



CETESB

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA
AV. PROF. FREDERICO HERMANN JR., 345 - CEP. 05459 - PINHEIROS
SÃO PAULO - BRASIL

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE DIGES
TOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
TRATANDO ESGOTOS DOMÉSTICOS

DEZEMBRO/1986

DIRETORIA DE PESQUISA

Prof. Dr. Roque Monteleone Neto

ASSISTENTE TÉCNICO CIENTÍFICO

Eng^o Gabriel Murgel Branco

ASSISTENTE ADMINISTRATIVO

Eng.^a Neusa Monteiro de Arruda Juliano

SUPERINTENDÊNCIA DE PESQUISAS DE ÁGUA E RESÍDUOS

Eng^o Roberto Eduardo Bruno Centurión

GERÊNCIA DE PESQUISAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E QUALIDADE DE ÁGUA

Eng^o José Roberto Costa

EQUIPE TÉCNICA

Eng.^a Tânia Mara Tavares Gasi (Pesquisador Principal)

Química Sonia Maria Manso Vieira (Supervisão)

Eng^o Alcides Diniz Garcia Jr. (Pesquisador)

Tec. Quím. Wanderley Borba (Pesquisador)

Químico Carlos E.M. Pacheco (Pesquisador)

EQUIPE RESPONSÁVEL PELOS TESTES COM RADIOISÓTOPOS

Eng^o Sílvio Nakahira

Sigma Gonçalves

Jordons Tevis Francisco

APRESENTAÇÃO

O desenvolvimento dos digestores anaeróbios de fluxo ascendente-DAFA's, e sua aplicação no tratamento de esgotos domésticos, irá produzir um despejo que, em diversas ocasiões, poderá requerer um pós-tratamento.

Este relatório apresenta as atividades realizadas durante os anos de 1985 e 1986 sobre a cloração e a ozonização de efluentes de DAFA's. O trabalho inclui aspectos gerais sobre o pós-tratamento e aponta outros processos a serem utilizados no futuro. Não se trata de um relatório final e, portanto, não é conclusivo.

Os recursos utilizados provieram do convênio CETESB-DAEE, através da OS-140200. Os ensaios de ozonização foram realizados na Filsan, que também projetou e construiu a unidade piloto instalada na CETESB. Por força do contrato de Comodato firmado entre as duas empresas, é vedada a divulgação unilateral de resultados, razão pela qual os itens:

- "3.2 - ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO, e sub-itens
- 3.3 - PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE PILOTO
- 3.4.- TESTES PRELIMINARES NA UNIDADE PILOTO"

devem ser considerados confidenciais.

NOMENCLATURA

- CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo
- DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica, São Paulo
- DAFA-Digestor anaeróbio de fluxo ascendente com manto de lodo
- DBO-demanda bioquímica de oxigênio
- DQO-demanda química de oxigênio
- FILSAN-Filsan Equipamentos e Sistemas S.A., São Paulo
- N. amon. - nitrogênio amoniacal
- NMP - número mais provável
- OS - ordem de serviço
- SS - sólidos suspensos (ou, resíduo não filtrável)
- THM - trihalometanos
- UFP - unidade formadora de placa

INDICE

	pág.
1. <u>ASPECTOS GERAIS DO PÓS-TRATAMENTO</u>	1
1.1. OBJETIVOS DO PÓS-TRATAMENTO	1
1.2. ALTERNATIVAS DE PÓS-TRATAMENTO	2
1.3. NOÇÕES SOBRE DESINFECÇÃO	7
1.3.1. <u>Objetivos e mecanismos da desinfecção</u>	8
1.3.2. <u>Características do desinfetante ideal</u>	8
1.3.3. <u>Fatores que influenciam a desinfecção</u>	9
2. <u>CLORAÇÃO - ATIVIDADES REALIZADAS</u>	10
2.1. CLORAÇÃO DE ESGOTOS TRATADOS	10
2.2. ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO	14
2.2.1. <u>Caracterização do efluente</u>	14
2.2.2. <u>Condições dos ensaios</u>	15
2.2.3. <u>Resultados e discussão</u>	16
2.2.4. <u>Conclusões dos testes em laboratório</u>	24
2.3. PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE PILOTO	25
2.4. TESTES HIDRÁULICOS NA UNIDADE PILOTO	29
3. <u>OZONIZAÇÃO - ATIVIDADES REALIZADAS</u>	42
3.1. OZONIZAÇÃO DE EFLUENTES	42
3.2. ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO	47
3.2.1. <u>Caracterização do efluente</u>	47
3.2.2. <u>Condições dos ensaios</u>	48
3.2.3. <u>Resultados e discussão</u>	48
3.2.4. <u>Conclusões dos testes em laboratório</u>	54
3.3. PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE PILOTO	55
3.4. TESTES PRELIMINARES NA UNIDADE PILOTO	55
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	60

1. ASPECTOS GERAIS DO PÓS-TRATAMENTO

O desenvolvimento de reatores de fluxo ascendente com manto de lodo, para tratamento de esgotos domésticos, se traduz em uma inovação tecnológica na área do saneamento. Na verdade, até o ano de 1984 não havia uma única unidade tratando esgoto sanitário em escala real no país. As primeiras instalações vêm sendo construídas e apenas agora estão entrando em operação. Não causa admiração, portanto, o fato de inexistir experiência em pós-tratamento de digestores anaeróbios de fluxo ascendente com esgotos domésticos. O único trabalho que se conseguiu sobre o tema, da autoria de WILDSCHUT, BEYNEKAMP e RODRIGUEZ, foi apresentado em um seminário, em Cali, em outubro de 1984⁽⁵⁾. Existe literatura para o caso de despejos industriais, mas estas experiências não necessariamente se adaptam ao pós-tratamento do esgoto doméstico.

1.1. OBJETIVOS DO PÓS-TRATAMENTO

O ponto de partida para o estudo do pós-tratamento deve estabelecer os objetivos do mesmo. Interessa saber o que existe no efluente de um digestor anaeróbio de fluxo ascendente e o que se pretende remover. A experiência já acumulada pela CETESB com reatores piloto permite prever a existência dos seguintes parâmetros no esgoto doméstico tratado:

- 1) gases dissolvidos
- 2) nutrientes
- 3) matéria orgânica
- 4) sólidos suspensos
- 5) organismos patogênicos
- 6) cor
- 7) odor

Tendo em vista as concentrações dos constituintes acima mencionados e sua importância relativa, foram definidas as seguintes prioridades para o pós-tratamento de efluentes de DAFA's:

- (1) imprescindível remover: organismos patogênicos
- (2) importante remover: gases dissolvidos, matéria orgânica, sólidos suspensos
- (3) interessante remover: nutrientes
- (4) irrelevante remover: cor

Quanto ao odor, é importante controlá-lo, se o biodigestor estiver localizado perto de residências. No entanto, o problema de odor não se restringe ao efluente apenas, mas está associado ao sistema como um todo. Dessa forma, remover odor no efluente não significa controlá-lo completamente, embora sua remoção deva ser vista como uma vantagem adicional da unidade de pós-tratamento empregada.

1.2. ALTERNATIVAS DE PÓS-TRATAMENTO

Procurou-se verificar entre as diversas opções de tratamento de efluentes quais as que seriam aplicáveis ao esgoto doméstico tratado em DAFA's. Para visualizar uma comparação entre as mesmas, montou-se a tabela 1, reunindo dados da bibliografia que foram complementados com observações pessoais.

Assim, tendo em vista a necessária remoção de organismos patogênicos, foram selecionados os seguintes processos para tratamento do efluente de biodigestores:

- (1) cloração: - optou-se pela cloração por ser uma operação tradicional para desinfetar águas, sendo também aplicável a esgotos. Por outro lado, considerou-se importante realizar a cloração para compará-la com outros processos;
- (2) ozonização: - a idéia de ozonizar o efluente de DAFA's surgiu de um interesse manifestado pela Filsan, que vem desenvolvendo tecnologia nacional a respeito. Apesar de ser um processo sofisticado e dispendioso, achou-se que o mesmo poderia ser testado, inicialmente a nível de laboratório, para se ter uma opção eficiente e compacta a ser utilizada em áreas densamente povoadas;

TABELA 1 : - Alternativas de pós-tratamento de efluente de DAFA para esgoto doméstico bruto

PROCESSO	REMOÇÃO DE													OBSERVAÇÕES						
	GASES DISSOLVIDOS	AMONIA	POSFATOS	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DBO	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DQO	COR	ODOR	SÓLIDOS SUSPENSOS	VÍRUS PATOGENICOS	BACTÉRIAS PATOGENICAS	PROTOZOÁRIOS PATOGENICOS	HELMINTOS PATOGENICOS	INTRODUÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO		ÁREA REQUERIDA	CUSTO IMPLANTAÇÃO	CUSTO OPERAÇÃO	NECESSIDADE DE MÃO DE-OBRA ESPECIALIZADA P/OPERAÇÃO	disponível em escala real	disponível em escala real
DECANTADOR	N	53,1% N-NH ₄ ⁺	-	20-43% (TR=1'-60')	25-37% (DQO to tal)	N	N	40-58% SST 37-65% SSV	0-30% Lodo contami- nado	50-90% Lodo contami- nado	10-50% (E.lvs- tolítica/Lodo contaminado)	30-90% (depên- do de helmito tamado.	N	P	M	P	P	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real
FILTRO ANAERÓBIO	N	-	-	71% (TR=90')	58% DQO (to tal) 39%DQO (solu- vel)	N	N	83%SST 85%SSV	podem sobrevi- ver até 3 me- ses (a)	podem sobrevi- ver por sema- nas (a)	podem sobrevi- ver por sema- nas (a)	os ovos sobre- vivem (a)	N	P	M	P	P-M	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real
FILTRO BIOLÓGICO	S (parte) (?)	não recebe	-	8% ³ (10 m, m ² . dia) 19%DQO solu vel)	11% (DQO to tal)	N	S	Recebe efluen- te do decan- tador	90-95%/Lodo contaminado (b)	90-95%/Lodo contaminado (b)	50% (?) Lodo seguro (b)	50-95% Lodo conta- minado (b)	N	P	M	P	P-M	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real

Fontes: WILDSCHUT et alii (5) ; FEACHEM et alii (2)

(a) = os dados são, realmente, para uma digestão anaeróbia convencional não aquecida. Um filtro anaeróbio poderia remover um pouco mais

(b) = para filtro biológico com decantação primária e secundária, digestão e secagem do lodo.

N = não
S = sim
P = pequena
M = média
G = grande

TABELA 1 - Alternativas de pós-tratamento de efluente de DAFA para esgoto doméstico bruto

PROCESSO	REMOÇÃO DE														OBSERVAÇÕES						
	GASES DISSOLVIDOS	AMÔNIA	FOSFATOS	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DBO	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DQO	COR	ODOR	SÓLIDOS SUSPENSOS	VÍRUS PATOGENICOS	BACTÉRIAS PATOGENICAS	PROTOZOÁRIOS PATOGENICOS	HELMINTOS PATOGENICOS	INTRODUÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO	ÁREA REQUERIDA		CUSTO IMPLANTAÇÃO	CUSTO OPERAÇÃO	NECESSIDADE DE MÃO-DE-OBRA ESPECIALIZADA P/OPERAÇÃO	TECNOLOGIA DISPONÍVEL EM ESCALA REAL	disponível em escala real	disponível em escala real
LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO	S	34,7% N-NH ₄ ⁺	0,33 mg P _{total} & no efluente	75% DBO total	-	S (?)	S	83% STSSSV	99-100%	99-100%	100%	100%	S	G	P	P	P	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real	a vegetação aquática pode atingir vetores de contaminação
LAGOA COM VEGETAÇÃO AQUÁTICA	S	8,1 mg/l N-NH ₄ ⁺ no efluente	-	77% DBO total (TR=5 dias)	57% DQO total	S (?)	S	87% SST 89% SSV	99-100%	99-100%	100%	100%	S (?)	G	P	G	P	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real	a vegetação aquática pode atingir vetores de contaminação
APLICAÇÃO NO SOLO	?	-	-	-	-	-	S desde que bem operado	-	99-100%	100%	100%	100%	-	G (0,05 - 0,3 m ³ /m ² dia)	P	M (?)	P	disponível em escala real	disponível em escala real	disponível em escala real	

Fontes: WILDSHUT et alii (5); FEACHEM et alii (2)
(c) = supondo redução idêntica a das lagoas de estabilização.

