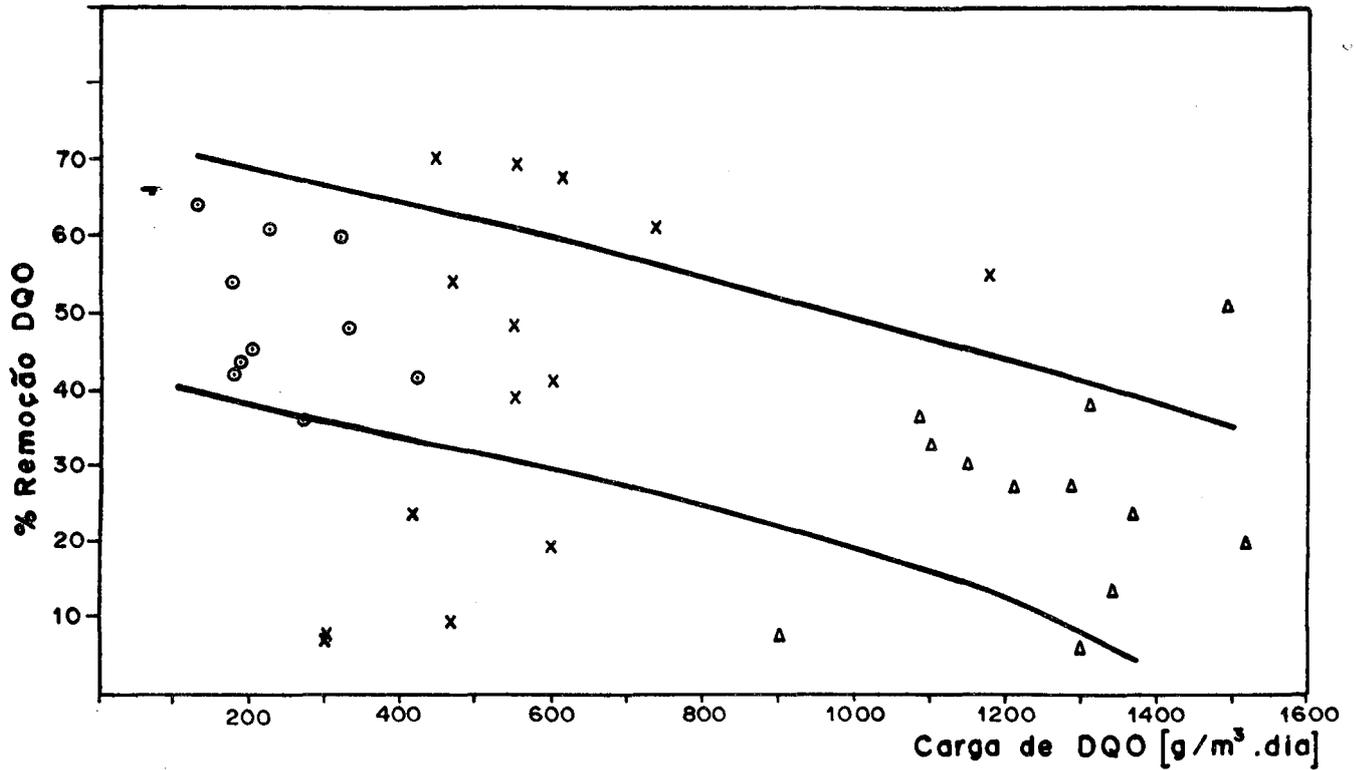


a - Com recirculação de 0,70

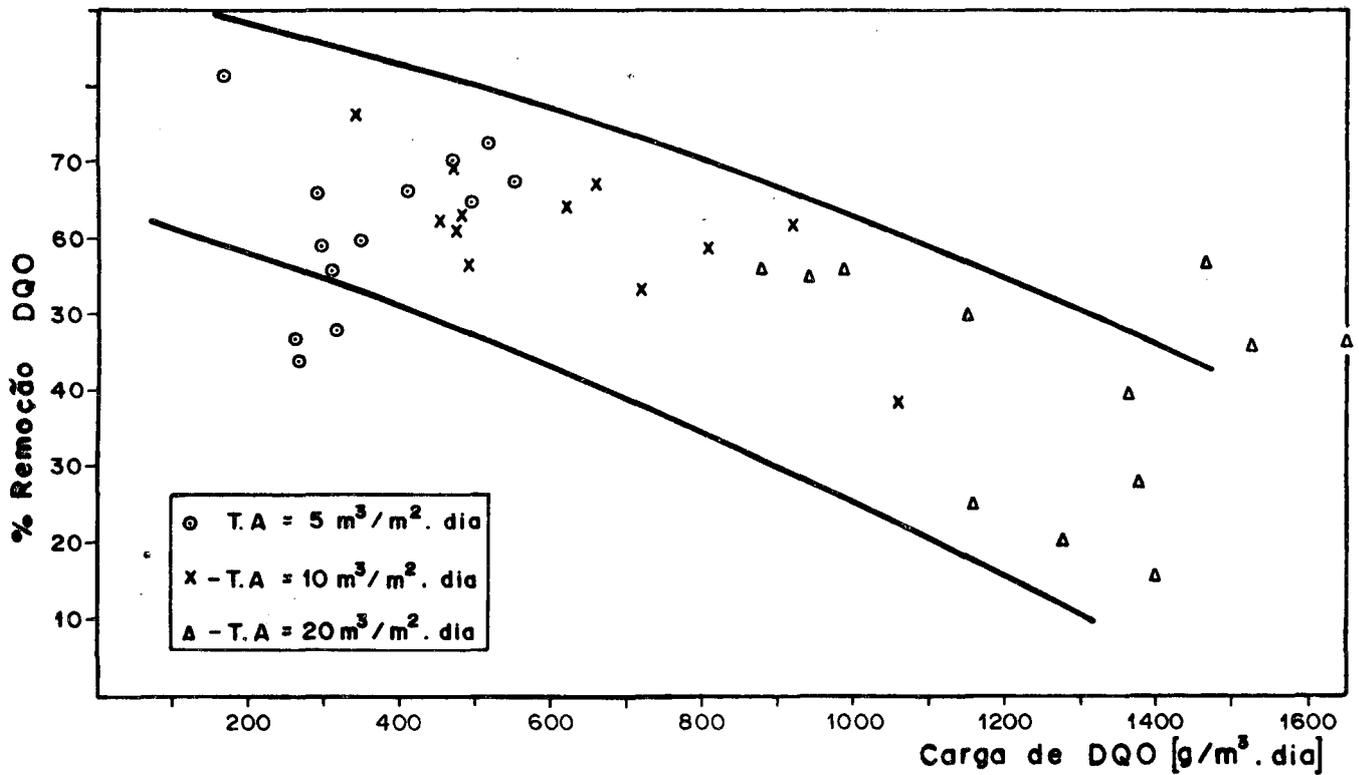


b - Com recirculação de 1,50

FIG. 4.25 - Concentração de DBOs no efluente em relação a carga aplicada - com recirculação.

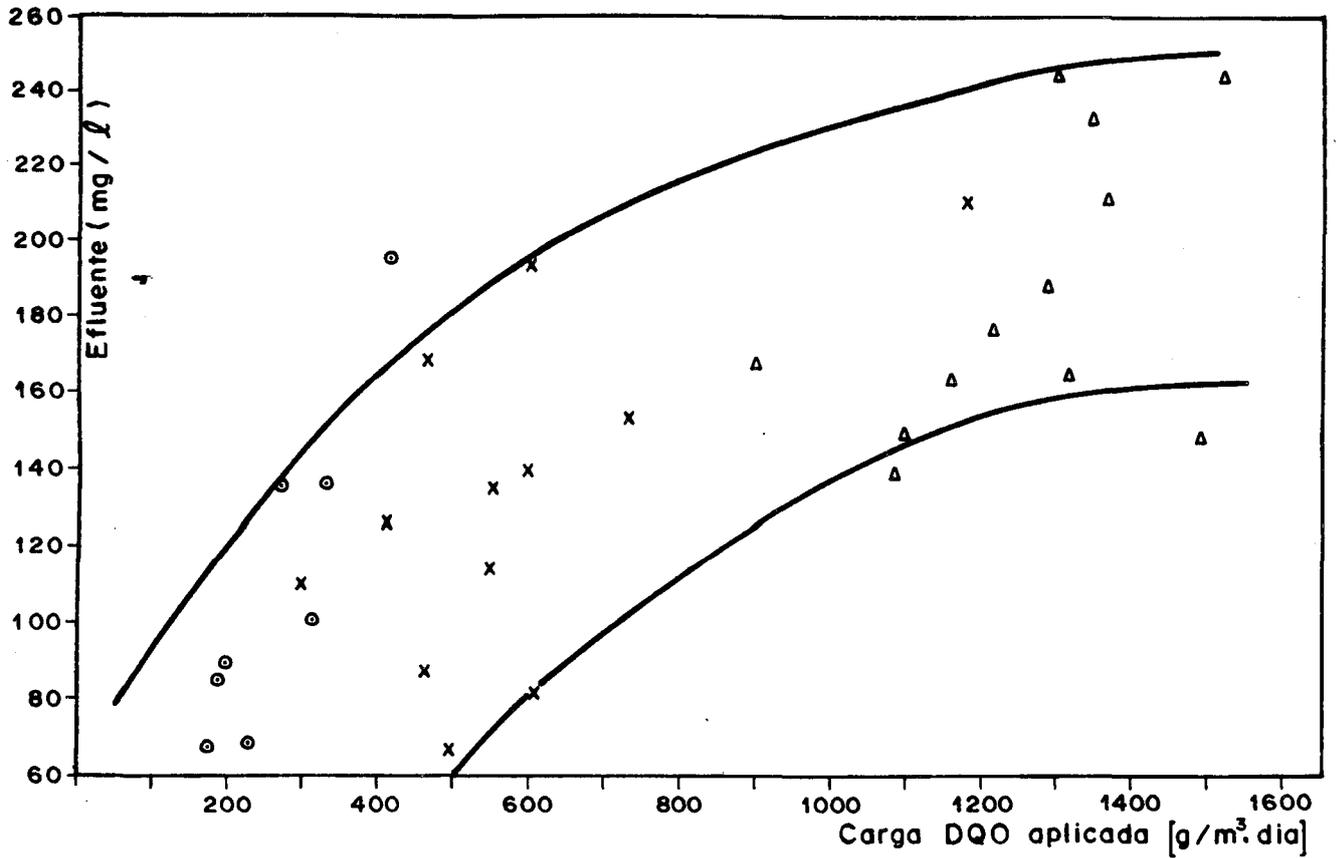


a - Com taxa de recirculação de 0,70

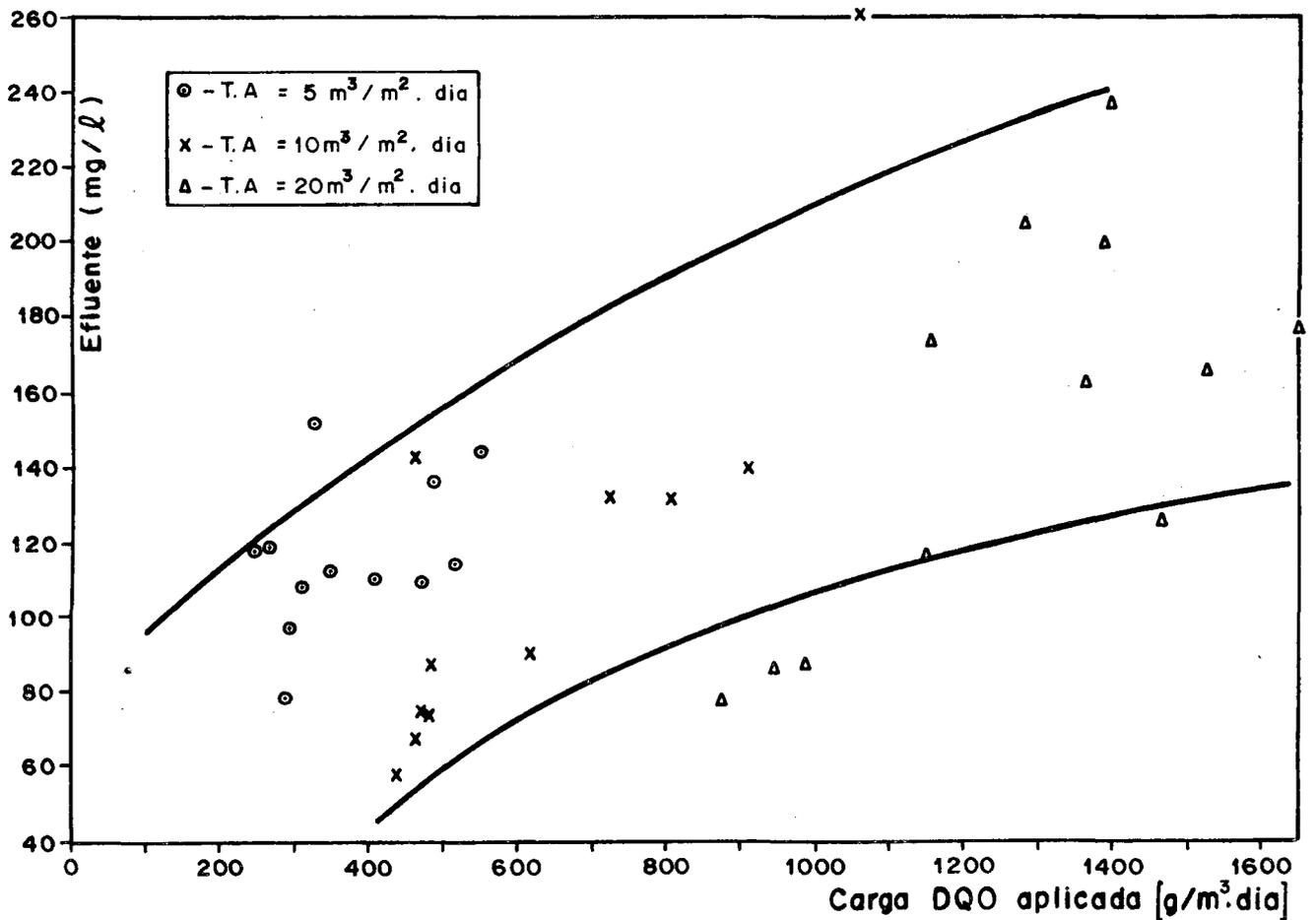


b - Com taxa de recirculação de 1,50

FIG. 4.26 - Remoção de DQO em relação a carga orgânica com recirculação



a - Com taxa de recirculação de 0,70



b - Com taxa de recirculação de 1,50

FIG. 4.27 - Concentração de DQO no efluente em relação a carga aplicada - com recirculação

Os valores do tempo de detenção obtidos pelo uso de esgoto e água estão nos quadros 3.1 e 3.2.

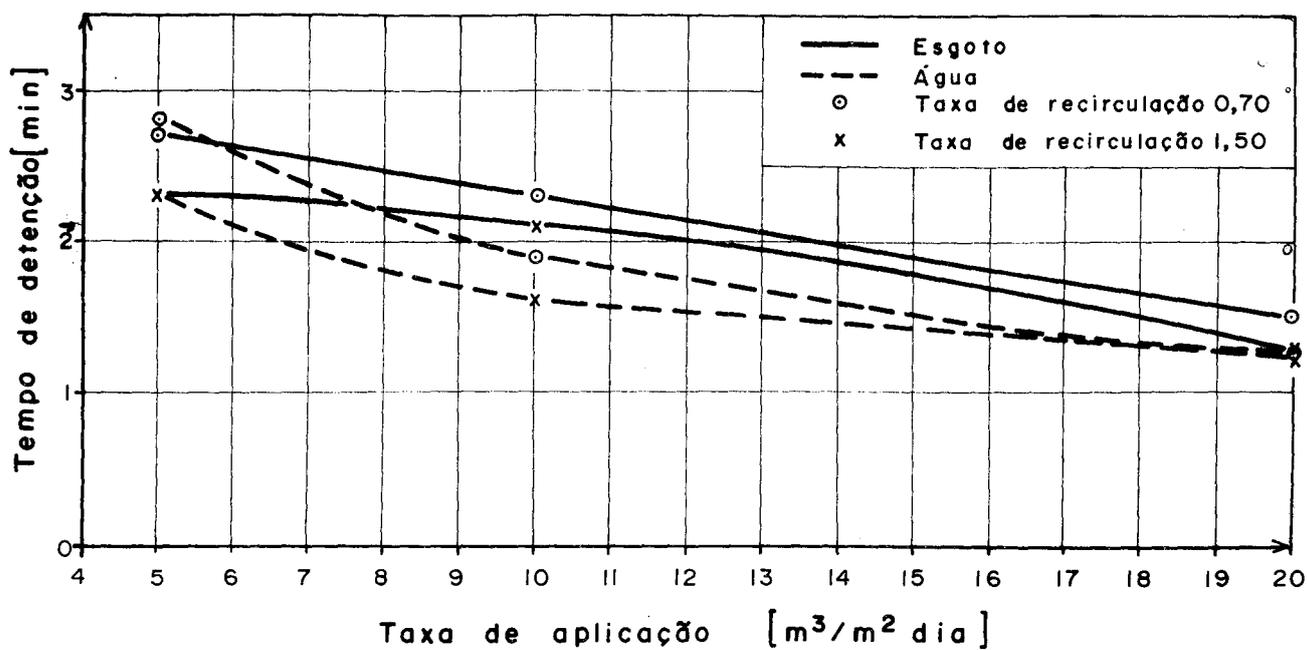
A partir desses valores foram construídas as figuras 4.28 e 4.29.

O efeito da película biológica sobre o tempo de detenção foi verificado quando usou-se para a determinação desse parâmetro o método de Cook (6), fig. 4.28. O efeito da taxa de aplicação ocorreu no sentido da diminuição do tempo de detenção com o aumento da mesma, para as duas taxas de recirculação, fig. 4.28.

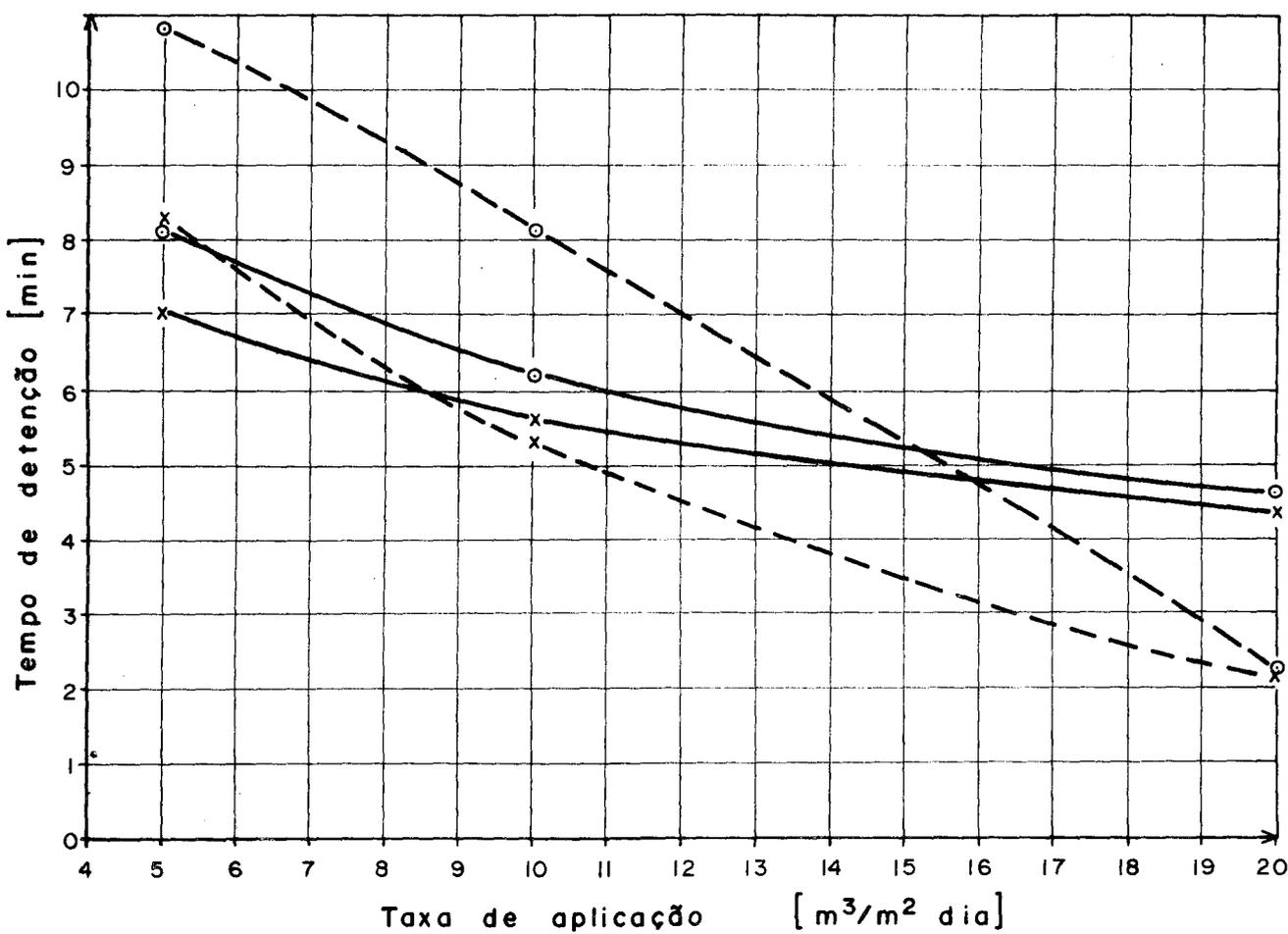
Pela observação da figura 4.28, quando o tempo de detenção foi determinado segundo Eckenfelder (9) o efeito da película biológica ocorreu para a recirculação de 0,70 a partir da taxa de aplicação de $15 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e a partir de $8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia na taxa de recirculação de 1,50.

A figura 4.29 nos mostra a influência do tempo de detenção na remoção do substrato. Embora os tempos de detenção tenham sido menores para a taxa de recirculação de 1,50 foi nela que obteve-se maior remoção, exceto na taxa de aplicação de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia. Analisando individualmente cada taxa de recirculação, verifica-se a influência do tempo de detenção na remoção de DBO.

Estas observações vão ao encontro a análise feita por Galler e Gotaas (10) que o tempo de detenção entre o líquido a ser tratado e a superfície ativa não tinha significância. Mas sim



a - Segundo Cook e Katzberger (6).



b - Segundo Eckenfelder e Barnhart (9)

FIG. 4.28 - Relação entre tempo de detenção e taxa de aplicação.

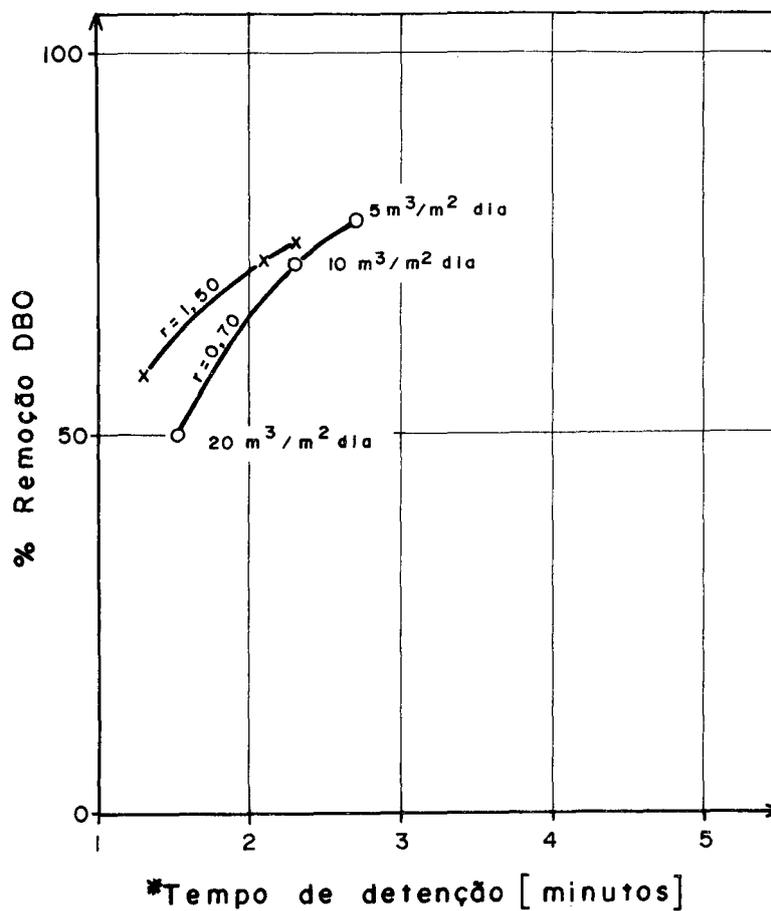


FIG. 4.29 — Influência do tempo de detenção sobre o desempenho do filtro com recirculação .
*tempo de detenção segundo Cook (6) .

o tempo de contato entre os organismos do meio responsáveis pela mudança na DBO e o líquido aplicado. Em filtros a alta taxa os organismos do meio são continuamente separados da película biológica ficando em suspensão no líquido até sua sedimentação no decantador secundário. O tempo de detenção pode ser aumentado pela recirculação desses organismos já adaptados ao meio.