S = sim
N = não
P = pequena
M = média
G = grande

TABELA 1 - Alternativas de pós-tratamento de efluente de DAFA para esgoto doméstico bruto

PROCESSO	REMOÇÃO DE												OBSERVAÇÕES						
	GASES DISSOLVIDOS	AMÔNIA	FOSFATOS	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DBO	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DQO	COR	ODOR	SÓLIDOS SUSPENSOS	VÍRUS PATOGENICOS	BACTÉRIAS PATOGENICAS	PROTOZOÁRIOS PATOGENICOS	HELMINTOS PATOGENICOS		INTRODUÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO	ÁREA REQUERIDA	CUSTO IMPLANTAÇÃO	CUSTO OPERAÇÃO	NECESSIDADE DE MÃO DE-OBRA ESPECIALIZADA P/OPERAÇÃO	TECNOLOGIA DISPONÍVEL EM ESCALA REAL
"STRIPPING" COM AR	S	N	N	Potencial para remo-ver	Potencial para remo-ver	N	S	N	N	N	N	N	S	P	P(?)	P-M(?)	M	disponível em escala real	pode reduzir de mandando de clo-roto
REATOR DE CASCATA	S	N	N	Potencial para remo-ver	Potencial para remo-ver	N	(d)	N	N	N	N	N	N	P	P(?)	M(2)	M(?)	nao disponível	Pode reduzir de mandando de clo-roto
FILTRO LENTO DE AREIA	S(?)	N	N	Remove (ocorre sub-tancial at-vidade bioló-gica)	Remove subs-tancial at-vidade bioló-gica	S	(cor apa-rente)	S	99-100%	100%	100%	100%	N	M-G (2-5 m ³ /m ² dia)	M	M(?)	P	disponível em escala real	de difícil de con-trolar poder-se-ão ganhar clo-ro
CLORAÇÃO	S(?)	S (forma clora minas)	N	Potencial para remo-ver	Potencial para remo-ver	S	S	N(?)	podem sobreviver	a maioria e eliminada	provavel-mente elimi-nados	sobrevivem	N	P-M	M-G	M-G	disponível em escala real	de difícil de con-trolar poder-se-ão ganhar clo-ro	

S = sim M = média G = grande (d) = pode haver despreendimento de odor em sistemas abertos

N = nao P = pequena

Fonte = FEACHEM et alii (2)

(d) = pode haver despreendimento de odor em sistemas abertos

TABELA 1 - Alternativas de pós-tratamento de efluente de DAFA para esgoto doméstico bruto

PROCESSO	REMOÇÃO DE													OBSERVAÇÕES									
	GASES DISSOLVIDOS	AMÔNIA	POSFATOS	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DBO	MATÉRIA ORGÂNICA COMO DQO	COR	ODOR	SÓLIDOS SUSPENSOS	VÍRUS	PATOGÊNICOS BACTÉRIAS	PATOGÊNICOS PROTOZOÁRIOS	HELMINTOS	PATOGÊNICOS		INTRODUÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO	ÁREA REQUERIDA	CUSTO	IMPLANTAÇÃO	CUSTO	NECESSIDADE DE MAO-DE-OBRA ESPECIALIZADA P/OPER.	TECNOLOGIA DISPONÍVEL EM ESCALA REAL	DISPONÍVEL EM ESCALA REAL	
ONIZIÇÃO	S	S (pode passar a nitratos e nitritos)	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	P	G	G	G	G	disponível em escala real	disponível em escala real	em escala real	
PROCESSO ELETROLÍTICO	S	S (forma cloraminas)	N	S (?)	S (?)	S (?)	S	S (se ocorrer flotação)	nao verificado (provavelmente podem sobreviver)	nao verificado (e) pode remover	nao verificado (provavelmente eliminados)	nao verificado (provavelmente sobreviverem)	N	P-M	G	G	G	M-G	(?)	disponível em escala de laboratório	disponível em escala de laboratório	prova velmente ir requerer adição de cloro retos	
RADIAÇÃO ULTRA VIOLETA	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	N	P	M	P-M	P	P	disponível em escala real	disponível em escala real		

Fontes: WIENDL (12)

(e) = sem adição de cloretos (o esgoto doméstico continha 50-100 ppm de cloretos), o cloro residual produzido é de 0,5 - 3,0 ppm em 9 minutos. O esgoto requereria de 10 a 30 mg/l e 1 hora de contato; nas concentrações de 3-6 ppm o tempo de contato deveria ser de 3-5 horas, para redução de bactérias.

S = sim
 N = não
 P = pequeno
 M = médio
 G = grande

- (3) radiação ultra-violeta: o uso de radiação ultra-violeta foi cogitado por ser um processo compacto, simples e que não requer o uso de produtos químicos. Por outro lado, com este tipo de pós-tratamento não se deve esperar nenhuma outra melhoria da qualidade do efluente, como remoção de matéria orgânica, sólidos ou outros;
- (4) filtração lenta em areia: - os filtros lentos são muito e fetivos para remover patogênicos, sólidos e matéria orgânica. Essas unidades requerem grandes áreas, mas podem ser alternativas interessantes em locais onde haja área disponível;
- (5) lagoas de maturação: - as lagoas, assim como os filtros, também são muito eficientes, embora requeiram grandes áreas. São, entretanto, passíveis de aplicação em zonas rurais.

Optou-se pelo estudo, em primeiro lugar, da cloração e da ozonização, devido à disponibilidade de equipamentos. A filtração em areia e a radiação ultra-violeta serão abordadas a partir de 1987. Quanto às lagoas de maturação, devido à não disponibilidade de área junto ao biodigestor de 120 m³ da CETESB, não será possível estudar a aplicação das mesmas.

Todos os processos deverão utilizar o efluente desse digestor, que terá as características iguais às das unidades em escala real.

1.3. NOÇÕES SOBRE DESINFECÇÃO

Tanto a cloração, quanto a ozonização, e ainda a radiação ultra-violeta, são processos que visam desinfetar as águas e efluentes. Dessa forma, achou-se necessário introduzir o trabalho abordando algumas noções sobre desinfecção.

1.3.1. Objetivos e mecanismos da desinfecção

O objetivo da desinfecção é reduzir organismos patogênicos encontrados nos esgotos e eventualmente na água. Pode ser conseguida através do uso de⁽⁴⁾: (1) agentes químicos; (2) agentes físicos; (3) meios mecânicos e (4) radiação.

Dentre os compostos químicos normalmente usados estão incluídos⁽⁴⁾: (1) fenóis e compostos fenólicos; (2) alcoóis; (3) iodo; (4) cloro e seus compostos; (5) bromo; (6) ozona; (7) metais pesados e compostos; (8) tintas; (9) sabões e detergentes sintéticos; (10) compostos quaternários de amônia; (11) peróxido de hidrogênio; (12) álcalis e ácidos.

1.3.2. Características do desinfetante ideal

As características do desinfetante químico ideal seriam as seguintes⁽⁴⁾:

- (1) toxicidade aos microrganismos (largo espectro de atividade em grandes diluições);
- (2) solubilidade (em água ou tecido celular);
- 3) estabilidade (pequena perda de ação germicida);
- (4) não toxicidade a formas superiores de vida (tóxico a organismos e não tóxico ao homem e outros animais);
- (5) homogeneidade (solução uniforme em composição);
- (6) interação com material estranho (não deve ser absorvido por matéria orgânica);
- (7) toxicidade à temperatura ambiente (efetivo na faixa de temperatura ambiente);
- (8) penetração (capacidade de penetrar através de superfícies);
- (9) não corrosivo e não descolorante (não deve desfigurar metais ou descolorir roupas);
- (10) habilidade desodorizante (desodorizar enquanto desinfeta);
- (11) capacidade detergente (deve ter ação de limpeza para acentuar a efetividade da ação desinfetante);
- (12) disponibilidade (disponível em grandes quantidades e a preços razoáveis).

Evidentemente o item (9) interessa mais de perto à desinfecção de águas de abastecimento público.

Poder-se-ia incluir, nesta lista, a necessidade do processo de desinfecção poder ser construído, operado e consertado, na região em que se pretende implantá-lo, além de se ter acesso a peças de reposição.

1.3.3. Fatores que influenciam a desinfecção

Os fatores que influenciam a ação de desinfetantes são os seguintes⁽⁴⁾: (1) tempo de contato; (2) concentração e tipo do agente químico; (3) intensidade e natureza do agente físico; (4) temperatura; (5) número de organismos; (6) tipos de organismos; (7) natureza do líquido que suspende os organismos.

Desses, considera-se que o tempo de contato é o parâmetro mais importante⁽⁴⁾ e dessa forma, o mecanismo da desinfecção pode ser descrito pela Lei de Chick, que na forma diferencial é dada pela equação:

$$\frac{dN}{dt} = -kn \quad \text{onde: } N = \text{número de organismos}$$

$$t = \text{tempo}$$

$$k = \text{constante (tempo}^{-1}\text{)}$$

Integrando tal equação, obtém-se:

$$- \ln \frac{N}{N_0} = kt$$

que representa uma reta. A constante k é obtida plotando-se $-\ln \frac{N}{N_0}$ versus tempo de contato, t . N_0 significa a concentração inicial de organismos.

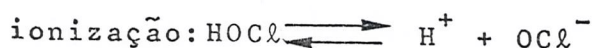
Equações para o efeito da temperatura, do número de organismos e outros podem ser encontradas na literatura especializada.

2. CLORAÇÃO - ATIVIDADES REALIZADAS

Inicialmente será abordada a teoria sobre cloração de esgotos tratados, sendo em seguida descritas as atividades desenvolvidas durante 1986.

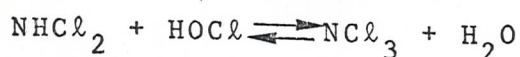
2.1. CLORAÇÃO DE ESGOTOS TRATADOS

Quando se adiciona cloro gasoso em água ocorrem as seguintes reações⁽⁴⁾:



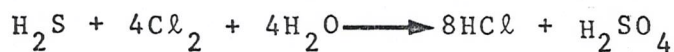
As quantidades de HOCl e OCl⁻ presentes são chamadas de cloro livre disponível. A distribuição relativa dessas duas espécies é importante porque a eficiência desinfetante do HOCl é cerca de 40 a 80 vezes maior que a do OCl⁻. Por outro lado, existe uma relação entre pH, temperatura e distribuição percentual de ácido hipocloroso (HOCl) e íon hipoclorito (OCl⁻). Quanto menor o pH, maior a incidência de HOCl.

Os esgotos domésticos tratados através de digestores anaeróbios de fluxo ascendente contêm substâncias que reagem com o cloro, a saber: H₂S, metano, amônia, matéria orgânica, entre outros. O cloro combina-se com a amônia para formar monocl^oraminas, diclor^oraminas e tricloreto de nitrogênio (ou triclor^oraminas), conforme reações abaixo:



Normalmente, as espécies mais abundantes são a mono e a diclor^oraminas (NH₂Cl e NHCl₂) que possuem um poder desinfetante muito menos eficiente que o ácido hipocloroso (HOCl) e o íon hipoclorito (OCl⁻); são chamadas de cloro combinado disponível.

A reação com H_2S é a seguinte⁽³⁾:



O cloro também reage com matéria orgânica complexa, formando moléculas menores até que se chegue ao clorofórmio, $CHCl_3$. Existe a possibilidade de formação de clorometano (CH_3Cl) e diclorometano (CH_2Cl_2); esses compostos, entretanto, são demasiadamente voláteis e por isso pouco sujeitos à detecção pelos métodos analíticos usuais para halometanos.

Como se pode perceber, na desinfecção de esgotos tratados ou não, perde-se uma quantidade do cloro adicionado em reações secundárias, que não visam a desinfecção; a este fenômeno de nomina-se demanda de cloro.

Por outro lado, o cloro residual significa a concentração do halogênio que permanece após um certo tempo, durante a qual a demanda foi satisfeita. Este cloro residual poderá estar combinado (na forma de cloraminas e outros compostos orgânicos nitrogenados) ou livre (quando se encontra como ácido hipocloroso ou íons hipoclorito)^(3,4).

Cloração ao "break-point"

O fenômeno que ocorre ao se adicionar cloro a um esgoto con tendo amônia pode ser explicado pela figura 1.

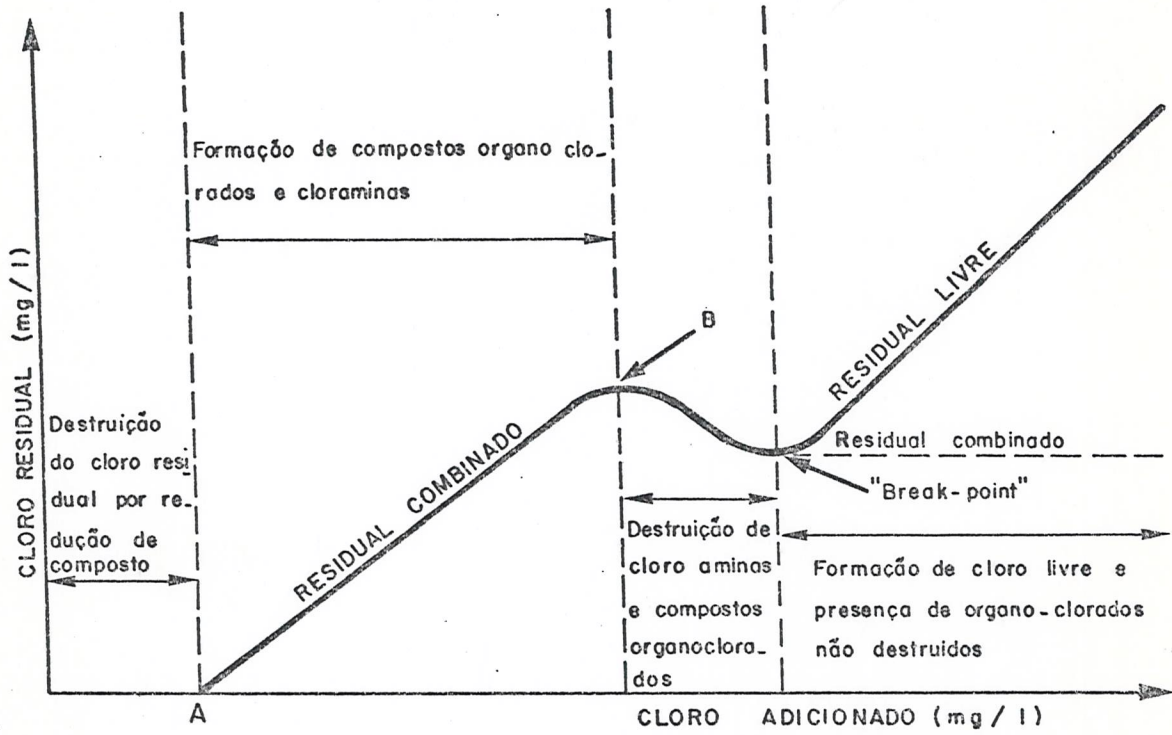
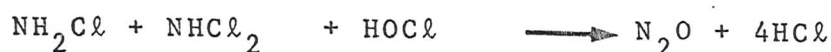


Figura 1 - Curva geral obtida durante cloração ao "break-point"

Ao se adicionar cloro, o material facilmente oxidável (Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S , matéria orgânica) reage com o mesmo, reduzindo a maior parte do cloro ao íon cloreto (ponto A)⁽⁴⁾. Após satisfação da demanda imediata, o cloro continua a reagir com amônia formando cloraminas, entre pontos A e B. Entre o ponto B e o "break-point", parte das cloraminas será convertida a tricloroamina, enquanto que o remanescente será oxidado a óxido nítrico e nitrogênio, com formação do íon cloreto. Continuando-se a adição de cloro, praticamente todas as cloraminas serão oxidadas no "break-point". As reações que possivelmente ocorrem são:



Após destruição da amônia originalmente presente, a adição de mais cloro se traduzirá em cloro livre disponível.

Apesar da formação do ácido clorídrico, a alcalinidade presente no esgoto poderá determinar alterações desprezíveis no pH.

Ressalte-se que, a presença de outros compostos que reagem com cloro pode alterar significativamente o formato da curva na figura 1.

2.2. ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO

CETESB e FILSAN conduziram uma série de ensaios preliminares de cloração com o efluente de um digestor anaeróbio de fluxo ascendente piloto, em funcionamento na CETESB. O objetivo desses testes, que se encontram descritos a seguir, foi verificar a remoção de organismos patogênicos, principalmente bactérias, bem como eventuais reduções em matéria orgânica, nutrientes, cor e sólidos. Não foram pesquisadas formas resistentes, como larvas e ovos de protozoários por se ter verificado que ocorria uma remoção significativa das mesmas no próprio digestor.

2.2.1. Caracterização do efluente

Utilizou-se o efluente de um digestor anaeróbio de fluxo ascendente tratando esgotos domésticos, com capacidade útil de 106 l, ou seja, em escala piloto. Este digestor apresentou, durante cerca de 170 dias de operação, os seguintes resultados médios (1):

parâmetro	alimentação	efluente	% remoção
DBO	180	55	69
DBO Solúvel	-	28	84
DQO	406	142	65
DQO Solúvel	-	70	83
SS	191	60	69

TABELA 2 - Resultados médios de operação de DAFA piloto para esgotos domésticos para temperatura média do reator de 23°C, tempo de detenção hidráulico de 4 horas. Tempo de operação = 170 dias; valores em mg/l.

Para os ensaios de cloração foi coletada uma amostra do efluente desse digestor piloto que apresentou as seguintes características:

coliformes totais = $8,0 \times 10^7$ org/100 ml
coliformes fecais = $1,7 \times 10^7$ org/100 ml
estreptococos fecais = $5,0 \times 10^6$ org/100 ml
colifagos = 29850 UFP
salmonela = ausente
pH^(*) = 6,87
DBO^(*) = 47 mg/l
DQO^(*) = 252 mg/l
cor^(*) = 120 unidades cor (Pt Cl₆)
turbidez^(*) = 53 JTU
amônia^(*) = 47,5 mg/l
SS^(*) = 95 mg/l
sólidos dissolvidos^(*) = 211 mg/l

Os métodos analíticos utilizados são os descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater⁽⁶⁾.

2.2.2. Condições dos ensaios

Os doze ensaios de cloração foram realizados em recipientes com cerca de 10 litros. Misturava-se o esgoto tratado com a solução desinfetante para se obter as concentrações desejadas de cloro, conforme tabela 3. Após a adição do desinfetante, agitava-se a mistura vigorosamente e deixava-se a mesma em repouso durante o tempo de contato desejado; a tabela 1 mostra, também, as concentrações de cloro utilizadas e os tempos de contato impostos. Os tempos de contato e concentrações iniciais de cloro foram selecionados com base na literatura^(2,3,4).

(*) análises efetuadas pela Filsan

TABELA 3 - Caracterização dos ensaios

ENSAIO	VOLUME DE SOLUÇÃO DESINFETANTE (*) ADICIONADO (mL)	CONCENTRAÇÃO INICIAL DE Cl_2 OBTIDA (mg/l)	TEMPO DE CONTATO (MINUTOS)
01	3,0	5	20
02	6,0	10	20
03	9,0	15	20
04	3,0	5	30
05	6,0	10	30
06	9,0	15	30
07	3,0	5	40
08	6,0	10	40
09	9,0	15	40
10	3,0	5	60
11	6,0	10	60
12	9,0	15	60

(*) solução mãe = 16,6 mg Cl_2 /mL

2.2.3. Resultados e discussão

A tabela 4 mostra os resultados das análises microbiológicas (realizadas pela CETESB) e físico-químicas (efetuadas no laboratório da Filsan). Os resultados das análises de trihalometanos, que também foram conduzidas na CETESB, estão apresentados na tabela 5.

a) Parâmetros físico-químicos

Nas condições dos ensaios foi possível observar o seguinte, em relação aos parâmetros físico-químicos:

- (1) ocorreu elevação de pH em todos os ensaios, de 6,87 para valores de 7,50 a 8,39;

- (2) para os experimentos em que foi analisada a DBO, houve um aumento na mesma, de 47 mg/l para 74-112 mg/l (valor médio de 89 mg/l). A DBO praticamente dobrou, o que poderia ser explicado pela possibilidade do cloro ter reagido com cadeias orgânicas complexas, transformando-as em substâncias mais facilmente degradáveis. Não está descartada a hipótese de interferências nos ensaios de DBO;
- (3) a DQO aumentou de 252 mg/l para uma faixa de 295 mg/l a 480 mg/l ($\bar{X} = 360$ mg/l), o que corresponde a um acréscimo médio de 39%. Supõe-se que tenha havido interferência do cloro adicionado nas análises;
- (4) houve uma pequena remoção de cor, da ordem de 17%, para todos os ensaios; obteve-se um resultado final de 100 independente da concentração de cloro usada ou de tempo de contato;

TABELA 4 - Resultados de Análises microbiológicas e físico-químicas. Cloração de efluente de DAFA

ENSAIO	CONCENTRAÇÃO CLORO INICIAL (mg/l)	pH	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	COR (un)	TURBIDEZ (JTU)	AMÔNIA (mg/l)	SS (mg/l)	COLIFORMES TOTAIS (org/100 ml)	COLIFORMES FECAIS (org/100ml)	ESTREPTOCOS FECAIS (org/100ml)	COLIFACOS (UFP)
01	5	7,57	-	356	100	53	46,5	95	$3,0 \times 10^4$	110	110	745
02	10	7,50	-	400	100	53	-	110	$8,0 \times 10^3$	< 2	230	265
03	15	7,65	74	321	100	56	42,5	95	$1,3 \times 10^3$	< 2	< 2	135
04	5	8,11	-	295	100	54	42,5	60	$8,0 \times 10^3$	2	80	820
05	10	7,70	112	356	100	53	-	65	$1,3 \times 10^3$	< 2	30	10
06	15	8,12	92	330	100	54	-	100	280	< 2	170	25
07	5	7,84	-	339	100	56	-	95	$1,7 \times 10^3$	26	9	100
08	10	7,67	88	374	100	54	47,5	55	70	< 2	40	145
09	15	7,48	-	313	100	54	36,0	100	7	< 2	230	85
10	5	8,39	-	322	100	53	-	120	$8,0 \times 10^3$	23	230	190
11	10	7,70	79	408	100	53	46,5	110	$2,3 \times 10^3$	< 2	130	ausente
12	15	7,56	-	391	100	56	-	115	280	< 2	70	5

Tabela 5 - Resultados de análises de trihalometanos - Cloração de efluente de

DAFA

ENSAIO	TEMPO DE CONTATO (min)	CONCENTRAÇÃO INICIAL AL CLORO (mg/l)	CLORO-FÓRMIO (µg/l)	DICLORO BROMO METANO (µg/l)	CLORO DI-BROMO TANO (µg/l)	BROMO-FÓRMIO (µg/l)	THM TOTAL (µg/l)
01	20	5	2,6	nd	nd	nd	2,6
04	30	5	2,0	nd	nd	nd	2,0
07	40	5	2,0	nd	nd	nd	2,0
10	60	5	2,0	nd	nd	nd	2,0
03	20	15	2,0	nd	nd	nd	2,0
06	30	15	2,3	nd	nd	nd	2,3
09	40	15	2,0	nd	nd	nd	2,0
12	60	15	2,0	nd	nd	nd	2,0

nd = não detectável

- (5) a turbidez praticamente não se alterou;
- (6) o teor de sólidos suspensos variou, provavelmente devido a problemas de coleta de amostras;
- (7) houve formação de clorofórmio (CHCl_3), não se detectando outros halometanos. A concentração de trihalometanos total variou de 2,0 a 2,6 mg/l, o que é um valor bem inferior aos 100 mg/l que a legislação americana recomenda para águas potáveis. Por outro lado, pode ter ocorrido volatilização dos trihalometanos, uma vez que os ensaios foram conduzidos em recipientes abertos para a atmosfera.

b) Parâmetros microbiológicos

A tabela 6 mostra, para os diversos ensaios, a porcentagem de remoção de coliformes totais, coliformes fecais e de estreptococos fecais. Entretanto, é também interessante verificar o valor absoluto desses parâmetros no efluente clorado, conforme indicado na tabela 4, retrocitada. Observou-se que:

- (1) o valor dos coliformes totais no efluente após cloração variou entre 7 e $3,0 \times 10^4$ org/100 ml, correspondendo a uma eficiência de remoção de 100% e 99,9625%;
- (2) para os coliformes fecais obteve-se remoção mais acentuada, com valores absolutos de < 2 a 110 org/100 ml, equivalendo a remoções de 100% e 99,9994%. Ressalte-se que para nove dos doze ensaios a remoção foi aproximadamente de 100% (ou, acima da quinta casa decimal);
- (3) ocorreu, também, remoção acentuada de estreptococos fecais, com valores absolutos no efluente após cloração de 230 a < 2, e eficiências de remoção 99,9954% a 100%;

Tabela 6 - Porcentagens de remoção de coliformes totais e fecais e estreptococos fecais nos ensaios de cloração de efluente de DAFA

ENSAIO	TEMPO DE CONTATO (min)	CONCENTRAÇÃO INICIAL CLORO (mg/l)	% REMOÇÃO COLIFORMES TOTAIS	% REMOÇÃO COLIFORMES FECAIS	% REMOÇÃO ESTREPTOCOCOS FECAIS
01	20	5	99,9625	99,9994	99,9978
02	20	10	99,9900	100	99,9954
03	20	15	99,9984	100	100
04	30	5	99,9900	100	99,9984
05	30	10	99,9984	100	99,9994
06	30	15	99,9997	100	99,9966
07	40	5	99,9979	99,9998	99,9998
08	40	10	99,9999	100	99,9992
09	40	15	100	100	99,9954
10	60	5	99,9900	99,9999	99,9954
11	60	10	99,9971	100	99,9974
12	60	15	99,9997	100	99,9986

- (4) pode-se dizer que, nas condições dos ensaios, a resistência das bactérias obedeceu à seguinte ordem:

coliformes totais > estreptococos fecais > coliformes fecais

Foi notável a suscetibilidade dos coliformes fecais, quando comparados aos totais, estando aqueles em concentrações significativamente inferiores no efluente clorado. Pode-se supor, dessa verificação, que os gêneros Klebsiella, Citrobacter e Enterobacter são mais resistentes que Escherichia. Por outro lado, os estreptococos fecais, conforme literatura especializada, são reconhecidamente mais resistentes que os coliformes fecais. É necessário ter em mente, que o objetivo da cloração do efluente do digestor anaeróbio é de desinfetá-lo, ou seja, destruir organismos patogênicos, e não de esterilizá-lo, destruindo todos os organismos. Dessa forma, pode-se dizer que a remoção de coliformes totais é menos significativa que a dos outros indicadores;

- (5) procurou-se aplicar a teoria de Chick, ou cinética de 1.^a ordem, aos dados obtidos. Verificou-se que, para os valores de estreptococos fecais e coliformes fecais, havia um aumento do número de organismos com o tempo, o que seria contrário à teoria de Chick. Na verdade, não existiria explicação para tal fato, pois é pouco provável que as bactérias citadas pudessem se reproduzir em efluente na presença de cloro residual e em apenas dez ou cinquenta minutos.

Acredita-se que as eficiências de remoção tenham atingido um patamar, uma vez que, em todos os casos, eram bastante elevadas; seria o mesmo que tentar uma leitura precisa de valores colocados no fim de escala.

Para os coliformes totais, cujos resultados não estavam no "fim da escala" como os anteriores, foi possível aplicar a teoria desejada. A tabela 7, mostra a preparação dos dados,

retratados na figura 2. Ajustando-se as retas obtidas para diferentes concentrações iniciais de cloro pelo método dos mínimos quadrados, foram obtidas as seguintes equações:

concentração inicial = 5 mg/l

$$- \ln \frac{N}{N_0} = 4,98 t + 0,14$$

$$(r^2 = 1,00)$$

concentração inicial = 10 mg/l

$$- \ln \frac{N}{N_0} = 13,83 t - 0,02$$

$$(r^2 = 1,28)$$

concentração inicial = 15 mg/l

$$- \ln \frac{N}{N_0} = 5,35 t + 0,27$$

$$(r^2 = 0,94)$$

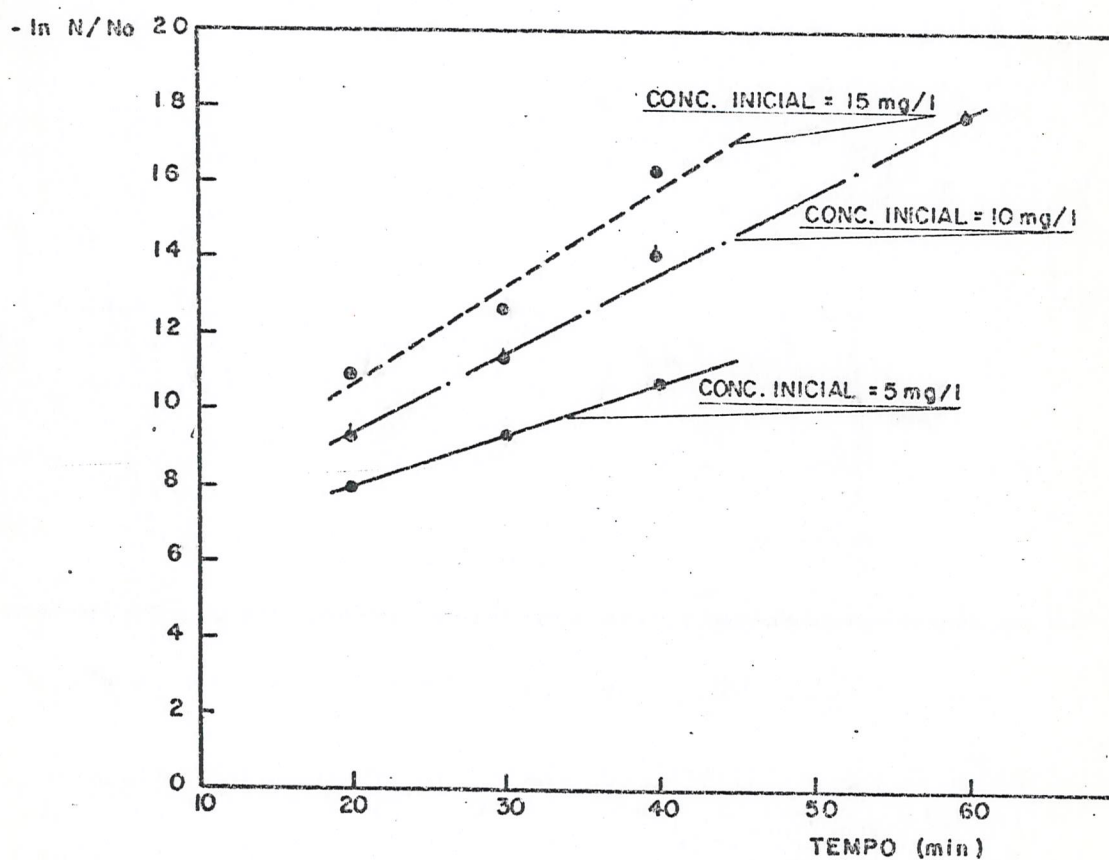


Figura 2 - Aplicação da lei de Chick (cinética de 1.^a ordem) à remoção de coliformes totais por cloração em efluente de DAFA tratando esgotos domésticos.