Por esta análise pode-se explicar que embora o tempo de detenção tenha sido menor para a taxa de recirculação 1,50 foi nela que obteve-se maior remoção média de DBO nas taxas de aplicação de 10 e 20 m³/m² dia.

Durante essa etapa procurou-se determinar uma vez na semana a concentração de alquil-benzeno sulfonato (ABS).

Em todos os períodos de operação houve pequena redução do ABS afluente pela percolação ao longo do filtro biológico.

As percentagens médias de redução de ABS estão resumidas abaixo:

Taxa de Aplicação	5 m ³ /m ² dia		10 m ³ /m ² dia		20 m ³ /m ² dia	
Taxa de Recirculação	0,70	1,50	0,70	1,50	0,70	1,50
% Remoção Média	41,7	25,0	17,2	18,4	15,4	11,3

Observa-se que o aumento na taxa de recirculação provocou a diminuição da eficiência na remoção da ABS.

Não foi observado influência da concentração da ABS afluente na remoção de DBO.

Nessa etapa foi feita análise de fosfatos totais. Pela observação dos resultados de ABS e fosfatos totais, notou-se que existe uma relação direta entre eles.

Análise de alguns elementos traços como zinco, cobre e chumbo foram feitas durante os vários períodos de operação. Os resultados estão apresentados no quadro 4.2.1.

As concentrações desses elementos traços são pequenas, valendo-se aqui das mesmas considerações feitas no item 4.1 sobre esses elementos.

Em geral, nessa etapa de estudo, houve alguma remoção e as concentrações efluentes obtidas ficaram dentro dos padrões permissíveis ditados pela norma de Emissão de Efluentes Líquidos (29).

O quadro 4.2.2 permite a visualização dos resultados do desempenho do filtro com recirculação.

As remoções médias de DBO obtidas foram de 79,2, 72,2 e 50,7% nas taxas de aplicação de 5, 10 e 20 m³/m² dia com taxa de recirculação de 0,70 e de 74,8, 73,6 e 58,1% com taxa de recirculação de 1,50. Os resultados sugerem que deve existir uma taxa de recirculação compatível com a taxa de aplicação usada não sendo apenas o critério econômico o fator principal no projeto. Pode

Taxa de aplicação	Taxa de re circulação	Elemento		Zn		Cu		Pb	
		Data	Ponto	AB	E	AB	E	AB	E
5 m ³ /m ² dia	0,70	02/09/82		0,103	0,0911	0,0508	0,0235	ñ.d	ñ.d
		09/09		0,1109	0,0931	ñ.d	ñ.d	ñ.d	ñ.d
		20/09		0,2334	0,2137	0,0326	0,0326	ñ.d	ñ.d
		24/09		1,4643	0,0812	0,269	0,0508	ñ.d	ñ.d
		01/10		0,1128	0,0753	0,0417	ñ.d	ñ.d	ñ.d
5 m ³ /m ² dia	1,50	29/07		0,1109	0,099	0,0235	0,0235	ñ.d	ñ.d
		05/08		0,1069	0,0852	0,0326	0,0235	ñ.d	ñ.d
		12/08		0,0812	0,099	0,0157	ñ.d	ñ.d	ñ.d
		19/08		0,0832	0,0792	0,0235	0,0157	ñ.d	ñ.d
		26/08		0,2393	0,1425	0,069	0,0508	ñ.d	ñ.d
10 m ³ /m ² dia	0,70	24/06		0,0812	0,1168	0,0235	0,0235	ñ.d	ñ.d
		01/07		-	-	-	-	0,005	0,000
		08/07		-	-	-	-	0,05	0,07
		15/07		-	-	-	-	0,004	0,014
				ñ.d	0,002	-	-	0,006	0,002
10 m ³ /m ² dia	1,50	20/05		0,025	0,023	0,001	0,001	ñ.d	ñ.d
20 m ³ /m ² dia	0,70	24/03		0,002	0,002	0,007	0,002	ñ.d	ñ.d
		31/03		0,004	ñ.d	0,008	0,003	0,002	0,003
		05/03		0,014	0,015	ñ.d	0,001	0,013	0,002
		04/03		0,019	0,008	0,008	0,002	0,001	ñ.d
		09/03		0,03	0,041	0,006	0,005	0,001	ñ.d
		17/03		0,009	0,008	0,001	0,004	0,005	0,001
20 m ³ /m ² dia	1,50	22/04		ñ.d	0,035	0,006	0,002	ñ.d	0,002
		13/05		0,022	0,003	0,002	0,002	0,001	ñ.d

Quadro 4.2.1 - Remoção de elementos traços.

Taxa aplicação		5 m ³ /m ² dia						10 m ³ /m ² dia						20 m ³ /m ² dia					
Taxa recirculação		0,70			1,50			0,70			1,50			0,70			1,50		
Pontos		AB	E	% rem.	AB	E	% rem.	AB	E	% rem.	AB	E	% rem.	AB	E	% rem.	AB	E	% re
DBO (não filtrado)	Max	98	7,5	92,3	180	24	86,7	110	12	89,1	117	10	91,4	150	40	73,3	80	22	72,
	Med	101	22,0	78,2	113	28,5	74,8	108	30	72,2	123	32,5	73,6	147	72,5	50,7	129	54	58,
	Min	56	21	62,5	218	90	58,7	35	27	22,9	170	55,0	67,6	140	90	35,7	95	55	42,
DQO	Max	106	38	64,1	132	25	81,1	177	53	70,1	136	32	76,5	299	147	50,8	293	125	57,
	Med	187	94	49,7	291	110,0	62,2	237	126	46,8	243	100	58,8	261	187	28,3	253	151	40,
	Min	215	138	35,8	205	119	41,9	119	110	7,6	424	261	38,4	260	244	6,1	280	238	15,
SS	Max	97,5	22,5	76,9	37,5	7,5	80,0	-	-	-	35,0	10,0	71,4	125	67,5	46,0	170	225	86,
	Med	52,6	24,2	54,0	35,9	20	44,3	-	-	-	42,5	24,0	43,5	70	42	40,0	90	29,5	67,
	Min	37,3	26,0	30,7	35,0	28	20,0	-	-	-	35,0	33,5	4,3	55	47,5	13,6	50	27,5	45,
S ²⁻	Max	8,5	0,0	100	7,2	0,0	100	4,2	0,0	100	6,4	0,0	100	6,4	zero	100	10,3	0,0	100
	Med	8,9	1,5	83,1	6,9	1,0	85,5	4,8	1,6	66,7	3,8	0,05	98,7	8,4	1,2	85,7	9,3	0,4	95,
	Min	9,5	5,8	38,9	8,5	4,1	51,8	5,4	3,0	44,4	4,1	0,1	97,6	12,3	4,0	65,5	9,1	1,8	80,
ABS	Max	5,6	2,2	60,7	5,5	4,1	25,4	3,5	2,2	37,1	5,3	3,7	30,2	6,9	4,2	39,1	5,9	4,2	28,
	Med	7,2	4,2	41,7	6,4	4,8	25,0	6,4	5,3	17,2	4,9	4,0	18,4	6,5	5,5	15,4	5,3	4,7	11,
	Min	6,9	6,1	11,6	8,0	6,8	15,0	5,1	5,1	0	4,9	4,3	12,2	5,5	5,2	5,4	4,6	4,6	0,
NTK	Max	28,1	14,0	50,0	36,9	22,0	40,4	38,1	24,8	35	28,5	20	30,0	46,3	33,6	27,0	35,1	28,4	19
	Med	32,5	20,9	35,7	31,0	20,5	35,9	33,9	24,9	26,6	37,0	28,1	24,0	40,6	33,5	17,5	41,3	35,9	13
	Min	29,2	26,8	8,0	20,8	16,1	23,0	40,5	32,8	19	36,9	29,7	19,5	47,2	41,9	11,2	50,9	46,0	10
NH ₄ ⁺	Max	19,7	17,9	9,0	26,2	14,9	43,0	21,2	10,3	51	30,3	23,0	24,0	30,6	23,8	22,0	33,9	28,5	16,
	Med	23,5	15,4	34,3	22,8	16,3	28,3	24,9	16,8	32,5	27,5	22,1	19,6	30,4	25,8	15,1	32,2	28,6	11,
	Min	22,3	10,8	52,0	25,0	23,8	5,0	28,0	22,0	21,0	30,0	24,2	14,0	37,5	33,3	11,0	39,3	35,1	10,
Norgânico	Max	9,5	8,9	6,0	11,9	1,8	85	13,9	8,5	39	12,8	6,7	48,0	15,7	9,8	38	7,9	4,2	47,(
	Med	9,0	5,5	39,5	8,4	3,3	61,2	10,6	8,6	19,5	9,5	6,0	37,0	10,2	7,7	24,5	9,1	7,4	19,0
	Min	10,4	4,4	57,0	5,9	4,2	29	6,1	6,1	0	7,2	6,1	15,0	10,1	9,1	10	8,5	8,4	1,(
NO ₃	Med	0,6	10,3	-	0,1	9,7	-	0,5	4,8	-	3,1	10,3	-	1,35	14,4	-	2,3	24,7	-

Quadro 4.2.2 - Remoções máximas, médias e mínimas obtidas com o filtro biológico com recirculação (concentrações em mg/l).

-se deduzir que com taxa de aplicação de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia a recirculação de 70% já é suficiente, uma vez que com o uso da recirculação maior os resultados foram piores. Já na taxa de recirculação de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia o uso da taxa de recirculação de 1,50 permitiu resultados melhores do que aqueles com a taxa de 0,70. Na taxa de aplicação de $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e taxa de recirculação de 1,50 obteve-se resultado melhor do obtido com taxa de recirculação de 0,70. Considerando a tendência encontrada nas taxas de aplicação de 5 e $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, é possível que, com recirculação maior, obter-se-ia melhores resultados para a taxa de aplicação de $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia.

A mesma observação feita sobre o decantador secundário piloto feito no item 4.1 é válida aqui. O quadro 4.2.3 nos mostra a diferença entre a eficiência com o efluente não filtrado e efluente filtrado em laboratório.

Em relação a DQO verifica-se uma remoção média decrescente com o aumento da taxa de aplicação mas crescente com aumento da taxa de recirculação. As remoções médias foram de 49,7, 46,8 e 28,3% com taxa de recirculação de 0,70 e de 62,2, 58,8 e 40,3% na taxa de recirculação de 1,50 respectivamente as taxas de aplicação de 5, 10 e $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia.

As remoções médias de SS ficaram na faixa de 40 a 67,2%

Houve boa remoção de sulfetos, ficando na faixa de 83,1 a 95,7%, com uma pior remoção média de 66,7% na taxa de aplicação de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e taxa de recirculação de 0,70.

Taxa de aplicação	Taxa de recirculação	Data	DBO (mg/l)		% remoção	DBO (mg/l)	% remoção
			AA	E	DBO	E_{filtrado}	DBO
5 m ³ /m ² dia	0,70	10/9/83	125	26	79%	19	85%
5 m ³ /m ² dia	1,50	18/8/82	90	20	78%	18	80%
		25/8/82	170	48	<u>72%</u>	31	<u>82%</u>
					Med 75%		81%
20 m ³ /m ² dia	1,50	22/4/82	165	70	58%	48	71%
		13/5/82	80	22	<u>73%</u>	12	<u>85%</u>
					Med 65,5%		78%

Quadro 4.2.3 - Comparação entre eficiência com efluente não filtrado e filtrado. (com recirculação)

As concentrações efluentes de DBO, DQO e SS ficaram sempre de acordo com a norma da Emissão de Efluentes Líquidos (29), em qualquer taxa de aplicação e recirculação usada.

As concentrações médias de sulfetos efluentes se enquadraram dentro da norma (29) somente nas taxas de aplicação de 10 e 20 m³/m² dia com taxa de recirculação de 1,50.

Em relação as concentrações de ABS e Nitrogênio Total no efluente ficaram essas fora da faixa prevista pela Norma (29). Sobre o ABS o motivo já foi explicado anteriormente e sobre o Nitrogênio Total sabe-se que, em geral, em processos biológicos tem-se concentrações de nitratos elevadas contribuindo somente essa para elevar o teor desse componente.

4.3. Verificação do Desempenho da Coluna Piloto por 5 Métodos

Para observar o comportamento do filtro biológico nas duas etapas experimentais aplicaram-se 5 métodos nos dados de DBO observados e verificou-se qual a eficiência calculada que melhor se ajustou no caso real.