Tabela 7 - Preparação dos dados de remoção de coliformes totais conforme teoria de Chick

CONCENTRAÇÃO INICIAL CLORO (mg/l)	TEMPO DE CONTATO, t (min)	COLIFORMES TOTAIS, N (org/100 ml)	$-\ln N/N_0$
5	20	$3,0 \times 10^4$	7,89
5	30	$8,0 \times 10^3$	9,21
5	40	$1,7 \times 10^3$	10,76
5	60	$8,0 \times 10^3$	9,21
10	20	$8,0 \times 10^3$	9,21
10	30	$1,3 \times 10^3$	11,03
10	40	70	14,04
10	60	< 2	17,72
15	20	$1,3 \times 10^3$	11,03
15	30	280	12,56
15	40	7	16,34
15	60	280	11,03

Coliformes totais = $N_0 = 8,0 \times 10^7$ org/100 ml

2.2.4. Conclusões dos testes de laboratório

Resultados preliminares de cloração de efluentes de digestor anaeróbio de fluxo ascendente tratando esgotos domésticos, em ensaios do tipo batelada em escala de laboratório, para concentrações iniciais de cloro de 5, 10 e 15 ppm e tempos de contato de vinte a sessenta minutos, permitiram chegar às seguintes conclusões:

- (1) foi satisfatória a remoção de coliformes fecais (>99,9994%) e estreptococos fecais (>99,9954%). A remoção de coliformes totais foi superior a 99,99%, ressalvando-se que este indicador não é tão significativo, para fins de desinfecção, quando os já citados;
- (2) nas condições dos ensaios, as concentrações de trihalometanos formados não são significativas;
- (3) não ocorreram variações importantes nos parâmetros cor e turbidez;
- (4) não foi possível concluir sobre a variação da matéria orgânica no efluente clorado. Serão necessários mais ensaios para uma avaliação definitiva deste aspecto.

Em resumo, os dados dos primeiros ensaios de cloração foram animadores, podendo-se recomendar o seguinte:

- (1) realizar ensaios em efluente de digestor anaeróbio de fluxo ascendente, escala real, em regime batelada e contínuo;
- (2) confirmar os dados de remoção de bactérias patogênicas e verificar remoção de vírus e formas resistentes (se essas estiverem presentes no efluente de digestores maiores);

- (3) investigar, com maior profundidade, a remoção de amônia e a cloração ao "break-point";
- (4) confirmar os dados de formação de trihalometanos, em particular a de clorofórmio;
- (5) determinar se ocorre variação nos parâmetros indicadores de matéria orgânica (DBO e DQO);
- (6) verificar problemas ocasionais;
- (7) levantar, junto à literatura especializada, os possíveis efeitos deletérios de teores de cloro residual nas fauna e flora aquática de corpos receptores;
- (8) verificar custos
- (9) verificar a cloração com efluente após o mesmo ter passado por "stripping" com ar. O "stripping" poderia remover gases dissolvidos, como o metano, e dessa forma reduzir a demanda de cloro, bem como o potencial de formação de trihalometanos.

2.3. PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE PILOTO

Projetou-se uma unidade de cloração, que pode ser vista esquematicamente na figura 3. O sistema possui três tanques de contato em série, sendo cada um deles projetado para fornecer um tempo de detenção de vinte minutos; obtêm-se, dessa maneira, tempos de residência de 20, 40 e 60 minutos. Cada um dos tanques de contato é subdividido em 10 compartimentos, de sorte que quando se trabalhar com 20 minutos de contato o esgoto a ser clorado passará por 10 compartimentos, para 40 minutos serão 20 compartimentos e para 60 minutos serão 30 compartimentos.

Pretende-se, dessa maneira, que o regime hidráulico do sistema seja próximo do de um reator tubular, após o primeiro, o segundo e o terceiro tanques de contato.

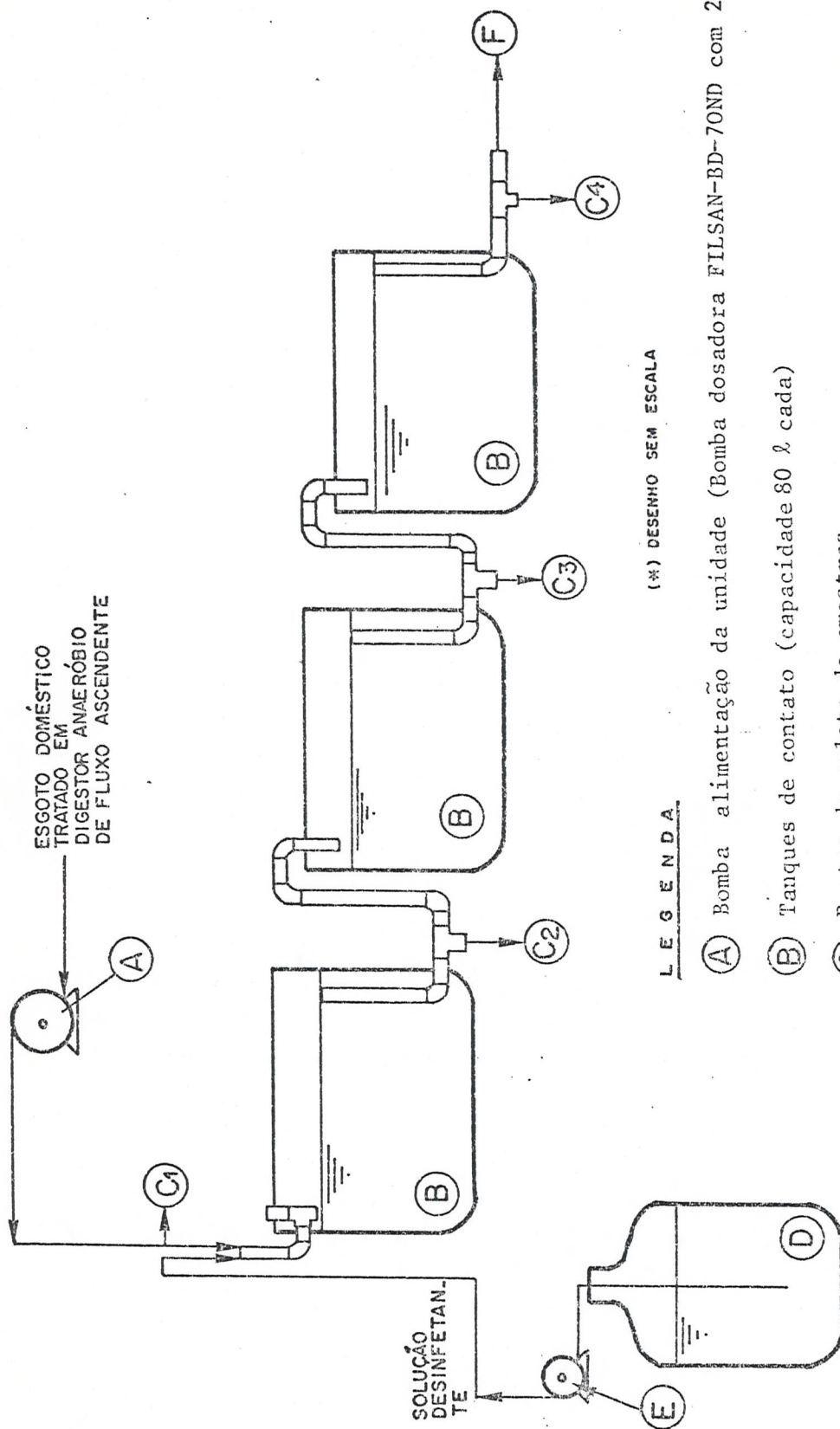


Figura 3 - Esquema da unidade piloto de cloração

Vazão do efluente a ser clorado = 4 l/min = 240 l/h
 dimensões aproximadas dos tanques

de contato = 41 cm x 56 cm x 42 cm

material dos tanques de contato = caixa d'água brasilit com re
 vestimento em pintura epoxi

material das chicanas = PVC

A mistura da alimentação com a solução desinfetante é feita
 na própria tubulação de entrada no primeiro tanque.

As figura 4 e 5 mostram detalhes da unidade.

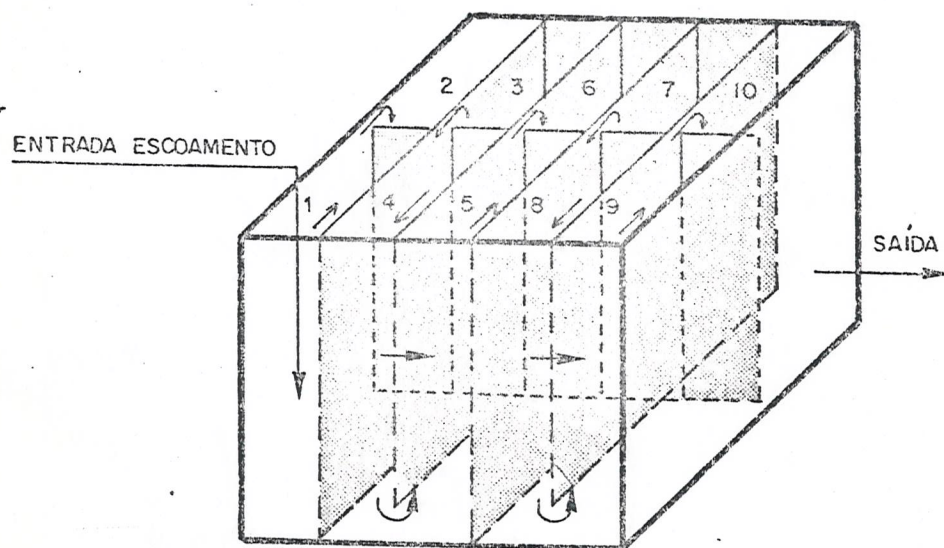


Figura 4 - Esquema do escoamento nos dez compartimentos
 de cada um dos tanques de contato.

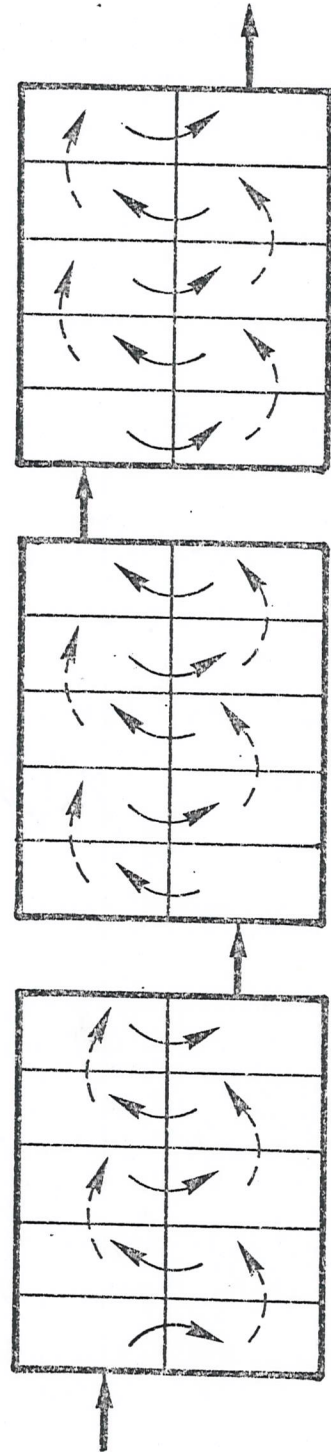


Figura 5 - Esquema da direção do fluxo nos três tanques de contato.

LEGENDA

↑ DIREÇÃO DO FLUXO

FLUXO PELA PARTE SUPERIOR DAS CHICANAS

FLUXO PELA PARTE INFERIOR DAS CHICANAS



2.4. TESTES HIDRÁULICOS NA UNIDADE PILOTO

A eficiência da cloração é função direta do regime de escoamento que ocorre nos tanques de contato. Como se sabe, o escoamento tubular garante maior eficiência que o de mistura completa.

A Divisão de Aplicações de Radioisótopos da CETESB efetuou a injeção de traçadores radioativos, com o objetivo de determinar o tempo de detenção real do sistema e o coeficiente de dispersão.

Os ensaios são feitos pela introdução de um traçador na entrada da unidade, levantando-se a curva da saída do traçador com o tempo; a figura 6 mostra uma curva típica, que é conhecida como curva C. A observação desta figura permite levantar uma série de parâmetros, tais como:

t_i = intervalo de tempo para o início do aparecimento do traçador no efluente, considerando que a introdução do traçador tenha se dado no tempo zero;

t_{10} = tempo para que 10% do traçador injetado tenha saído no efluente;

t_p = tempo para atingir a concentração máxima (valor modal);

$t_a = t_{50}$ = tempo médio ou tempo em que 50% do traçador tenha passado

$t_g = \frac{\sum ct}{\sum c}$ = tempo para atingir o centro de gravidade, ou centróide, da curva, ou tempo de residência real;

t_{90} = tempo para que 90% do traçador injetado tenha passado no efluente;

T = tempo de detenção teórico

Esses parâmetros estão indicados na figura 6.