Os métodos usados foram:

- a - Fórmula da National Research Council (NRC)
- b - Fórmula dos Ten States
- c - Fórmula de Eckenfelder
- d - Fórmula de Galler e Gotaas
- e - Galler e Gotaas modificada

As eficiências observadas e calculadas pelos diferentes métodos estão tabuladas nos quadros 4.3.1 ao 4.3.4 para o filtro operado com pré-aeração e nos quadros 4.3.5 ao 4.3.10 para o filtro operado com recirculação, em ordem crescente da taxa de aplicação e recirculação.

Nos quadros 4.3.11 e 4.3.12 estão os valores dos erros padrão de estimativa, calculados estatisticamente (30). Quanto menor o erro, melhor o ajuste da eficiência calculada com a eficiência observada.

Pelos resultados obtidos, observa-se que a eficiência prevista pela Ten States seguida pela fórmula de Galler e Gotaas modificada melhor se adaptaram ao filtro biológico operado com pré-aeração. Houve uma exceção, pois na taxa de aplicação de $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia a fórmula de Galler e Gotaas modificada foi a de melhor ajuste.

A bibliografia confirma a eficiência prevista pela fórmula Ten States com os valores experimentais. O método de Galler e Gotaas modificado por Hanumanulu (13) somente no expoente da profundidade se ajusta melhor para filtros profundos sem recirculação. Provavelmente porque o expoente obtido por Eckenfelder e Galler e Gotaas foi para filtros com profundidade em torno de 2,60 m.

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula %				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go taas	Galler e Go taas modifi cada
		2	3	4	5	6
1	70,0	89,2	66,7	90,63	85,7	76,4
2	61,5	89,9	66,7	90,63	86,0	76,8
3	71,4	89,5	66,7	90,63	85,7	76,4
4	71,4	88,4	66,7	90,63	85,3	75,7
5	72,4	87,4	66,7	90,63	84,7	74,7
6	85,7	89,5	66,7	90,63	86,1	76,9
7	77,8	88,3	66,7	90,63	85,4	75,9
8	68,6	88,4	66,7	90,63	85,5	76,1
9	80,8	89,8	66,7	90,63	86,4	77,5
10	82,2	88,3	66,7	90,63	85,5	76,1
11	87,3	89,4	66,7	90,63	85,9	76,8
12	90,0	87,7	66,7	90,63	85,0	75,4
13	82,6	90,4	66,7	90,63	86,6	77,9
14	85,0	90,2	66,7	90,63	86,6	77,8
15	75,0	90,2	66,7	90,63	86,6	77,8
EP		14,1	13,3	15,36	11,44	7,81

Quadro 4.3.1 - Comparação da eficiência observada e calculada
Taxa de aplicação: $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência dada pela fórmula %				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go taas	Galler e Go taas modifi cada
	1	2	3	4	5	6
1	65,0	86,5	66,7	85,89	84,4	74,1
2	65,0	87,4	66,7	85,89	85,2	75,5
3	54,5	85,9	66,7	85,89	83,4	72,6
4	68,0	85,1	66,7	85,89	83,5	72,7
5	70,3	82,4	66,7	85,89	82,7	71,4
6	73,0	85,4	66,7	85,89	84,0	73,6
7	65,2	85,6	66,7	85,89	83,6	72,9
8	64,2	83,4	66,7	85,89	82,9	71,8
9	80,3	83,8	66,7	85,89	83,1	72,2
10	76,0	76,7	66,7	85,89	80,2	67,2
11	79,5	70,1	66,7	85,89	83,0	71,9
12	70,0	83,2	66,7	85,89	83,1	72,0
13	60,0	83,9	66,7	85,89	83,7	73,1
14	70,0	84,8	66,7	85,89	84,1	73,7
	EP	16,45	7,17	18,58	17,71	8,67

Quadro 4.3.2 - Comparação da eficiência observada e calculada

Taxa de aplicação: $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$

AMOS TRA	Eficiência observada	Eficiência dada pela fórmula				
		%				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go taas	Galler e Go taas modif cada
	1	2	3	4	5	6
1	66,7	77,1	66,7	81,07	82,0	70,2
2	56,7	78,7	66,7	81,07	82,4	71,0
3	65,0	76,2	66,7	81,07	81,5	69,3
4	69,2	79,8	66,7	81,07	83,0	71,9
5	56,4	81,2	66,7	81,07	83,4	72,6
6	54,2	80,5	66,7	81,07	83,1	72,0
7	52,7	78,8	66,7	81,07	82,5	71,0
8	66,7	72,8	66,7	81,07	80,4	67,6
9	73,7	82,2	66,7	81,07	84,0	73,5
10	51,9	79,5	66,7	81,07	82,5	71,1
11	61,1	82,6	66,7	81,07	84,1	73,7
12	58,3	80,5	66,7	81,07	82,9	71,8
EP		19,67	8,84	21,14	22,68	12,47

Quadro 4.3.3 - Comparação da eficiência observada e calculada

Taxa de aplicação: $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula				
		%				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go- taas modifi- cada
1	2	3	4	5	6	
1	62,8	72,4	66,7	75,18	80,8	68,33
2	57,8	68,0	66,7	75,18	79,1	65,5
3	56,0	66,9	66,7	75,18	78,7	64,8
4	62,5	71,6	66,7	75,18	80,6	67,9
5	41,9	71,9	66,7	75,18	80,4	67,6
6	51,3	69,6	66,7	75,18	79,9	66,8
7	68,9	68,0	66,7	75,18	79,2	65,5
8	34,4	74,1	66,7	75,18	81,4	69,3
9	45,4	71,3	66,7	75,18	80,4	67,6
10	34,3	68,5	66,7	75,18	79,8	66,6
11	40,0	73,7	66,7	75,18	81,4	69,3
12	61,3	71,9	66,7	75,18	80,9	68,5
13	58,6	73,0	66,7	75,18	81,1	68,9
14	44,8	70,9	66,7	75,18	80,1	67,2
15	45,9	70,1	66,7	75,18	79,7	66,4
EP		22,76	18,89	26,34	31,12	19,67

Quadro 4.3.4 - Comparação da eficiência observada e calculada

Taxa de aplicação: $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula %				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go taas modifi cada
		2	3	4	5	6
1	62,5	90,25	77,27	88,77	90,1	91,6
2	75,7	87,4	77,27	88,77	88,6	90,3
3	71,4	85,7	77,27	88,77	88,1	89,9
4	70,0	87,9	77,27	88,77	88,8	90,4
5	80,8	87,0	77,27	88,77	88,4	90,0
6	79,2	86,7	77,27	88,77	88,4	90,0
7	85,	86,6	77,27	88,77	88,5	90,1
8	79,5	87,3	77,27	88,77	88,8	90,4
9	73,8	87,6	77,27	88,77	89,2	90,8
10	77,5	87,7	77,27	88,77	89,3	90,9
11	77,7	90,0	77,27	88,77	89,8	91,2
12	82,4	87,4	77,27	88,77	88,6	90,3
13	81,5	88,5	77,27	88,77	89,2	90,8
14	79,1	87,6	77,27	88,77	89,0	90,6
15	72,9	88,6	77,27	88,77	89,4	90,9
16	72,8	89,6	77,27	88,77	89,5	91,0
17	83,1	90,1	77,27	88,77	89,7	91,2
18	92,3	88,4	77,27	88,77	88,9	90,5
19	77,8	88,4	77,27	88,77	89,3	90,9
20	86,0	85,8	77,27	88,77	88,1	89,9
EP		12,02	6,42	12,47	12,77	14,16

Quadro 4.3.5 - Comparação da eficiência observada e calculada
Taxa de aplicação: $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$
Taxa de recirculação: 0,70

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula %				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go- taas modifi- cada
		2	3	4	5	6
1	75	88,2	83,33	90,5	91,3	96,7
2	73	88,1	83,33	90,5	91,2	96,7
3	76	88,3	83,33	90,5	91,1	96,7
4	69,9	85,2	83,33	90,5	90,1	96,3
5	80,0	88,0	83,33	90,5	90,8	96,5
6	86,7	85,7	83,33	90,5	89,8	96,3
7	66,7	92,9	83,33	90,5	93,2	97,3
8	78,2	87,9	83,33	90,5	91,0	96,6
9	62,5	88,7	83,33	90,5	91,5	96,7
10	72,5	92,1	83,33	90,5	92,8	97,2
11	78,6	90,1	83,33	90,5	91,8	96,9
12	77,8	88,9	83,33	90,5	91,4	96,8
13	84,4	89,3	83,33	90,5	91,1	96,7
14	85,0	88,8	83,33	90,5	90,8	96,6
15	77,9	87,3	83,33	90,5	90,8	96,6
16	77,9	90,1	83,33	90,5	91,7	96,7
17	79,6	86,6	83,33	90,5	90,5	96,5
18	71,8	84,9	83,33	90,5	90,4	96,4
19	77,1	86,5	83,33	90,5	90,8	96,6
20%	68,0	85,5	83,33	90,5	90,7	96,5
21	58,7	82,4	83,33	90,5	89,7	96,2
EP		14,49	10,76	16,88	17,46	22,63

Quadro 4.3.6 - Comparação da eficiência observada e calculada
Taxa de aplicação: $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$
Taxa de recirculação: 1,50

AMOS TRA	Eficiência observada	Eficiência calculada p/fórmula				
		%				
	1	2	3	4	5	6
1	89,1	83,5	77,27	84,83	87,3	89,2
2	68,0	84,9	77,27	84,83	88,2	89,9
3	60,0	88,5	77,27	84,83	89,3	90,7
4	80,0	78,7	77,27	84,83	85,5	87,7
5	74,6	81,6	77,27	84,83	86,5	88,5
6	61,7	87,0	77,27	84,83	89,2	90,7
7	74,2	86,5	77,27	84,83	88,6	90,3
8	56,5	83,4	77,27	84,83	87,4	89,3
9	85,1	79,8	77,27	84,83	85,7	87,8
10	74,2	83,9	77,27	84,83	87,7	89,5
11	85,2	81,8	77,27	84,83	86,4	88,4
1	74,8	82,5	77,27	84,83	86,6	88,6
13	69,3	80,8	77,27	84,83	86,6	88,6
14	78	80,7	77,27	84,83	86,1	88,2
15	57,1	80,3	77,27	84,83	86,8	88,8
16	74,8	81,4	77,27	84,83	87	89,0
17	81,3	85,3	77,27	84,83	88,3	90,0
18	27,3	90,5	77,27	84,83	90,4	91,8
19	60,00	78,1	77,27	84,83	85,9	88,0
20	22,9	88,2	77,27	84,83	90,1	91,4
EP*		24,71	19,5	24,13	26,74	28,01

Quadro 4.3.7 - Comparação da eficiência observada e calculada
Taxa de aplicação: $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$
Taxa de recirculação: 0,70

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula %				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go- taas modifi- cada
		2	3	4	5	6
1	56,5	81,8	83,33	87,2	89,9	96,3
2	83,3	81,9	83,33	87,2	89,4	96,1
3	74,1	83,5	83,33	87,2	90,2	96,4
4	66,7	80,5	83,33	87,2	89,6	96,1
5	68,0	82,0	83,33	87,2	90	96,2
6	64,7	79,4	83,33	87,2	88,1	95,9
7	85,7	84,6	83,33	87,2	89,9	96,3
8	64,0	80,9	83,33	87,2	89,5	96,1
9	91,4	84,4	83,33	87,2	89,9	96,2
10	56,7	79,8	83,33	87,2	89,6	96,1
11	67,5	78,2	83,33	87,2	88,8	95,9
12	55,9	78,7	83,33	87,2	89,0	95,9
13	81,3	83,3	83,33	87,2	90,0	96,2
14	86,7	83,0	83,33	87,2	90,0	96,3
15	83,6	86,7	83,33	87,2	91	96,6
16	81,0	84,2	83,33	87,2	90,4	96,5
17	69,1	88,8	83,33	87,2	91,7	96,9
18	75	87,2	83,33	87,2	91,0	96,7
19	81,3	86,4	83,33	87,2	90,9	96,5
20	78,1	81,0	83,33	87,2	89,6	96,1
EP		13,13	14,4	17,26	19,35	25,03

Quadro 4.3.8 - Comparação da eficiência observada e calculada

Taxa de aplicação: $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$

Taxa de recirculação: 1,50

AMOS TRA	Eficiência observada %	Eficiência calculada p/fórmula				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go- taas modifi- cada
		2	3	4	5	6
1	73,3	74,5	77,27	79,8	85,8	88,0
2	65,2	69,7	77,27	79,8	84,4	86,7
3	41,2	78,0	77,27	79,8	87,6	89,4
4	58,3	72,5	77,27	79,8	85,7	87,8
5	53,6	74,1	77,27	79,8	86,2	88,3
6	50,0	70,3	77,27	79,8	85,3	87,5
7	36,4	75,5	77,27	79,8	86,9	88,8
8	35,7	73,2	77,27	79,8	86,2	88,3
9	57,0	75,1	77,27	79,8	86,5	88,5
10	49,0	73,6	77,27	79,8	86,2	88,2
11	36,7	72,5	77,27	79,8	86,0	88,1
12	53,3	73,4	77,27	79,8	85,9	88,0
13	54,2	75,5	77,27	79,8	86,5	88,6
14	51,7	73,6	77,27	79,8	86,1	88,1
15	37,9	72,9	77,27	79,8	86,1	88,1
16	42,9	73,5	77,27	79,8	86,1	88,1
17	48,4	72,8	77,27	79,8	85,7	87,8
EP		26,18	29,14	31,8	37,9	39,85

Quadro 4.3.9 - Comparação da eficiência observada e calculada

Taxa de aplicação: $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$

Taxa de recirculação: 0,70

AMOS TRA	Eficiência		Eficiência calculada p/fórmula			
	observada	%				
	%	NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go- taas	Galler e Go- taas modifi- cada
1	2	3	4	5	6	
1	58,3	75,9	83,33	82,76	89,0	95,9
2	62,5	73,5	83,33	82,76	88,3	95,7
3	46,3	72,0	83,33	82,76	88,5	95,8
4	57,6	72,8	83,33	82,76	88,3	95,7
5	56,7	72,5	83,33	82,76	88,5	95,8
6	60,1	72,4	83,33	82,76	88,3	95,7
7	56,1	73,2	83,33	82,76	88,6	95,8
8	50,0	84,0	83,33	82,76	91,5	96,7
9	56,1	73,7	83,33	82,76	88,5	95,8
10	58,6	74,1	83,33	82,76	88,5	95,8
11	70,4	75,9	83,33	82,76	88,7	95,8
12	42,1	76,7	83,33	82,76	89,8	96,2
13	58,8	72,6	83,33	82,76	88,1	95,6
14	60,0	77,6	83,33	82,76	89,5	96,1
15	71,4	81,4	83,33	82,76	90,3	96,4
16	66,7	76,6	83,33	82,76	89,1	95,9
17	72,5	80,5	83,33	82,76	90,1	96,4
18	45,5	75,6	83,33	82,76	89,4	96,1
EP		19,17	26,38	25,84	31,88	38,56

Quadro 4.3.10 - Comparação da eficiência observada e calculada
Taxa de aplicação: $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$
Taxa de recirculação: 1,50

Taxa de aplicação	Taxa de re circulação	Erro padrão da estimativa				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go taas	Galler e Go taas modifi cada
2	0	14,1	13,3	15,4	11,4	7,8
5	0	16,4	7,2	18,6	17,7	8,7
10	0	19,7	8,8	21,1	22,7	12,5
20	0	22,8	18,9	26,3	31,1	19,7

Quadro 4.3.11 - Erro padrão da estimativa. (com pré-aeração)

Taxa de aplicação	Taxa de re circulação	Erro padrão da estimativa				
		NRC	Ten States	Eckenfelder	Galler e Go taas	Galler e Go taas modifi cada
5	0,70	12,02	6,4	12,5	12,8	14,2
	1,50	14,5	10,8	16,9	17,5	22,6
10	0,70	24,7	19,5	24,1	26,7	28,0
	1,50	13,1	14,4	17,3	19,3	25,0
20	0,70	26,2	29,4	31,8	37,9	39,8
	1,50	19,2	26,4	25,8	31,9	38,6

Quadro 4.3.12 - Erro padrão da estimativa. (com recirculação)

Para o filtro biológico operado com recirculação o método da Ten States ajustou melhor os dados obtidos com taxas de aplicação de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia nas duas taxas de recirculação e $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia com recirculação de 0,70. Para as demais taxas de aplicação e recirculação o método da NRC melhor se adaptou aos dados experimentais.

Pelo observado, pode-se dizer que para filtros biológicos sem recirculação a fórmula de Galler e Gotaas pode dar uma boa base para projeto, uma vez que engloba várias variáveis, enquanto que para o filtro com recirculação a fórmula da NRC pode ser usada para isso, uma vez que o método do Ten States depende somente da taxa de recirculação.

4.4. Relação DBO_5 - DQO

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram o comportamento existente entre a DBO_5 e DQO .

Os dados utilizados foram os valores de DBO_5 e DQO do efluente do decantador-digestor, pontos AB (fig. 4.30) e do efluente do filtro biológico, ponto E (fig. 4.31) durante as 2 etapas de operação com o filtro biológico. Não foram usados os valores obtidos durante os períodos de operação operados com taxas de aplicação de 5 e $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, da etapa com pré-aeração, devido a problemas que existiram na determinação dos valores de DQO durante esses períodos. Os valores de DQO obtidos nesses períodos foram encontrados de uma composição feita com os valores de DBO_5 e DQO dos períodos de operação com 2 e $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia.

Aplicando-se o método dos mínimos quadrados nos dados das figuras e eliminando-se os valores fora da área hachuriada, obteve-se as seguintes retas de correlação:

$DQO_{(AB)} = 1,32 DBO_5(AB) + 78,07$ com uma correlação de 83%.

$DQO_{(E)} = 1,67 DBO_5(E) + 59,52$ com uma correlação de 81%.

As razões entre DQO/DBO_5 foram:

$$\frac{DQO_{(AB)}}{DBO_5(AB)} = 1,97$$

$$\frac{DQO_{(E)}}{DBO_5(E)} = 3,22$$

Através de alguns valores de DBO_5 e DQO obtidos da coleta de amostra do afluente a estação foi construída a figura 4.32. A reta de correlação obtida através desses dados foi:

$DQO = 1,04 DBO_5 + 269,9$ com uma correlação de 89%.

A razão entre $\frac{DQO}{DBO_5} = 1,88$.

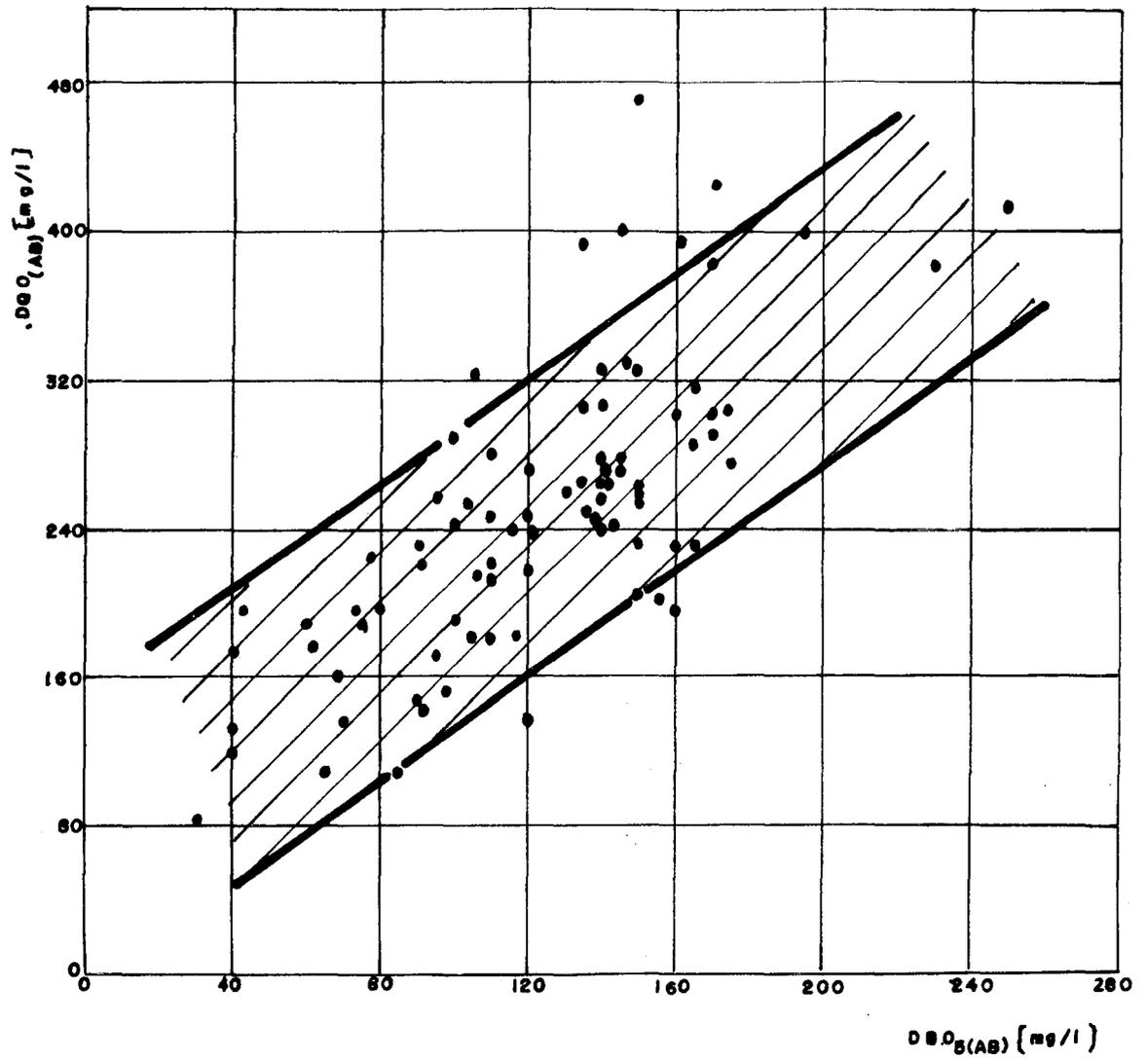


Fig. 4.30 - Relação DBO_5 - DQO do afluente bruto (AB).

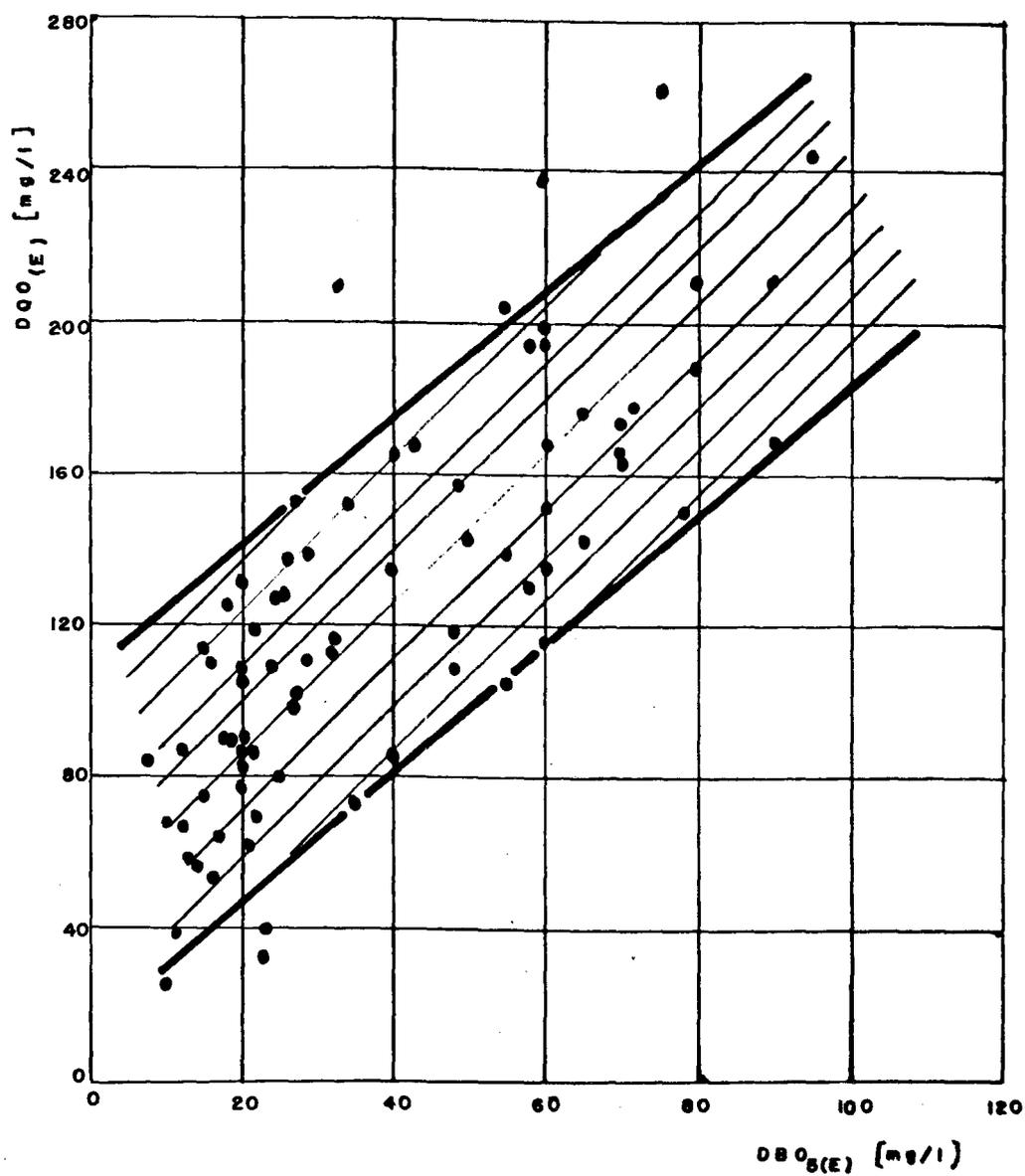


FIG. 4.31 - Relação DBO_5 -DQO do efluente (E).