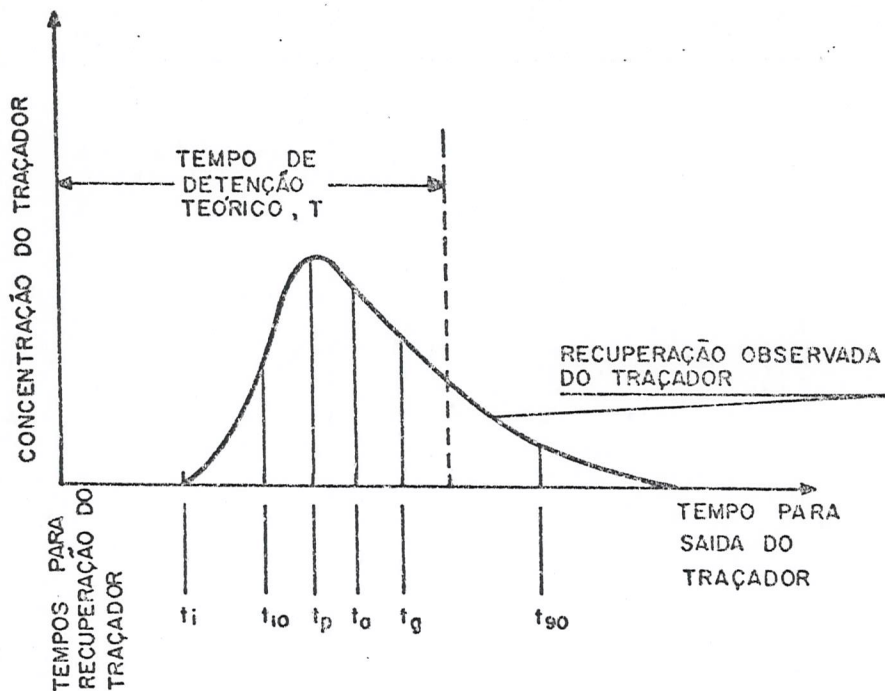


Figura 6 - Curva C obtida em estudos com traçadores.

Com os parâmetros assinalados é possível calcular os seguintes índices:

$$\text{Índice de Morril} = \frac{t_{90}}{t_{10}}$$

$$\text{Índice de curto-circuito} = \frac{t_g - t_p}{t_g}$$

O índice de Morril é considerado como um indicador do grau de dispersão no tanque considerado. Para um regime de vazão tubular o índice de Morril seria 1,0. Para o índice de curto-circuito, ao valor zero corresponderia uma bacia ideal de sedimentação, por exemplo, ou um escoamento tubular perfeito.

As figuras 7, 8 e 9, foram obtidas após o primeiro, segundo e terceiro tanques de contato, para uma vazão de alimentação de 4 l/min. \pm 5%. Os tempos de residência foram, respectivamente, de 20, 40 e 58 minutos, sendo praticamente idênticos aos de projeto.

Os índices de Morril e de curto-circuito, para um, dois e três tanques, estão apresentados na tabela 8.

TABELA 8 - Índices de Morril e de curto-circuito da unidade piloto de cloração

Sistema Considerado	Índice de Morril	Índice de curto-circuito
tanque 1	29/12 = 2,42	0,150
tanques 1 + 2	52/28 = 1,86	0,063
tanques 1 + 2 + 3	74/44 = 1,68	0,052

De acordo com o índice de curto-circuito, o sistema composto pelos três tanques aproxima-se mais do escoamento tubular perfeito que o composto por 2 tanques, e este mais que o sistema com apenas 1 tanque. Quanto aos números em si, pode-se compará-los com os obtidos por KOTHANDARAMAN e EVANS⁽¹⁰⁾ em estudos hidráulicos com tanques de contato para cloração. Os autores trabalhavam com um modelo de tanque retangular com 3,6 m de comprimento, 0,6 m de largura e 0,45 m de altura do nível da água; os estudos foram feitos com e sem chicanas e introdução de ar. Os valores do índice de curto circuito estiveram entre 0,17 e 0,31, indicando que a unidade piloto da CETESB tem regime de escoamento mais próximo do tubular que aquela usada no estudo citado.

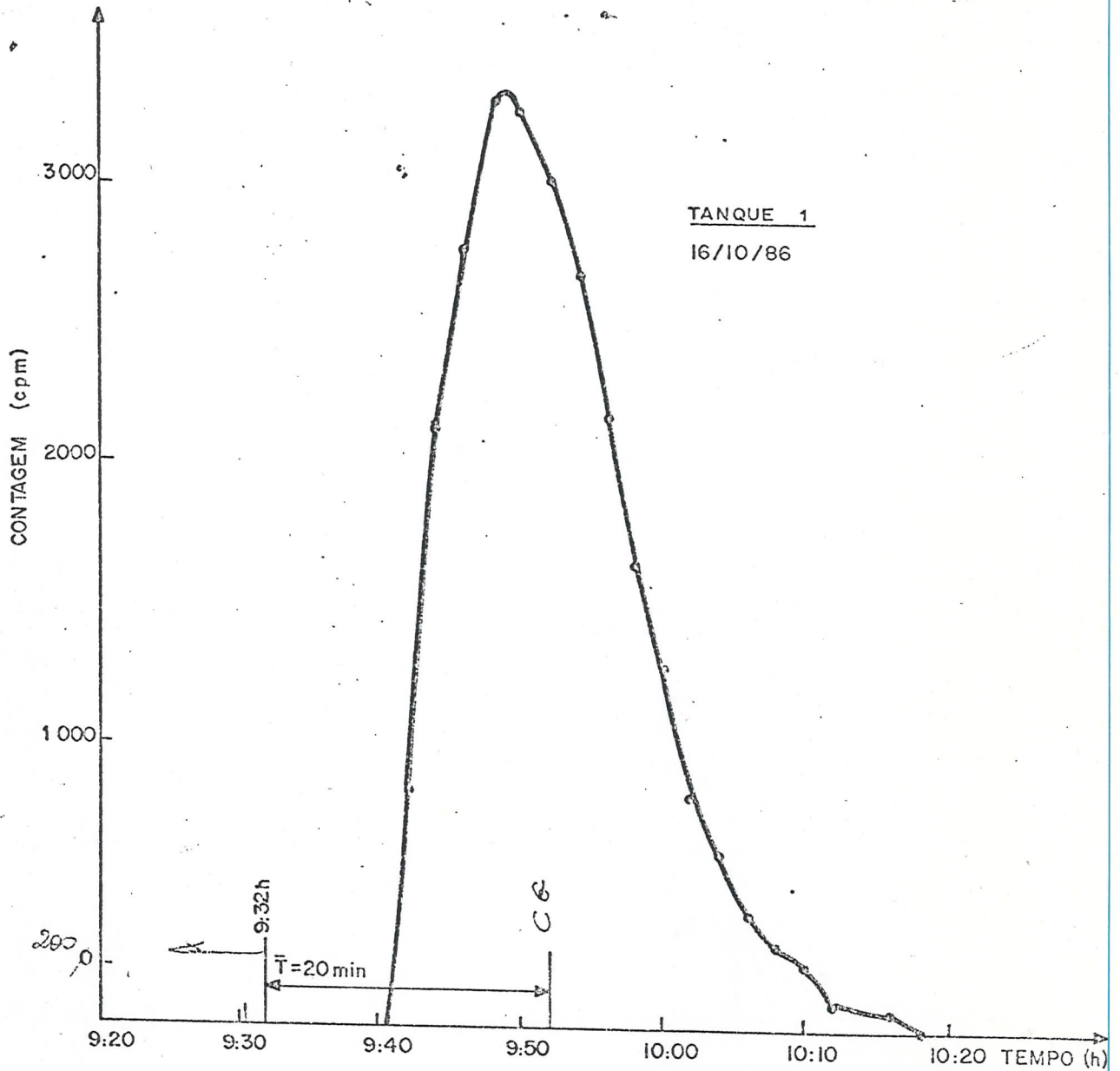


Figura 7 - Curva C e tempo de residência para tanque 1

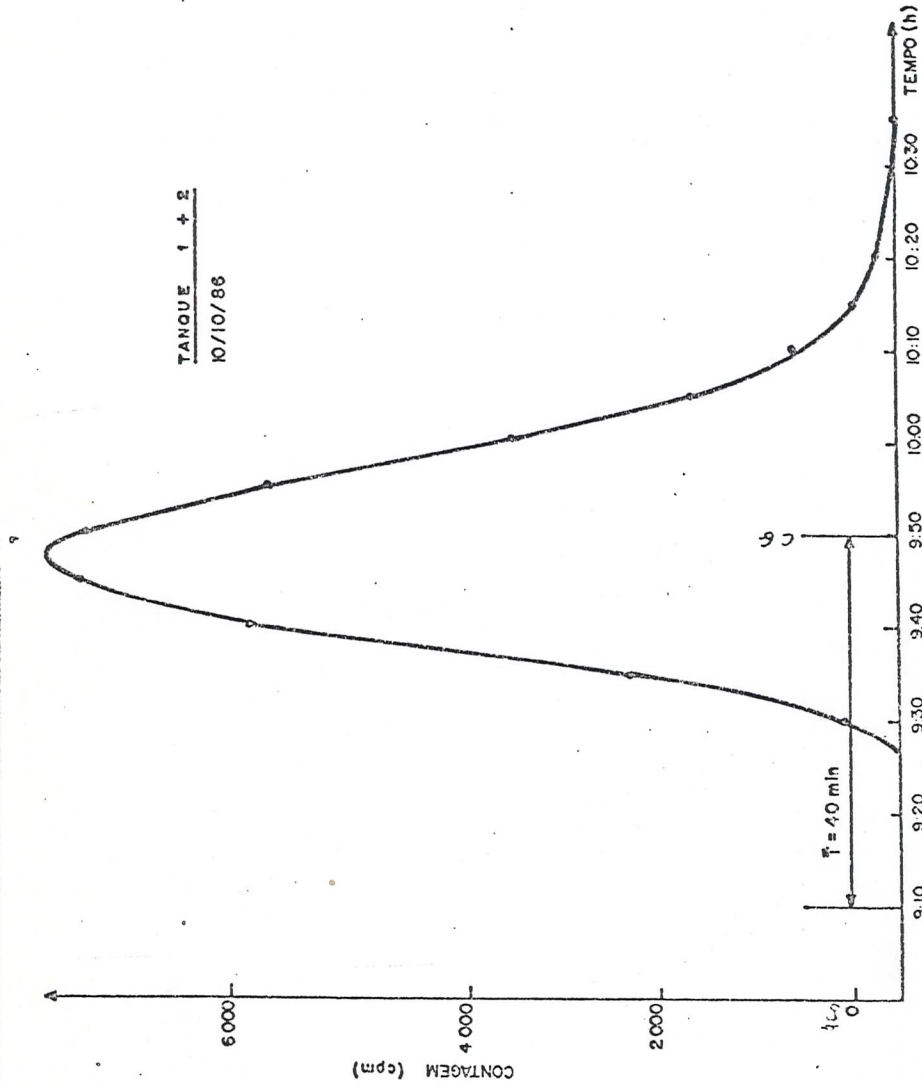


Figura 8 - Curva C e tempo de residência para conjunto dos tanques 1 e 2.

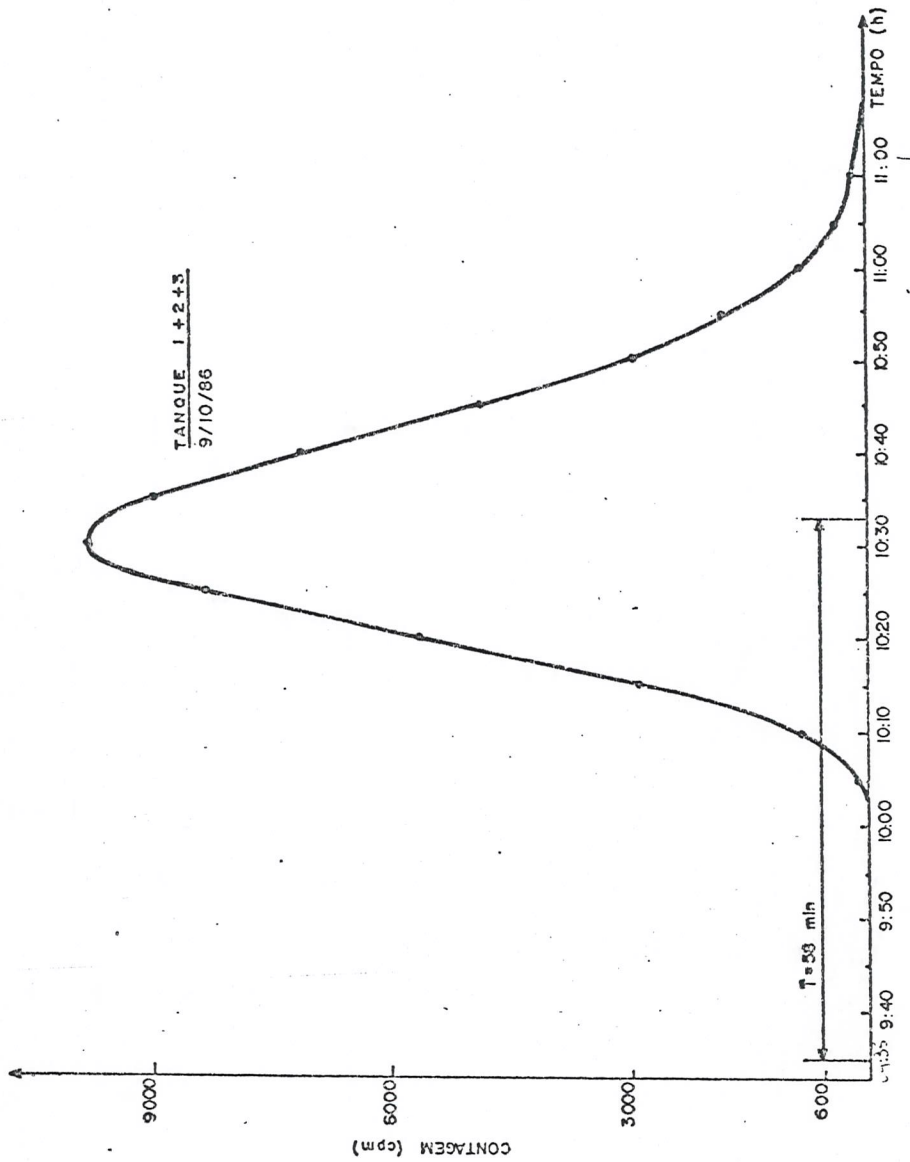


Figura 9 - Curva C e tempo de residência para o conjunto dos tanques 1,2 e 3.

Quanto aos índices de Morril, os mesmos foram de 2,42, 1,86 e 1,68, e indicaram que o sistema formado por três tanques em série tem regime mais próximo do tubular que o sistema com dois tanques, e este por sua vez ainda mais próximo do tubular do que quando se usa apenas um tanque de contato. Para efeito de comparação, o estudo de KOTHANDARAMAN e EVANS⁽¹⁰⁾, já citado, obteve índices de Morril que estiveram entre 1,8 (unidade controle) e 4,6, o que permite reforçar a conclusão acima.

Na verdade, os índices discutidos dão uma idéia do quanto o sistema se afasta da idealidade, pois consideram apenas dois pontos da curva C. O ideal é medir mais precisamente a dispersão, de forma a poder considerá-la em equações que visem modelar o fenômeno que está ocorrendo no sistema. É melhor usar a integral da curva C e considerar todos os pontos, que apenas dois, como no caso dos índices de Morril e de curto-circuito.

De acordo com LEVENSPIEL⁽⁷⁾ o modelo de escoamento tubular disperso, ou modelo disperso, seria aquele em que ao escoamento tubular de um fluido é sobreposta alguma mistura, cuja grandeza é independente na porção dentro do recipiente. Esta condição implica na inexistência de bolsões estagnantes, regiões não-banheadas ou curto-circuito do fluido no recipiente. A figura 10 mostra uma visualização das condições descritas.

A equação diferencial que rege a difusão molecular na direção x é dado pela lei de Fick.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

D = coeficiente de difusão molecular

Pode-se considerar que as perturbações em um fluido são da mesma natureza estatística que a difusão molecular.

Então:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

D = coeficiente longitudinal ou axial de dispersão
 Este coeficiente caracteriza o grau de mistura durante o escoamento.

C = concentração

t = tempo

Na forma adimensional, tem-se

$$z = \frac{x}{L}$$

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{tu}{L}$$

onde: L = comprimento de reator
 $\theta = t/\bar{t} =$ tempo reduzido, adimensional
 t = tempo
 $\bar{t} = V/v =$ tempo médio de residência
 u = velocidade do fluido

A equação diferencial básica que representa o modelo de dispersão é dada por:

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{\partial c}{\partial z}$$

onde o grupo adimensional $\frac{D}{uL}$ é chamado de número de dispersão do recipiente, e mede a extensão da dispersão axial. Tem-se que:

$D/uL \rightarrow 0$, dispersão desprezível, portanto escoamento tubular;

$D/uL \rightarrow \infty$, grande dispersão, portanto escoamento em mistura.

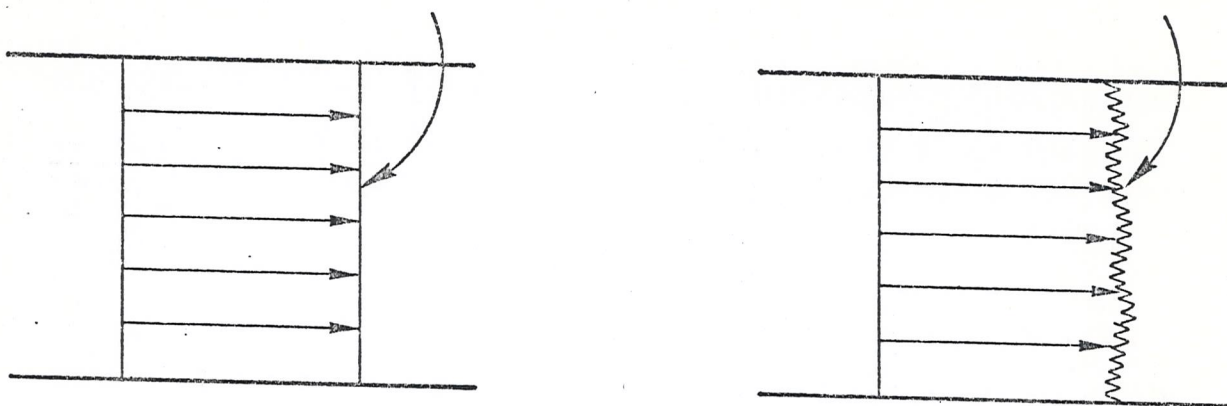


Figura 10 - Representação do modelo de dispersão (escoamento tubular)

FONTE: LEVENSPIEL (7)

A figura 11 mostra curvas C para diversas extensões de agitação; em vasos fechados, conforme previstas pelo modelo de dispersão.

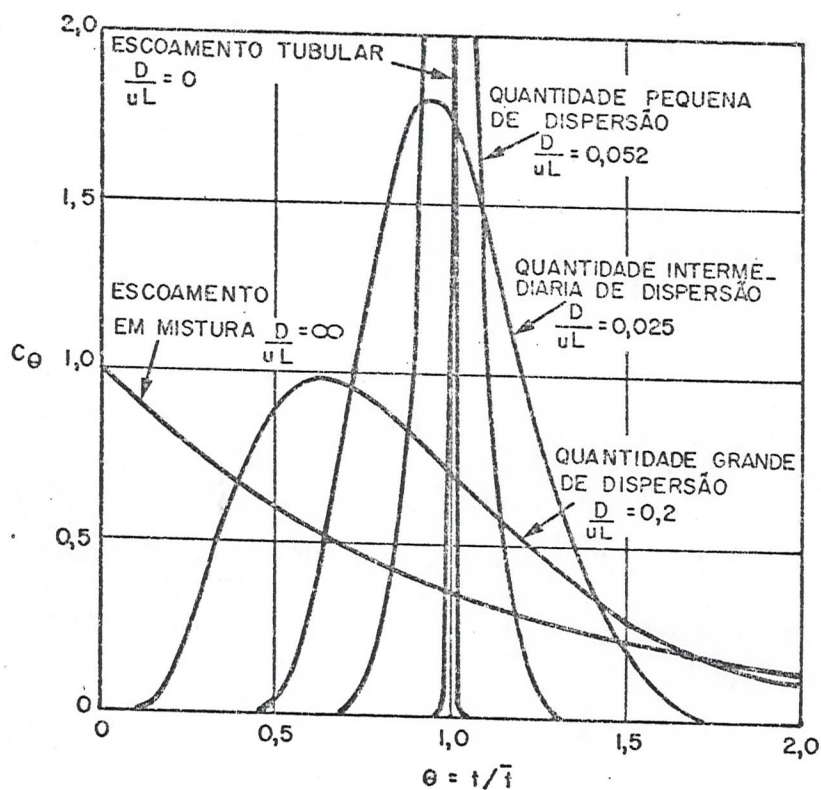


Figura 11 - Curvas C em vasos fechados para várias extensões de agitação, como previsto pelo modelo de dispersão.

(7)

FONTE: LEVENSPIEL

Considerando pois, um sistema com regime de escoamento disperso, com valor de D/uL conhecido, no qual esteja ocorrendo uma reação de 1.^a ordem, como a cloração, a eficiência deste sistema é dada por:

$$\frac{CA}{CA_0} = \frac{4a \exp\left(\frac{1}{2} \frac{uL}{D}\right)}{(1+a)^2 \exp\left(\frac{a}{2} \frac{uL}{D}\right) - (1-a)^2 \exp\left(-\frac{a}{2} \frac{uL}{D}\right)}$$

$$a = \sqrt{1 + 4K t \cdot (D/uL)}$$

onde:

CA = concentração na saída (por exemplo, algum parâmetro bacteriológico, como coliformes fecais);

CA₀ = concentração na entrada;

K = coeficiente de 1.^a ordem de remoção do constituinte considerado;

t = tempo de detenção (T);

d = nº de dispersão = $\frac{D}{uL}$ (M⁰L⁰T⁰)

D = coeficiente de dispersão axial ((L²T⁻¹))

u = velocidade do fluido (LT⁻¹)

L = comprimento do percurso do fluido, do influente ao efluente (L)

A equação anterior pode ser escrita:

$$\frac{CA}{CA_0} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}$$

que pode ser usada, por exemplo, para medir a eficiência da cloração, em termos de redução de organismos patogênicos.

Quando a dispersão \tilde{e} é de pequena intensidade, o valor \underline{d} é pequeno, e a equação anterior pode ser simplificada como:

$$\frac{CA}{CAo} = \frac{4ae(1-a/2d)}{(1+a)^2}$$

ou, de acordo com LEVENSPIEL⁽⁷⁾,

$$\frac{CA}{CAo} = e \left[-kt + (kt)^2 d \right]$$

Para reatores tubulares ideais, $d=0$, e a equação fica:

$$CA/CAo = e^{-kt}$$

Para se calcular o número de dispersão \tilde{e} a partir da curva C, deve-se verificar, inicialmente, se o sistema aproxima-se do modelo em recipiente aberto ou fechado. No caso, o recipiente fechado significa que ocorre mudança na característica de escoamento nas fronteiras, conforme ilustrado na figura 12.

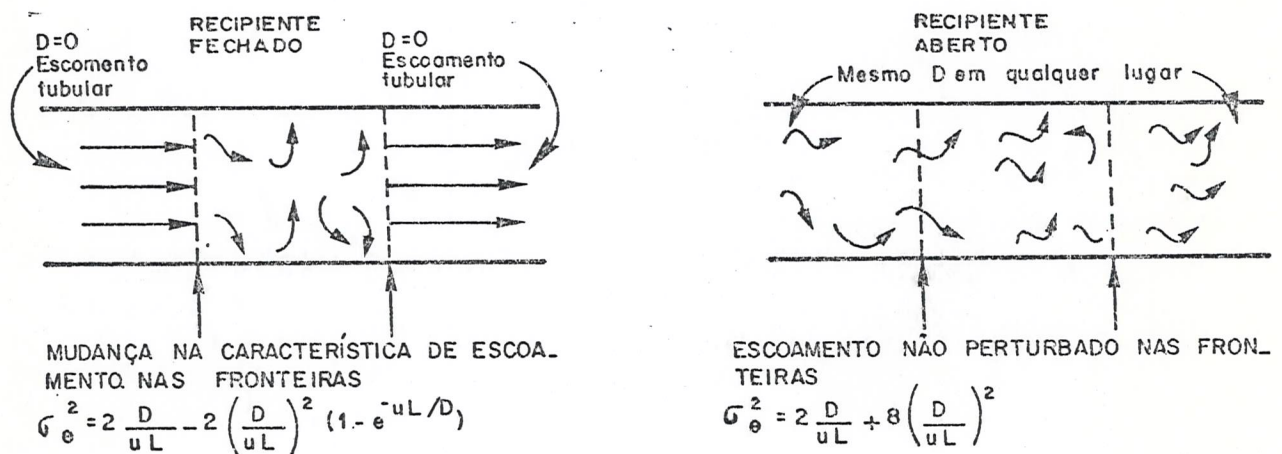


Figura 12 - Duas das várias condições de contorno possíveis para um escoamento num vaso.

Fonte: LEVENSPIEL⁽⁷⁾

O sistema de cloração implantado assemelha-se mais ao tipo "recipiente fechado", uma vez que há mudança na característica do escoamento na entrada e saída dos tanques. Neste caso, a variança da curva C é dada por:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 (1 - e^{-uL/D})$$

A variância é dada por:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - \bar{t}^2$$

onde

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} C \cdot t dt}{\int_0^{\infty} C \cdot dt}$$

e a variância adimensional é

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$$

O cálculo do número de dispersão é obtido plotando-se as curvas C x t ; Ct x t e Ct² x t e calculando-se as áreas das mesmas, que fornecem as integrais. Calcula-se, então, \bar{t} , σ^2 e σ_{θ}^2 . O valor de D/uL é obtido por tentativas da equação:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2D}{uL} - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 (1 - e^{-uL/D})$$

anteriormente citada.

Para o sistema de cloração instalado, os valores obtidos foram:

Tanque	\bar{t} (min)	σ^2	σ_θ^2	D/uL
1	20,33	42,23	0,1020	0,0262
1+2	39,63	92,72	0,0590	0,0150
1+2+3	58,19	130,81	0,0386	0,0097

De acordo com LEVENSPIEL⁽⁷⁾, os valores do nº de dispersão encontrados para o sistema estudado variam entre uma quantidade intermediária de dispersão (quando se usa apenas um tanque de contato) e uma quantidade pequena de dispersão.

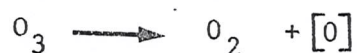
3. OZONIZAÇÃO - ATIVIDADES REALIZADAS

Para a ozonização, será observada a mesma sequência utilizada para a cloração. Assim, inicialmente serão abordados alguns conceitos sobre a ozonização de efluentes.

3.1. OZONIZAÇÃO DE EFLUENTES

O odor pungente do ozônio foi percebido pela primeira vez por Van Marum, em 1781. Em 1905, foi instalada a primeira unidade de ozonização, para esterilização da água, em Nice na França. Provavelmente o ozônio seria o desinfetante mais popular, não fosse a descoberta do gás cloro durante a I Guerra Mundial. As preocupações mais recentes sobre os efeitos deletérios do cloro e seus compostos em corpos d'água, bem como a formação de triha lometanos a partir da matéria orgânica em efluentes, têm aumentado o interesse na ozonização.

O ozônio é uma forma alotrópica do oxigênio, com fórmula molecular O_3 e peso molecular de 48,0 g por mol. Na temperatura ambiente é um gás sem cor, mas com odor característico. É mais solúvel em água que o oxigênio, mas é instável, possuindo um tempo de meia vida que é avaliado em minutos. Por isso, precisa ser produzido no local em que será utilizado. Este gás é um oxidante poderoso, atacando toda a matéria orgânica presente, incluindo microorganismos. Sua decomposição em água seria retratada pela seguinte equação:



O oxigênio nascente seria um dos agentes oxidantes. Outros radicais que também se formariam são: HO_2^{-3} , OH^- e H^+ , acreditando-se que pelo menos os ânions HO_2^{-3} e HO^- estão envolvidos na destruição de bactérias.