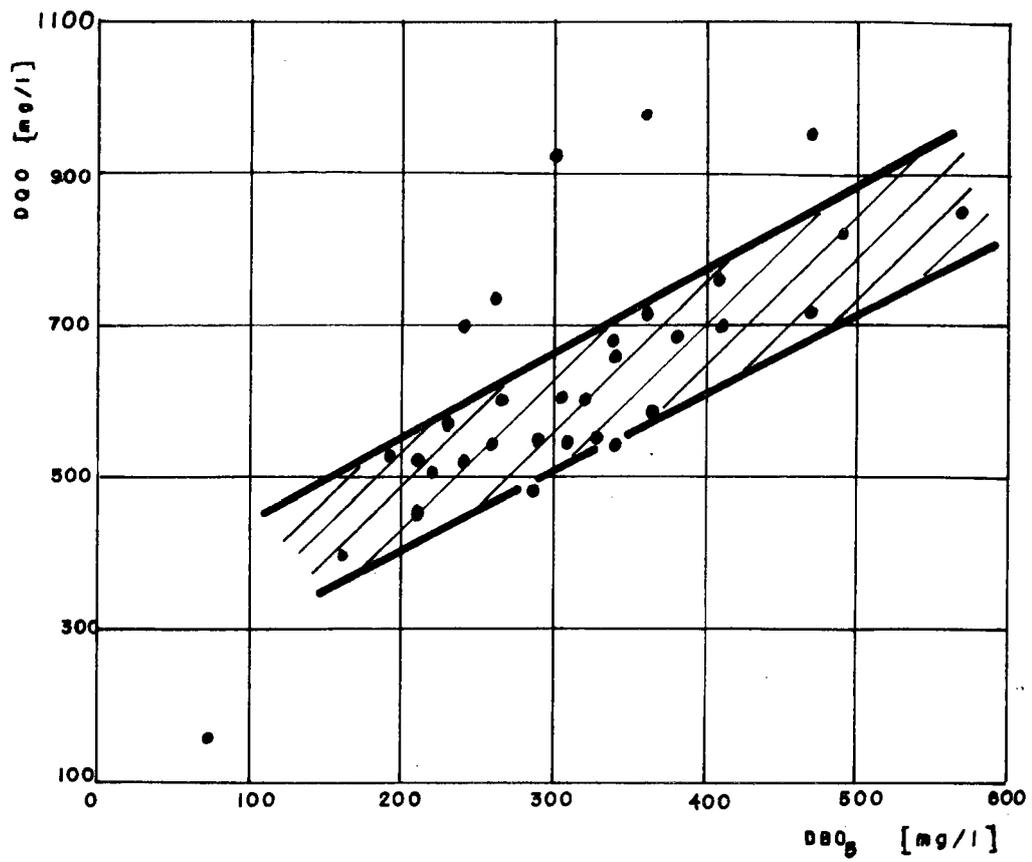


Fig. 4.32 - Relação DBO_5 - DQO do afluente à estação.

5. CONCLUSÕES

1 - A pré-aeração do esgoto afluyente ao filtro biológico provocou a inversão do efeito da temperatura sobre a remoção da DBO, para as taxas de aplicação de 2, 5 e 10 m^3/m^2 dia, observado por Suschka e Correa (33) operando a mesma coluna piloto usada no presente trabalho. Pelos resultados obtidos, o oxigênio pode ser um fator limite na remoção do substrato. Portanto, em condições de clima tropical, onde a temperatura do ar e do esgoto é relativamente alta, parece essencial elevar os teores de oxigênio dos esgotos antes da alimentação do filtro biológico.

2 - Não foi observada relação definida entre a variação da temperatura e remoção de DBO na coluna piloto com recirculação.

3 - A remoção média de DBO com pré-aeração foi de 77,3%, 70,0%, 61,5% e 51,7%, correspondente às taxas de aplicação de 2; 5; 10 e 20 m^3/m^2 dia. Na etapa com recirculação, a remoção média foi de 78,2%, 72,2% e 50,7% para as taxas de aplicação de 5, 10 e 20 m^3/m^2 dia, com taxa de recirculação 0,70 e de 74,8%, 73,6% e 58,1%, com taxa de recirculação de 1,50.

Com isso depreende-se que:

a) a recirculação proporcionou resultados ligeiramente superiores aos obtidos com pré-aeração, com exceção na taxa de aplicação de 20 m^3/m^2 dia e recirculação de 0,70.

b) provavelmente existe uma taxa de recirculação compatível com a taxa de aplicação além do critério econômico. Na taxa de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia a taxa de recirculação de 0,70 é suficiente. Nas taxas de 10 e $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia a recirculação de 1,50 proporcionou resultados melhores, com a possibilidade de que, na maior taxa de aplicação, a taxa de recirculação poderia ter sido maior.

4 - Em filtro biológico, com decantador em escala técnica, esperam-se melhores resultados uma vez que a DBO_5 obtida com efluentes filtrados foi consideravelmente melhor do que com efluente não filtrado.

5 - A diferença entre a alcalinidade do afluente e do efluente do filtro biológico pode ser um bom indicativo da atividade biológica do filtro.

6 - Através da curva da condutividade elétrica ao longo do tempo, usando como traçador o cloreto de sódio, obtiveram-se os valores do tempo de detenção segundo Cook e Katzberger (6) e Eckenfelder e Barnharnt (9) para todos os períodos de operação, observando-se que:

a) Os tempos de detenção conforme Eckenfelder (9) foram maiores que os obtidos segundo Cook (6). Por isso, é importante que para haver comparações entre tempo de detenção de filtros biológicos é necessário sempre citar a maneira como o tempo de detenção foi obtido.

b) No filtro biológico sem recirculação verificou-se o efeito da película biológica devido ser o tempo de detenção menor quando foi usado água de abastecimento como afluente à coluna. No filtro biológico com recirculação esse efeito foi observado em todos os períodos de operação quando o tempo de detenção foi determinado conforme Cook (6). Quando foi usada a determinação segundo Eckenfelder (9) esse efeito ocorreu a partir da taxa de aplicação de $15 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia quando a taxa de recirculação foi de 0,70 e a partir de $8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia quando a taxa de recirculação foi 1,50.

c) O tempo de detenção influencia na remoção da DBO numa relação direta quando o filtro é operado com pré-aeração. O mesmo ocorrendo no filtro com recirculação e taxas de recirculação individualizadas.

7) Devido a alterações na superfície líquida provocada pela presença de detergentes houve diminuição do desempenho do filtro com o aumento da concentração de ABS no afluente aerado. No filtro com recirculação esse efeito não foi observado. Praticamente não houve remoção de ABS com o filtro operado com pré-aeração. Com recirculação houve maior remoção variando de 11,7 a 41,7% da maior para a menor taxa respectivamente e diminuindo com o aumento da taxa de recirculação.

8) Na fase com pré-aeração praticamente não houve nenhuma remoção de Cu, Zn e Pb e na fase com recirculação houve alguma

remoção. Os teores desses elementos em esgotos domésticos são baixos não sendo preocupante no tratamento desse tipo de esgoto. Para esgotos onde esses teores são mais elevados, antes do uso do filtro biológico, deve-se fazer estudos específicos sobre a capacidade e o mecanismo de adsorção dos leitos filtrantes e película biológica.

9) Na aplicação dos métodos de dimensionamento conforme Ten States, NRC, Eckenfelder, Galler e Gotaas e Galler e Gotaas modificado nos dados experimentais observou-se que:

a) Na coluna piloto operada com pré-aeração a eficiência calculada pela Ten States resultou em valores mais próximos aos observados com exceção da menor taxa de aplicação em que o método de Galler e Gotaas modificado proporcionou melhores ajustes. Essa fórmula engloba todas as variáveis e pode dar a base do projeto de filtros biológicos profundo para tratamento de esgoto.

b) Na coluna piloto operada com recirculação para as taxas de aplicação de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia nas duas recirculações usadas e $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia e recirculação de 0,70 a fórmula da Ten States previu eficiência mais próxima aos dados observados. Para as demais taxas de aplicação e recirculação o método da NRC foi o de melhor ajuste. Como a eficiência calculada pela Ten States é dependente somente da recirculação, o método que pode dar uma base para projeto de Filtros Biológicos profundos com recirculação é o da NRC como também Eckenfelder que foi o 3º método de melhor ajuste aos dados observados.

RECOMENDAÇÕES

- 1 - Recomenda-se o prosseguimento da pesquisa utilizando diferentes meios suportes para o filtro biológico.
- 2 - Recomenda-se que sejam realizados estudos específicos com a finalidade de encontrar a taxa de recirculação ideal compatível com a taxa de aplicação, a qual proporcione o melhor desempenho do filtro biológico.
- 3 - Recomenda-se estudos específicos da influência dos metais pesados no desempenho do filtro.
- 4 - Recomenda-se o estudo da influência dos detergentes no desempenho do filtro biológico.
- 5 - Recomenda-se o estudo da influência da altura do filtro com a variação da taxa de recirculação.
- 6 - Recomenda-se o estudo da eficiência da aeração colocada diretamente na canalização de alimentação do filtro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADAMS, C.; FORD, D.; ECKENFELDER, W. 1981. Development of design and operational criteric for wastewater treatment. Nashville, Enviro Press. p. 145.
2. AMES, W.F.; BEHN, V.C.; COLLINGS, W.Z. 1962. Transient operation of the trickling filter. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, 88(3):21-38, May.
3. ATKINSON, Bernard & HOWELL, John A. 1975. Slime holdup, influent BOD, and mass transfer in trickling filter. Journal of the Environmental Engineering Division, New York, 101(4):585-605, Aug.
4. ATKINSON, B.; BUSCH, A.W.; DAWKINS. G.S. 1963. Recirculation, reaction kinetics, and effluent quality in a trickling filter flow model. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 35(10):1307-17, Oct.
5. BRAILE, P.M.& CAVALCANTI, J.E. 1975. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo, CETESB. cap. 19, p. 457-508.
6. COOK, Echol E. & KATZBERGER, Stephen M. 1977. Effect of residence time on fixed film reactor performance. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 49(8):1889-95, Aug.

7. CRAFT, T. & INGOLS, R. 1973. Flow through time in trickling filters. Water and Sewage Works, Chicago, 120:78-9, Jan.
8. ECKENFELDER, W. Wesley, Jr. 1961. Trickling filtration design and performance. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, 87(4):33-45, July.
9. ECKENFELDER, W. Wesley, Jr. & BARNHART, Edwin L. 1963. Performance of a high nate trickling filter using selected media. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 35(12):1535-51, Dec.
10. GALLER, William S. & GOTAAS, Harold B. 1964. Analysis of biological filter variables. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, 90(6):59-79, Dec.
11. HACH CHEMICAL COMPANY. S.d. Bottle manometric apparatus; model 2173 B. Loveland. 17 p.
12. HACH CHEMICAL COMPANY. 1981. COD reactor; model 16.500. Loveland. 16 p.
13. HANUMANULU, V. 1970. Performance of deep trickling filters by five methods. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 42(8):1446-57, Aug.
14. HESS, Max Lothar. 1959. Principais diferenças entre filtros biológicos de alta capacidade americanos e alemães sob o ponto de vista de conceituação, projeto, construção e operação. Revista DAE, São Paulo, 20(35):55-61, out.

15. HOWLAND, W.E. 1958. Thow over porous media as in a trickling filter. In: INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 12, Purdue University. Proceedings. p. 435.
16. IMHOFF, K.R. 1979. Betriebsergebnisse Von Teoplkörperanlagn und Bemessungsuirsclang im Hinblick au f s 7 a 7 a WHG. Gas und Wasserfach. 120(2):47-49 apud SUSCHKA, J. 1981, Filtros Biológicos. Porto Alegre, UFRGS-UNESCO, p. 28.
17. IMHOFF, Karl. 1966. Manual de tratamento de águas residuárias. São Paulo, Edgard Blücher. 235 p.
18. JORDÃO, Eduardo Pacheco. 1978. Tratamento de esgotos. Por to Alegre, UFRGS-UNESCO. 70 f. (Projeto PNUD/UNESCO/BRA/75/007. Publicação n. 3)
19. MAIER, Walter J.; BEHN, Vaughn C.; GATES, Charles D. 1967. Simulation of the trickling filter process. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, 93(4):91-112, Aug.
20. MEHTA, Dilip S.; DAVIS, Harry H.; KINGSBURY, Robert P. 1972. Oxygen theory in biological treatment plant design. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, 98(3):471-89, June.
21. MOODIE, S.P. & GREENFIELD, P.F. 1978. Treatment of abattoir effluent by trickling filtration. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 50(12):2741-51, Dec.

22. MYTELKA, Alan I. et alii. 1973. Heavy metals in wastewater and treatment plant effluents. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 45(9):1859-64, Sept.
23. OWEN, Dolores T.M. & WILLIAMSON, Kenneth J. 1977. Oxygen limitation in heterotrophic biofilms. In: INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 31., Purdue University, 1976. Proceedings. Ann Arbor, Ann Arbor Science. p. 267-79.
24. PASTANA FILHO, Alberico Prado; CRUZ, Arnaldo Lopes da; GONÇALVES, Dirceu. 1973. Aspectos biológicos do filtro biológico. Revista DAE, São Paulo, 33(93):84-96, dez.
25. PIERCE, D.M. Upgrading Trickling Filters. Report Environmental Protection Agency, USA. EPA. 430/9-78-004 apud SUSCHKA, J. 1981, Filtros Biológicos. Porto Alegre, UFRGS-UNESCO, p. 28.
26. RITTMANN, Bruce E. & MCCARTY, Perry L. 1978. Variable-order model of bacterial-film kinetics. Journal of the Environmental Engineering Division, New York, 104(5):889, 900, Oct.
27. SCHULZE, K.L. 1960. Load and efficiency of trickling filters. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 32(3):245-61, Mar.
28. SCHULZE, K. 1960. Trickling filter theory. Water and Sewage Works, Chicago, 107:100-3, Mar.

29. SHIMON, Meiko; COBALCHINI, Maria Salete; SPOHR, Walter Hugo. 1982. Emissão de efluentes líquidos; norma técnica. Porto Alegre, Departamento do Meio Ambiente. 7 f.
30. SPIEGEL, Murray R. 1971. Estatística. Rio de Janeiro, McGraw-Hill. 580 p.
31. STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 1976. 14. ed. Washington, American Public Health Association. 1193 p.
32. SUSCHKA, Jan. 1981. Filtros biológicos. Porto Alegre, UFRGS-UNESCO. 65 f. (Projeto PNUD/UNESCO/BRA/75/007). Publicação n. 19)
33. SUSCHKA, Jan & CORREA, Alda. 1981. Efeitos da temperatura na remoção do substrato com filtros biológicos. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 28 f. Trabalho apresentado no 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza, 1981.
34. TRICKLING FILTER FLOOR INSTITUTE. s.d. Handbook of trickling filter design. 5. ed. Ridgewood. n.p.
35. VELZ, C.J. 1948. A basic law for the performance of biological filters. Sewage Works Journal, Champaign, 20(4):607-17, July.
36. WALTER, C. Richard. 1959. Effect of high pH on trickling filter performance. Sewage and Industrial Wastes, Washington, 31(12):1416-21, Dec.

37. WILLIAMSON, Kenneth & MCCARTY, Perry L. 1976. A model of substrate utilization by bacterial films. Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 48(1):9-24, Jan.
38. METCALF & EDDY, INC. Wastwater Engineering Treatment, Disposal, Rarse. 2 ed., New York, McGraw-Hill, 1979.
39. BENEFIELD, Larry D. e RANDALL, Clifford W. Biological Process Design for Wastwater Treatment. Cap. 7, p. 391-410.

Cont. Quadro I - Valores dos parâmetros analisados em função do tempo de operação
T.A. - 5 m³/m² dia (com pré-aeração)

DATA	AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)		pH	COND. ELETR. (µS/cm)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	NITK (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₃ (mg/l)	ALCALI NIDADE (mg/l)	ACIDEZ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	S ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	ABS (mg/l)	SÓLIDOS (mg/l)					METAIS (mg/l)		
		AR	LÍQUIDO															TOTAL	TOTAL VOLAT.	DISSOLVIDO	DISSOLVIDO VOL.	SUSPENSO	SUSP. VOL.	Zn	Cu
20.10	AB	17,5	20,0	6,4	475	1,0						166	48			1,5		510		355		155			
	AA		18,8	7,1	430	7,6						154	29												
	E		17,8	6,9	420	5,0						104	26												
21.10	AB	17,2	19,8	6,4	580	0,8	270	444		3,3				37				322		252,5		70			
	AA		17,0	7,1	500	7,2	375	582		4,3				43,5											
	E		17,2	6,8	530	2,7	90	207		7,7				46,0											
22.10	AB	15,0	19,8	6,5	550	1,1				3,3															
	AA		17,8	7,2	450	7,6				3,3															
	E		15,8	6,9	450	3,9				6,7															
23.10	B	15,0	18,5	6,4	450	1,0				4,0															
	AA		18,0	7,2	430	7,6				3,2															
	E		17,0	7,0	415	4,4				4,7															
24.10	AB	20,0	22,8	6,6	580	0,3						160	48												
	AA		21,0	7,2	490	6,8						166	42												
	E		18,2	6,9	425	5,1						114	32												
26.10	AB	22,0	21,5	6,5	500	0,6	138	270	40,8	2,1	29,3			23,7		2,3		550		300		250			
	AA		20,5	7,4	550	7,0	195	345	48,4	3,9	28,9			26,6											
	E		21,0	7,1	550	2,6	40	142	32,3	4,6	22,6			36,0		4,8		425		380		45			
27.10	AB	19,2	20,5	6,3	450	1,4				5,6		154	40												
	AA		19,8	7,3	430	7,4				6,9		159	22												
	E		19,5	7,1	440	4,4				8,0		98	22												
28.10	AB	19,8	20,0	6,5	580	0,7	175	319				141	54												
	AA		19,0	7,3	510	6,7	150	286				154	36												
	E		19,8	7,1	540	2,2	60	168				90	34												
29.10	AB	20,0	21,5	6,4	450	0,9	185	332		3,9		142	64												
	AA		20,5	7,2	500	7,6	132	263		3,6		145	47												
	E		20,0	6,8	500	5,1	40	142		6,6		106	32												

Cont. Quadro II - Valores dos parâmetros analisados em função do tempo de operação
T.A. - 10 m³/m² dia (com pré-aeração)

DATA	AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)			COND. ELETR. (µS/cm)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	NTK (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₃ (mg/l)	ALCALI NIDADE (mg/l)	ACIDEZ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	S ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	ABS (mg/l)	SÓLIDOS (mg/l)						METAIS (mg/l)			
		AR	LÍQUIDO	PH														TOTAL	TOTAL VOLAT.	DISSOLVIDO	DISSOLVIDO VOL.	SUSPENSO	SUSP. VOL.	Zn	Cu	Pb	
13.11	AB	20,7	23,0	6,4	510	0,8	148	284	49,3	0,5	32,4	149	55,0				7,4	327,5	142,5	255,0	97,5	72,5	45,0	0,37	0,18		
	AA		22,8	7,1	470	6,2	-	284	40,3	0,9	28,3	137,5	35,0											0,16	0,18		
	E		21,8	6,9	470	3,8	70	181	32,8	2,7	23,6	122,0	31,5					7,5	277,5	107,5	225	62,5	52,5	45,0	0,34	0,20	
14.11	AB	27,8	25,8	6,6	700	0,6	310	496																			
	AA		25,5	7,3	700	5,2	285	464																			
	E		24,0	7,2	690	3,5	95	214																			
16.11	AB	22,2	23,2	6,4	520	0,8	135	266		2,5		159,0	48,0				2,1	325,0	145,0	275,0	102,5	50	42,5	0,13	0,21		
	AA		23,0	7,2	500	6,0	95	214		3,2		154,0	31,0												0,32	0,66	
	E		22,8	7,1	480	4,0	25	122		7,1		123,0	27,0				2,1	265,0	95,0	245,0	80,0	20,0	15,0	0,29	0,23		
17.11	AB	18,0	23,0	6,7	520	0,8				2,0		169	57,0														
	AA		22,6	7,1	480	6,2				2,8		152	36,0														
	E		20,0	7,0	470	3,4				8,9		100,5	30,0														
18.11	AB	19,8	23,0	6,4	580	0,8	165	306	45,6	2,3	32,3	153	60				4,0	462,5	260	385,0	235,0	77,5	25,0	0,16	0,07	0,46	
	AA		22,7	7,4	550	5,8	135	266	44,6	1,2	31,1	159	40												0,22	0,08	0,54
	E		20,0	7,3	500	4,6	65	174	36,4	11,8	23,2	99,5	34				3,6	435,0	252,5	392,5	237,5	42,5	15,0	0,32	0,07	0,59	
19.11	AB	21,8	23,0	6,4	410	0,8	90	207		6,7																	
	AA		22,9	6,9	395	5,5	90	207		7,3																	
	E		22,2	6,8	380	3,6	35	135		11,5																	
20.11	AB	14,5	21,8	6,8	440	0,8						130,0	26,0														
	AA		20,0	7,5	425	6,3						129,0	16,0														
	E		15,5	7,3	398	6,2						91,0	13,0														
21.11	AB	19,0	22,8	6,4	520	1,0	160	299				155,0	45,0														
	AA		22,1	7,0	490	5,9	120	247				146,0	33,0														
	E		20,0	6,9	420	4,2	50	155				99,5	27,0														

Cont. Quadro III - Valores dos parâmetros analisados em função do tempo de operação
T.A. - 20 m³/m² dia (com pré-aeração)

DATA	AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)		pH	COND. ELETR. (µS/cm)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	NTK (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₃ (mg/l)	ALCALINIDADE (mg/l)	ACIDEZ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	S ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ⁻ (mg/l)	ABS (mg/l)	TOTAL	SÓLIDOS (mg/l)					METAIS (mg/l)				
		AR	LÍQUIDO																TOTAL VOLAT.	DISSOLVIDO	DISSOL. VOL.	SUSPENSO	SUSP. VOL.	Zn	Cu	Pb		
08.12	AB	19,9	23,0	6,6	600	1,1	160					171,0	50,0					387,5	175	332,5	137,5	59,0	37,5					
	AA		22,8	7,0	580	4,6	225					167,0	32,0															
	E		21,1	7,3	520	4,2	70					156,0	21,0						327,5	140	302,5	122,5	25,0	17,5				
09.12	AB	18,0	23,0	6,6	600	0,8	140																					
	AA		23,0	6,9	590	4,8	125																					
	E		21,8	7,2	580	4,5	82																					
10.12	AB	18,0	22,5	6,6	600	0,8	175	276	50,8	1,2	39,6	171,0	61,0		8,9				385,0	170,0	325,0	127,5	60	42,5				
	AA		22,9	6,9	610	4,6	165	233	49,7		37,9	169,0	40,5		7,9													
	E		21,8	7,2	590	4,0	90	168	45,1	12,0	34,2	166,0	31,5		3,5				320	125,0	290,0	105,0	30	20				
11.12	AB	19,2	22,8	6,5	650	0,8		149			2,8																	
	AA		23,0	7,0	630	5,6		250			3,3																	
	E		22,2	7,2	600	4,4		104			7,5																	
12.12	AB	26,0	23,2	7,0																								
	AA		22,0	7,3																								
	E		04,0	7,3																								
14.12	AB	26,0	25,0	6,5					52,5	3,9		178	68,0	24,7	14,3				377,5	187,5	322,5	140,0	55,0	47,5	0,20	0,03	0,53	
	AA		25,0	6,9					48,7	2,9		153	57,0	33,9	5,2										0,16	0,03	0,37	
	E		24,0	7,0					37,8	6,2		143	49,0	32,9	zero				310,0	125,0	277,5	102,0	32,5	23,0	0,18	0,03	0,40	
15.12	AB	26,0	25,2	0,4	500	0,6																						
	AA		25,0	6,8	500	5,2					11,3																	
	E		24,9	6,9	485	4,2					17,6																	
17.12	AB	18,5	24,0	6,5	510	0,7	149	232		3,2	31,7	156,0	51,0	44,8			3,6	350,0	160,0	312,5	132,5	37,5	27,5	0,13		0,47		
	AA		23,8	6,8	500	4,6	130	232	48,1	10,0	30,2	147,0	40,5	33,6											0,15	0,02	0,33	
	E		22,8	7,1	475	4,6	78	150	36,1	14,4	27,3	129,0	28,0	40,0			4,3	322,5	132,5	290,0	110,0	32,5	22,5	0,18	0,05	0,59		
18.12	AB	21,5	24,8	6,3	550	0,6	155	202		1,8																		
	AA		24,5	6,6	520	4,2	155	202		4,2																		
	E		24,0	6,9	500	4,1	60	164		7,2																		
19.12	AB	24,2	25,5	6,4	580	0,7						169,0	65,0															
	AA		25,5	6,8	550	3,8						162,0	57,0															
	E		25,0	7,1	510	4,1						155,0	45,0															
21.12	AB	23,0	25,5	6,5	510	0,9	140		44,2	7,5	28,5	158,0	61,0		9,3		5,4										5,9	
	AA		25,2	6,9	510	4,2	216		47,0	11,6	27,1	152,0	49,5		7,5											1,40	2,0	
	E		25,0	7,1	500	4,1	142		34,7	12,6	24,0	140,0	41,0		1,9		4,5								0,50	0,9		
22.12	AB	20,0	24,0	6,5	530	1,2	250	410		9,8		157,0	62,0															
	AA		23,6	6,9	510	5,6	140	360		18,0		147,0	44,0															
	E		22,8	7,0	485	4,4	58	195		24,0		137,0	38,0															