A ação do ozônio é rápida na destruição de microorganismos. Entretanto, deverá inicialmente ser satisfeita uma "demanda de ozônio", em que é oxidada matéria orgânica eventualmente presente no despejo que se quer desinfetar. É necessário que se atinja um determinado teor de ozônio, a partir do qual se obtém rápida redução de microorganismos.

Para exemplificar, em estudos feitos com esgoto doméstico tratado, obteve-se praticamente 100% de remoção de coliformes fecais após 10 minutos de contato e com teores de O_3 absorvido entre 50 e 60 mg/l.

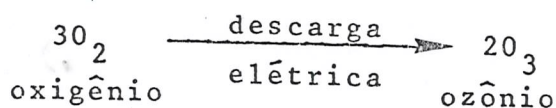
Uma unidade de ozonização é constituída basicamente pelas seguintes unidades:

- (1) geração do gás ozônio, que inclui pré-condicionamento do gás de alimentação e dispositivos para recirculação do mesmo. Como exemplo, pode-se gerar ozônio em uma corrente de ar que terá, por sua vez, que ser filtrada, seca, resfriada e comprimida;
- (2) dissolução do ozônio, a partir do gás de alimentação, no despejo que se quer tratar. Isto pode ser feito com difusores, injetores ou turbinas;
- (3) detenção do despejo ozonizado por um período suficiente, até que o contaminante orgânico seja oxidado. Para isto, podem ser utilizadas colunas de contato, com ou sem recheio, sistemas de colunas etc.

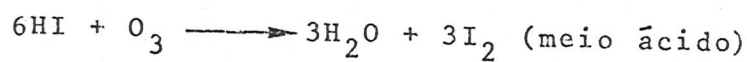
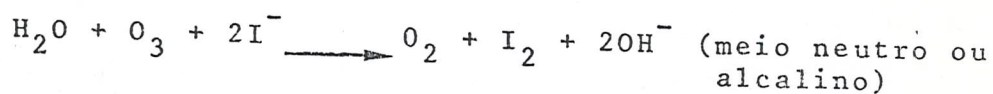
O ozônio pode ser produzido de três formas:

- (1) por descarga elétrica;
- (2) por eletrólise do ácido perclórico;
- (3) por lâmpadas ultravioletas.

Os dois primeiros métodos produzem grandes concentrações de O_3 ; as lâmpadas ultra-violetas fornecem, apenas, cerca de $0,003 \text{ g } O_3 / \text{h}$ para cada $1/100$ watts. A única forma econômica de produzir ozônio é através de descarga elétrica, através da seguinte reação:



A análise do ozônio em solução aquosa pode ser feita através de diversos métodos, sendo recomendado o iodométrico. Este envolve a oxidação de KI a I_2 na presença de excesso de iodo. As reações que ocorrem são:



O iodo é titulado com solução de tiosulfato de sódio ($Na_2S_2O_3$) e indicador de amido.

As principais desvantagens da ozonização são as seguintes:

- (1) elevado custo de implantação;
- (2) necessidade de se produzir O_3 no local de uso;
- (3) alta reatividade mas com pequena seletividade;
- (4) pequena solubilidade de O_3 em condições normais;
- (5) operação e manutenção problemáticas;
- (6) impossibilidade de se manter residual de O_3 por grandes períodos de tempo;
- (7) processo mais caro que a cloração, por exemplo.

Na verdade, para tratamento de despejos, a impossibilidade de se manter residual de O_3 pode se traduzir em uma vantagem, uma vez que o ozônio é tóxico para a flora e fauna aquáticas.

As vantagens da ozonização de efluentes seriam:

- (1) grande espectro desinfetante. Potencial para remover vírus e formas resistentes, além de bactérias;
- (2) remove cor e odor;
- (3) remove matéria orgânica (DBO, DQO) e turbidez;
- (4) remove surfactantes;
- (5) pode remover amônia, por nitrificação;
- (6) pode remover biocidas;
- (7) adiciona oxigênio dissolvido ao despejo;
- (8) não forma compostos indesejáveis no despejo tratado;
- (9) evita os problemas associados ao transporte de produtos químicos perigosos;
- (10) ocupa pequena área.

Para finalizar, é importante referir alguns aspectos de segurança do trabalho, uma vez que o ozônio é um gás tóxico. O odor de gás é detectado a concentrações de cerca de 0,02 a 0,05 ppm. Pessoas sensíveis manifestam irritação no nariz e na garganta já no nível de detecção (0,05 ppm), secagem da mucosa respiratória superior a 0,1 ppm, e secagem da garganta a valores pouco acima de 0,1 ppm. Aumentando os níveis de ozônio para 1,0 ppm, após 30 minutos de tempo de exposição ocorre dor de cabeça. Mudanças nos parâmetros visuais, como acuidade visual, foram observadas para níveis de 0,2 a 0,5 ppm; mudanças nas funções pulmonares, como a capacidade vital, ocorrem para valores entre 0,1 e 1,0 ppm. A figura 13 mostra a toxicidade do ozônio. Pode-se dizer que o gás é fácil de ser controlado, pois os níveis de

deteção são baixos, e o gás s \bar{o} \bar{e} perigoso a níveis maiores e a prolongados períodos de exposição. Dessa forma, pode-se adotar como regra básica para operadores de unidade de ozonização, que sejam adotados as medidas de segurança previstas (como por exemplo, desligar o suprimento de energia elétrica) assim que se perceber o odor do ozônio.

Evidentemente, o local da unidade deve ser monitorado de tempo em tempos para se verificar os níveis de ozônio no ambiente de trabalho. Além do mais, a unidade de ozonização deve prever dispositivos para o desligamento da mesma no caso de problemas operacionais; também o gás que sai das colunas de contato deve passar por aparelho para destruição do O₃ eventualmente presente. Tem-se como aspecto positivo o fato de se poder rapidamente interromper a produção de ozônio, além de que o mesmo normalmente é usado em pequenas concentrações, e não é estocado sob pressão. Deve-se lembrar que, também, o cloro é um gás venenoso e requer normas de segurança para sua manipulação.

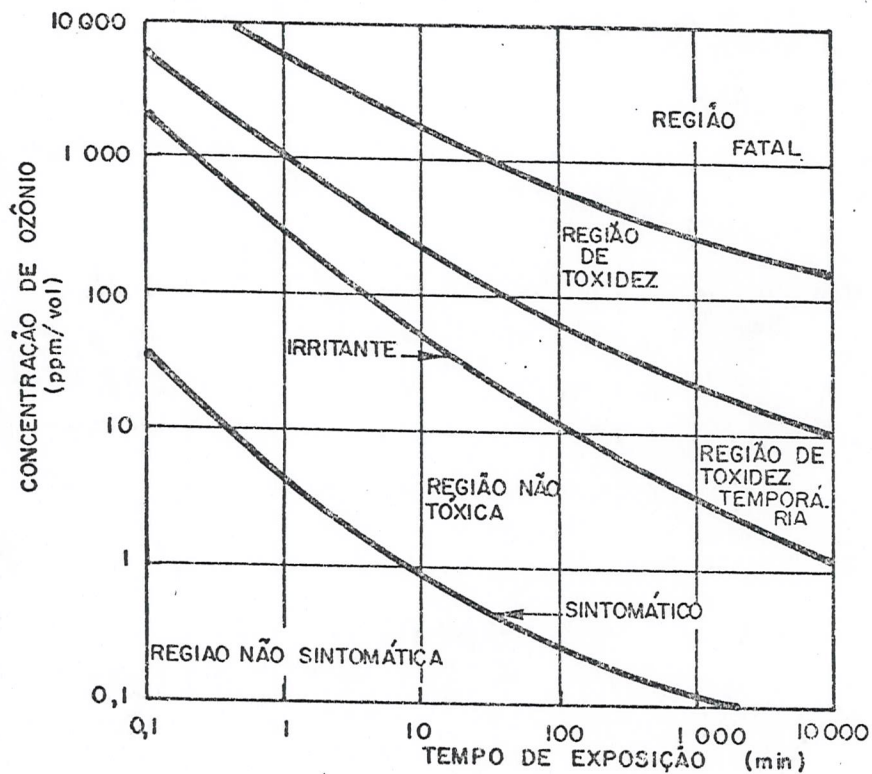


Figura 13 - Toxicidade do ozônio.
 Fonte:EVANS III (11)

3.2. ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO

Os ensaios de ozonização foram conduzidos nos laboratórios da Filsan, em um equipamento projetado e construído por esta firma. O despejo usado foi o mesmo empregado nos ensaios de cloração ou seja, o efluente de DAFA piloto tratando esgotos domésticos. Para a ozonização também objetivou-se verificar a remoção de organismos patogênicos, além de matéria orgânica, cor, sólidos, nitrogênio amoniacal e sulfetos. Foram pesquisadas formas resistentes de patogênicos; uma vez que os ensaios de ozonização foram feitos antes que os de cloração, a inexistência dessas formas resistentes durante os testes motivou a suspensão dessas análises naqueles ensaios.

3.2.1. Caracterização do efluente

As características do despejo, apresentadas como média dos resultados de cerca de 170 dias de operação, já foram apontadas na página 14 deste relatório.

Para os ensaios de ozonização foram caracterizadas as duas amostras de esgoto efluente do DAFA. Os resultados foram os seguintes:

- (a) efluente usado na 1ª série de ensaios (15/10/85)
- coliformes totais = 3×10^7 NMP/100 ml⁽¹⁾
 - coliformes fecais = $1,1 \times 10^7$ NMP/100 ml⁽¹⁾
 - nº de ovos e larvas de helmintos = 1/100 ml⁽¹⁾
 - nº de cistos de protozoários/ml = ausente⁽¹⁾
 - DQO = 142 mg/l⁽²⁾
 - DBO = 29 mg/l⁽²⁾
 - sólidos dissolvidos = 180 mg/l⁽²⁾
 - Namon. = 48,5 mg/l⁽²⁾
 - sulfetos = 192 mg/l⁽²⁾

(*) valores médios (1) análises realizadas na CETESB
(2) análises realizadas na Filsan

b) efluente usado na 2.^a série de ensaios
(07/11/85)

coliformes totais = $8,0 \times 10^7$ NMP/100 ml (1)

coliformes fecais = $1,7 \times 10^7$ NMP/100 ml (1)

estreptococos fecais = $5,0 \times 10^6$ NMP/100 ml (1)

colifagos = 3×10^4 UFP/100 ml (1)

Salmonella sp = ausente (1)

pH = 6,87 (2)

DBO = 47 mg/l (2)

DQO = 252 mg/l (2)

cor = 120 (2)

turbidez = 53 JTU (2)

Namoniaca1 = 47,5 mg/l (2)

sólidos suspensos = 95 mg/l (2)

sólidos dissolvidos = 211 mg/l (2)

3.2.2. Condições dos ensaios

Na unidade de ozonização, o ozônio produzido em uma corrente de oxigênio é introduzido em uma coluna de contato, com dimensões de 50 cm de diâmetro e 1,60 m de altura, através de um difusor situado na base da mesma. Os testes são do tipo batelada: enche-se a coluna com o despejo a ser tratado, liga-se a corrente de ar contendo uma concentração conhecida de ozônio, e ozoniza-se o despejo por um ou mais tempos de contato desejados.

Foram realizadas duas séries de ensaios, em duas diferentes oportunidades. Foram utilizados diversos tempos de contato e concentrações de ozônio, que são apresentados juntamente com os resultados.

3.2.3. Resultados e discussão

As tabelas 9 e 10 mostram os resultados das análises feitas durante os testes. Convém assinalar que os parâmetros microbiológicos

(1) análises realizadas na CETESB

(2) análises realizadas na Filsan

TABELA 9 - Resultados da primeira série de ensaios de ozonização, do dia 15/10/1985

Testes	Condições dos ensaios			coliformes totais (NMP/100mL)	coliformes fecais (NMP/100 mL)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	pH	Sólidos Dissolvidos (mg/L)	Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	Sulfeto (mg/L)
	tensão (v)	tempo com tato (min)	dosagem O ₃ (ppm)									
a1	65	10	1,7	8,0 x 10 ⁶	1,3 x 10 ⁶	87	21	7,9	88	< 0,1	45,5	-
a2	65	20	3,4	3,0 x 10 ⁴	1,1 x 10 ⁴	46	12	8,0	30	< 0,1	42,0	-
a3	65	25	4,2	3,0 x 10 ³	500	54	9	8,0	40	< 0,1	42,5	144
a4	70	4	5,7	3,0 x 10 ⁶	3,0 x 10 ⁶	27	-	7,2	84	< 0,1	47,5	-
a5	70	6	8,6	2,3 x 10 ³	300	104	-	7,4	70	< 0,1	47,5	-
a6	70	8	11,4	2,3 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁴	100	22	7,5	62	< 0,1	48,0	-
a7	70	10	14,3	280	110	87	25	7,5	30	< 0,1	46,5	180
a8	70	12	17,2	2,2 x 10 ³	800	95	22	7,6	25	< 0,1	47,0	176
a9	70	15	21,4	300	300	87	87	7,6	25	< 0,1	47,0	-

TABELA 10 - Resultados da segunda série de ensaios de ozonização, do dia 07/11/1985

teste	Condições dos ensaios						coliformes totais (NMP/100 ml)	coliformes fecais (NMP/100 ml)	estreptococos fecais (NMP/100 ml)	colifagos (UFP/100 ml)	Salmonella sp (NMP/100 ml)	pH	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	Cor	turbidez (JTU)	NH ₃ (mg/l)	SS (mg/l)	sólidos dissolvidos (mg/l)
	Voltagem (V)	ampérage (A)	O ₃ no off-gas (ppm)	residual O ₃ (ppm)	tempo de contato (minutos)	dosagem ozônio (ppm)													
b1	55	< 1	23,73	0,2	20	4,3	3,0 x 10 ⁵	1,7 x 10 ⁵	5,0 x 10 ⁴	1,0 x 10 ³	ausente	7,65	31	113	50	44	36	65	199
b2	55	< 1	33,70	-	25	5,4	3,0 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁴	90	ausente	7,70	31	96	40	34	46	80	184
b3	55	< 1	35,70	0,4	30	6,5	6,0 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁴	3,0 x 10 ³	80	ausente	7,95	27	121	40	29	45	55	207

gicos foram determinados nos laboratórios da CETESB, e os físico-químicos na Filsan. A tabela 11 apresenta a eficiência do processo para a totalidade dos ensaios efetuados.

a) Parâmetros físico-químicos

Observou-se o seguinte, nas condições dos ensaios:

- (1) foi analisado o pH apenas da segunda "partida" de esgoto, que era de 6,87. A ozonização elevou esses valores para 7,65 a 7,95;
- (2) ocorreu remoção de matéria orgânica, medida em termos de DBO, de 13,8% a 69,0%. O valor médio da faixa de redução de DBO foi de cerca de 36%;
- (3) houve também redução do valor da DQO, de 26,8% a 81,0% , com média de 49%;
- (4) a cor foi reduzida substancialmente. A primeira série de testes não avaliou este parâmetro, mas verificou-se visualmente que ocorria a redução. Na segunda bateria de ensaios, houve uma remoção de 58,3% a 66,7%;
- (5) os sólidos suspensos e a turbidez foram analisados somente na segunda série, de 3 ensaios, observando-se remoções da ordem de 15,8% a 42,1% e 17,0% a 45,3%, respectivamente;
- (6) os resultados de sólidos dissolvidos são contraditórios. Na primeira série, as remoções estiveram entre 51,1% e 86,1% ; na segunda, foram apenas 1,2% a 12,8%, ou praticamente não houve redução ;
- (7) quanto aos sulfetos e à amônia, não ocorre remoção dos mesmos.