Cont. Quadro VII - Valores dos parâmetros analisados em função do tempo de operação
T.A. - $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$ $r = 1,5$

DATA	AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)		pH	COND. ELETR. ($\mu\Omega/\text{cm}$)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	NIT (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₃ (mg/l)	ALCALI NIDADE (mg/l)	ACIDEZ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	S ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	ABS (mg/l)	SÓLIDOS (mg/l)					METAIS (mg/l)				
		AR	LÍQUIDO															TOTAL	DISSOL. VOLAT.	DISSOL. VIDO	DISSOL. VOLAT.	SUSPEN. SO	SUSP. VOLAT.	Zn	Cu	Pb	
																											TOTAL
08.6	AB	15,5	19,0	6,9	450	2,7	120	136	40,9	3,4	30,0	136,2	53,4	28,4	4,1	3,7	4,9	310	120	255	110	55,0	10,0				
	E		18,5	7,1	425	5,4	22,5	32	30,3	9,1	24,2	121,1	30,1	32,3	0,1	3,1	4,3	260	60	237,5	57,5	22,5	2,5				
09.6	AB	15,5	21,0	6,6	445	2,6	135	248		2,2																	
	E		21,0	7,0	430	6,2	18	90		8,2																	
10.6	AB	17,5	19,0	6,4	340	3,2																					
	E		19,1	7,0	340	5,6																					
11.6	AB	15,0	18,8	6,9	440	3,0	73	196		3,4		145,9	30,1														
	E		18,2	7,4	440	6,1	12	87		11,1		135,1	27,2														
13.6	AB	18,0	19,5	6,8	580	2,6		369																			
	E		18,5	7,2	540	6,6		140																			
14.6	AB	18,0	19,5	6,7	485	2,0	105	322	37,5	3,9	30,3																
	E		19,8	7,1	475	4,9	20	131	29,1	12,3	23,0																
15.6	AB	16,8	18,2	6,5	285	7,2				4,4		68,1	22,3														
	E		19,0	7,0	285	6,8				13,2		58,4	15,5														
16.6	AB	8,8	17,5	6,6	405	3,6	42	178		4,1		112,4	27,2														
	E		14,0	7,3	380	7,7	13	58		12,3		89,7	17,5														
17.6	AB	7,3	17,0	6,6	390	3,3	60	189	28,5	0,9	15,7	116,7	25,2	35,4	0	2,4	-	335	137,5	300	105,0	35,0	32,5				
	E		14,0	7,2	370	7,3	15	74	20,0	7,3	13,3	96,2	17,5	36,2	0	2,8	-	295	107,5	262,5	100,0	33,5	7,5				
18.6	AB	14,0	18,2	6,8	410	2,8	75	187		0,1		129,7	30,1														
	E		17,3	7,1	405	6,1	14	57		3,8		112,4	24,3														
19.6	AB	19,0	19,0	6,8	465	2,8	160	193		0,1		147,0	41,7														
	E		19,5	7,2	420	4,2	35	72		3,7		108,1	27,2														

APÊNDICE 2

CONCEITOS UTILIZADOS

- Taxa de Aplicação - volume de esgoto proveniente somente do decantador-digestor, aplicado ao filtro por unidade de área por dia.
- Carga Orgânica - é a quantidade de matéria orgânica a ser tratada pelo filtro por dia por unidade de volume do filtro, omitindo-se a carga orgânica reciclada.

APÊNDICE 3

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a - raio do filtro
- AA - afluente aerado
- AB - afluente proveniente do decantador-digestor
- As - superfície específica
- C - película superficial ativa
- D - profundidade do filtro
- E - efluente do filtro biológico
- E_1 - eficiência em percentagem da remoção da DBO de filtro de simples estágio e decantador secundário
- E_2 - eficiência em percentagem da remoção da DBO de filtro em 2º estágio
- F - fator de recirculação
- i - vazão afluente
- Le - DBO remanescente no efluente (mg/l)
- Lo - DBO aplicada no afluente (mg/l)
- Q - taxa de aplicação (símbolo usado nas fórmulas empíricas)
- R - carga de DBO ou DQO removida
- r - taxa de recirculação = $\frac{V}{i}$
- Se - concentração de substrato efluente (g/m^3)
- So - concentração do substrato afluente (g/m^3)
- T.A. - taxa de aplicação
- T - temperatura
- V - volume do meio
- v - vazão recirculada
- W - carga de DBO aplicada por dia
- θ - fator de correção da temperatura

ANEXO 1

COMPARAÇÃO DE CUSTO ENTRE FILTRO BIOLÓGICO COM PRÉ-AERAÇÃO
E COM RECIRCULAÇÃO

- Parâmetros adotados:

População: 50.000 habitantes

Taxa de consumo de água médio = 200 l/hab/dia

Coefficiente de retorno = 0,8

Taxa de aplicação = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$

Eficiência do tratamento primário = 35%

- Parâmetros adotados a partir do ensaio experimental com a coluna piloto

DBO_5 média = 324 mg/l (valor médio da DBO_5 afluyente da ETE - IAPI durante o período 9/7/82 a 30/9/82)

T máx do líquido = 26°C

T min do líquido = 15°C

Altura do filtro = 4 m

α = 0,89

Vazão do projeto médio = $\frac{50.000 \text{ hab} \cdot 0,8 \cdot 200 \text{ l/hab dia}}{1000}$

Vazão = $8000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ou 92,6 l/s

DBO afluyente ao filtro = $324 - (0,35 \cdot 324) = 210 \text{ mg/l}$

Carga de DBO afluyente ao filtro = $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia} \cdot 1/4 \text{ m} \cdot$

$210 \text{ g/m}^3 = 526 \text{ g/m}^3 \text{ dia}$

Pelos gráficos das figuras 4.9, 4.11, 4.24.a e 4.25.a tem-se uma remoção no filtro biológico em torno de 60% e efluente de 55 mg/l. Como já foi observado no item 4.1, com um decantador bem dimensionado espera-se uma melhor eficiência. Tomando uma DBO efluente de 40 mg/l, tem-se:

$$\text{Eficiência da estação} = 88\%$$

1 - Cálculo do diâmetro do filtro biológico

No item 4.3 obteve-se pelo método da NRC um bom ajuste.

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0,443 \sqrt{\frac{W}{V.F}}}$$

$$V = \frac{0,443^2 \cdot E_1^2 \cdot W}{(100 - E_1)^2}$$

$$V = 5992,11$$

$$\text{diâmetro} = 44 \text{ m}$$

2 - Cálculo do equipamento de aeração

Pode-se fazer a aeração ou através de um tanque de aeração ou por injeção direta de oxigênio na canalização do esgoto afluente ao filtro. O primeiro método já tem eficiência comprovada, contudo foge ao objetivo desse trabalho pois haveria acréscimo no custo pela construção de um tanque de aeração. Imaginou-se, então, a segunda maneira. Há de se ressaltar que a sua eficiência e operação demandará estudos experimentais específicos.

- Cálculo do coeficiente de correção da temperatura

$$x_T = 1,02^{T - 20}$$

$$x_T \text{ verão} = 1,13$$

$$x_T \text{ inverno} = 0,91$$

- Cálculo do coeficiente do déficit de oxigênio

$$\text{concentração de } O_2 \text{ requerido } C_s = 5 \text{ mg/l}$$

$$C_s \text{ } 15^\circ\text{C} = 10,2 \text{ mg/l}$$

$$C_s \text{ } 20^\circ\text{C} = 9,17 \text{ mg/l}$$

$$C_s \text{ } 26^\circ\text{C} = 8,22 \text{ mg/l}$$

$$x_o \text{ verão} = \frac{8,22 - 5}{9,17} = 0,35$$

$$x_o \text{ inverno} = \frac{10,2 - 5}{9,17} = 0,57$$

- Coeficiente de correção total

$$x \text{ verão} = 0,89 \times 1,13 \times 0,35 = 0,35$$

$$x \text{ inverno} = 0,89 \times 0,91 \times 0,57 = 0,46$$

- Massa de oxigênio requerido para elevar a concentração de 0 a 5 mg/l

$$\text{massa de } O_2 = 92,6 \text{ l/s} \times (5 - 0) \text{ mg/l}$$

$$\text{massa de } O_2 = 1,7 \frac{\text{kg } O_2}{\text{h}}$$

Segundo Adams, et alii (1), a eficiência de transferência de O_2 pelos aeradores estáticos é da ordem de 2 a 3 lb/ O_2 /hora. HP = 0,91 a 1,36 kg O_2 /HP.hora. Tomou-se um valor médio de 1,14 kg O_2 /HP.hora, que corrigido para a situação mais desfavorável (verão), torna-se igual a 0,40 kg O_2 /HP.hora.

$$\text{Energia consumida (HP)} = \frac{1,7 \text{ kg O}_2/\text{h}}{0,40 \text{ kg O}_2/\text{HP.h}}$$

$$\text{Energia consumida} = 4,25 \text{ HP}$$

- O sistema imaginado seria composto de um HELIXOR no interior da canalização (300 mm) que alimentará o filtro, sendo o ar insuflado por um SOPRADOR através de uma canalização de fofo \emptyset 100 mm.

CUSTO DE INVESTIMENTO

ESPECIFICAÇÃO	QUANT.	UN.	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL
HELIXOR	1	un	80.000,00	80.000,00
SOPRADOR CMEL VS-2,5, motor elétrico e acessórios	2	un	2.500.000,00	5.000.000,00
TUBO fofo \emptyset 100 mm	8	barra	74.392,64	575.141,12

TOTAL Cr\$ 5.675.141,12

CUSTO DE ENERGIA

Energia consumida no mês 2.250,63 kW.h

Custo da energia unitario Cr\$ $\frac{16,042}{\text{kW.h}}$

Custo de energia mensal Cr\$ 36.103,70

3 - Cálculo do equipamento para recirculação

Altura total de elevação: 9 m

Vazão média afluenta estação: 92,6 l/s

Vazão recirculada (70%) = 64,82 l/s

$$\phi \text{ econômico} = 1,3 \sqrt{Q}$$

ϕ econômico sucção: 350 mm

vs = 0,67 m/s

ϕ recalque = 300 mm

vr = 0,92 l/s

$$\text{Energia consumida} = \frac{1000 \times 0,06482 \cdot 9}{75 \times 0,60} = 13 \text{ HP}$$

CUSTO DE INVESTIMENTO

ESPECIFICAÇÃO	QUANT	UN	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL
BOBBA KSB-KWPH-150-315 COM MOTOR ELÉTRICO E ACESSÓRIOS	2	un	3.761.997,75	7.523.995,50
REGISTRO GAVETA ϕ 350 mm	2	un	738.849,60	1.477.699,20
REGISTRO GAVETA ϕ 300 mm	2	un	338.025,96	676.051,92
VÁLVULA DE RETENÇÃO ϕ 300 mm	2	un	392.388,64	784.772,28
CURVA 90° ϕ 300 mm	2	un	138.927,04	277.854,08
TUBO FOFO ϕ 300 mm	40	m	42.889,82	1.715.592,96
TUBO FOFO ϕ 350 mm	5	m	51.490,08	257.450,40
BOBBA PARA POÇO SECO, MOTOR VERTICAL	1	un	112.000,00	112.000,00

TOTAL Cr\$ 12.825.416,34

CUSTO DE ENERGIA

Energia consumida no mês	6884,28 kW.h
Custo de energia unitário	Cr\$ 16,042/ kW.h
Custo de energia mensal	Cr\$ 110.437,62

CONCLUSÃO

Embora com a coluna experimental operada com recirculação obteve-se uma melhor eficiência, o sistema de filtro biológico com pré-aeração do afluente proporciona um custo de implantação menor bem como um custo de energia mensal cerca de 3 vezes inferior ao filtro com recirculação.

Obs.: Tomada de preço realizada em outubro de 1983.