TABELA 11 - Porcentagem de remoção de diversos parâmetros na ozonização de efluente de DAFA tratando esgotos domésticos

Teste	Tempo de contato (min)	Dosagem de ozônio (ppm)	Colifor mes totais	Colifor mes fecais	Estreptococos fecais	Colifagos	DBO	DQO	Cor	turbidez	sólidos suspensos	sólidos dissolvidos	NH ₃	sulfetos
a1	10	1,7	73,33	88,18	-	-	27,6	38,7	-	-	-	51,1	6,2	-
a2	20	3,4	99,90	99,90	-	-	58,6	67,6	-	-	-	83,3	13,4	-
a3	25	4,2	99,99	99,995	-	-	69,0	62,0	-	-	-	77,8	12,4	25,0
b1	20	4,3	99,63	99,00	99,00	99,67	34,0	55,2	58,3	17,0	31,6	5,7	24,2	-
b2	25	5,4	99,96	99,92	99,74	99,70	34,0	61,9	66,7	35,8	15,8	12,8	3,2	-
a4	4	5,7	90,00	72,73	-	-	-	81,0	-	-	-	53,3	2,1	-
b3	30	6,5	99,93	99,92	99,94	99,73	42,6	52,0	66,7	45,3	42,1	1,2	5,3	-
a5	6	8,6	99,99	99,997	-	-	-	26,8	-	-	-	61,1	2,1	-
a6	8	11,4	99,92	99,88	-	-	24,1	29,6	-	-	-	65,6	1,0	-
a7	10	14,3	99,999	99,999	-	-	13,8	38,7	-	-	-	83,3	4,1	6,3
a8	12	17,2	99,990	99,993	-	-	24,1	33,1	-	-	-	86,1	3,1	8,3
a9	15	21,4	99,999	99,997	-	-	27,6	38,7	-	-	-	86,1	3,1	-

b) Parâmetros bacteriológicos

Para discussão dos resultados microbiológicos, a tabela 11 foi organizada de forma a apresentar os dosagens de ozônio em ordem crescente. Os resultados de Salmonella sp e os dos exames parasitológicos foram omitidos porque tais organismos estiveram ausentes no efluente do biodigestor.

- (1) até 5 ppm de O_3 : - nesta dosagem e com tempos de contato de até 25 minutos, não se removeu coliformes totais, fecais e estreptococos fecais a níveis desejáveis. Em outras palavras, o esgoto ozonizado ainda conteria densidades de bactérias entre 10^3 e 10^6 organismos/100 ml;
- (2) entre 5,0 e 10,0 ppm de O_3 : - ainda nesta faixa, e com tempos de contato entre 4 e 30 minutos, as remoções não foram satisfatórias. A única exceção é para dosagem de 8,6 ppm e 6 minutos de contato, o que ainda é insuficiente para recomendar esta faixa;
- (3) entre 10,0 e 15,0 ppm de O_3 : - nesta faixa tem-se dois resultados: para 11,4 e 14,3 ppm de O_3 , e tempos de contato de 8 e 10 minutos, respectivamente. Para a primeira dosagem, o resultado ainda é insatisfatório; no entanto, para 14,3 ppm de O_3 tem-se sobrevivência de coliformes totais e fecais de, respectivamente, 280 e 110 organismos/100 ml, o que já pode ser considerado muito bom;
- (4) acima de 15,0 ppm de O_3 : - foram feitos dois ensaios, com 17,2 ppm de O_3 e 12 minutos de tempo de contato, e 21,4 ppm de O_3 e 15 minutos de contato. Em ambos os casos, obteve-se uma boa remoção de coliformes totais e fecais;
- (5) os parâmetros estreptococos fecais e colifagos foram medidos apenas para pequenas doses de aplicação de ozônio (entre 4,3 e 6,5 ppm), e os resultados de remoção são considerados insuficientes;

3.2.4. Conclusões dos testes em laboratório

Os ensaios de ozonização em unidade piloto projetada e construída pela Filsan, de esgotos domésticos tratados em DAFA piloto, sugeriram as seguintes conclusões e recomendações:

- (1) a remoção de coliformes totais e fecais foi satisfatória a partir de dosagens de ozônio acima de 15,0 ppm e tempos de contato maiores que 10 minutos;
- (2) houve significativa melhoria da qualidade do efluente, com redução dos teores de matéria orgânica (medida como DBO e DQO), sólidos suspensos e turbidez. Para dosagens maiores que 15,0 ppm de O_3 obteve-se remoções de DBO e DQO de 26% e 36%. A redução dos parâmetros físico-químicos foi observada mesmo para pequenas aplicações de ozônio, como da ordem de 1,7 ppm. Os ensaios também demonstraram uma acentuada remoção de cor (da ordem de 64% entre 4,3 e 6,5 ppm de O_3) e, apesar de não se ter medido, o efluente ozonizado deve conter oxigênio dissolvido. A ozonização não é efetiva para retirar amônia e sulfetos do efluente;

Recomenda-se que:

- (1) seja estudado o processo de ozonização em escala piloto. Devem ser previstos tempos de contato maiores que 10 minutos e dosagens de O_3 superiores a 15 ppm. É importante que o efluente do digestor contenha concentração de matéria orgânica de no máximo 50 mg DBO/l e 250 mgDQO/l, para que resultados semelhantes aos aqui obtidos possam ser antecipados;
- (2) sejam confirmadas as remoções de organismos patogênicos, além de coliformes, estreptococos fecais, salmonelas, colifagos e formas resistentes de helmintos e protozoários que porventura estejam presentes em biodigestores em escala real;

- (3) sejam verificados custos e dificuldades operacionais do sistema. É importante ressaltar que, de acordo com estimativas da Filsan, uma unidade de ozonização sairia tanto quanto um digestor anaeróbio de fluxo ascendente; no entanto, o custo total do digestor mais pós-tratamento ainda seria competitivo com os processos convencionais de tratamento de esgotos, como o lodos ativados;
- (4) seja confirmada a melhoria da qualidade do efluente, através dos parâmetros utilizados neste estudo, além da análise de oxigênio dissolvido no despejo ozonizado.

3.3. PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE PILOTO

Através de um contrato de comodato celebrado entre a CETESB e a Filsan, esta projetou e construiu uma unidade de ozonização que foi instalada ao lado do DAFA de 120 m³, de propriedade da CETESB. A unidade, que está apresentada esquematicamente na figura 14, foi prevista para as seguintes condições:

- dosagem de O₃ = 15 ppm
- tempo de contato = 35 minutos
- vazão do efluente a ser tratado = 1 m³/h
- eficiência de transferência do O₃ = 95-99%
- aplicação do ozônio = difusor poroso

O sistema de contato é formado por duas colunas.

3.4. TESTES PRELIMINARES NA UNIDADE PILOTO

Foram feitos três ensaios do tipo batelada. O digestor anaeróbio de fluxo ascendente não havia entrado em operação, e por isto o efluente possuía grande concentração de matéria orgânica. As características do despejo a ser ozonizado eram:

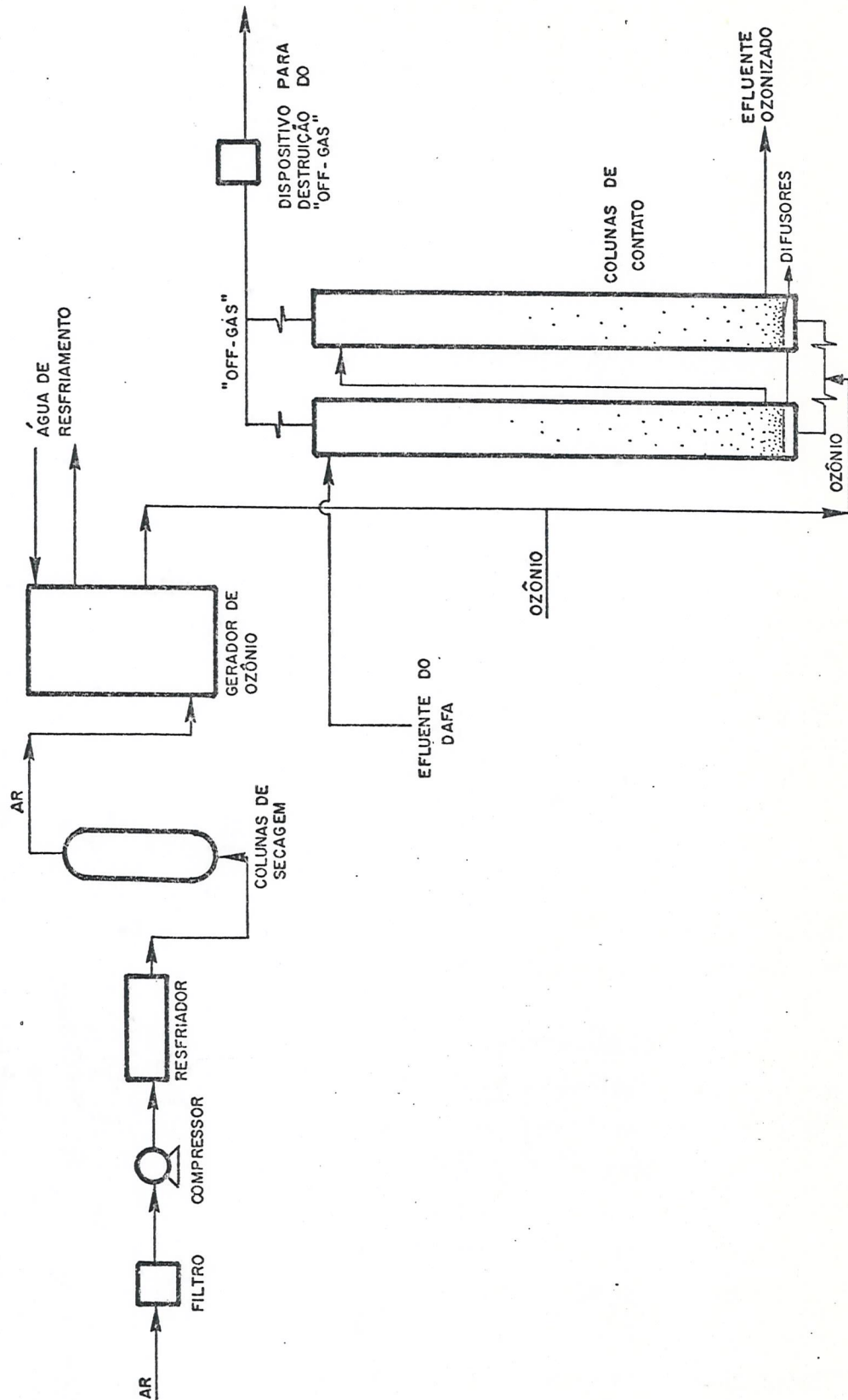


Figura 14 - Esquema da unidade de ozonização da Filsan, para pós-tratamento de esgoto sanitário.

pH = 6,5

DBO = 246 mg/l

DQO = 425 mg/l

cor verdadeira = 100 mg Pt/l

nitrogênio amoniacal = 49 mg/l

sólidos suspensos = 74 mg/l

turbidez = 40 JTU

coliformes totais = $3,0 \times 10^7$ NMP/100 ml

coliformes fecais = $1,1 \times 10^7$ NMP/100 ml

Salmonella sp = <3 NMP/100 ml

nº de ovos e larvas e ovos de helmintos e cistos
de protozoários = ausentes

As concentrações de ozônio aplicadas, tempos de contato e resultados dos exames físico-químicos e microbiológicos, estão na tabela 12.

Como pode ser visto, a remoção de coliformes fecais pode ser considerada satisfatória para a dosagem de $16,7 \text{ mgO}_3/\text{l}$ e tempo de contato de 50 minutos. Neste caso, haviam concentrações de coliformes totais e fecais no efluente tratado de $3,0 \times 10^3$ NMP/100 ml e 700 NMP/100 ml, respectivamente. (Convém assinalar que a remoção de coliformes fecais é mais significativa que a de coliformes totais, para fins de desinfecção.) Na verdade, os valores de DBO e DQO do efluente bruto eram elevados, indicando que a "demanda de ozônio" a ser satisfeita também deveria ser grande. Por isso, seria necessário aplicar mais ozônio e fornecer um tempo de contato maior para que houvesse redução das bactérias. A redução de salmonelas não pode ser observada, porque a contagem das mesmas no efluente bruto já era negligível. As formas resistentes de helmintos e protozoários não ocorreram no efluente do DAFA. O pH do efluente ozonizado esteve entre 7,0 e 7,2; na verdade, a ozonização tende a neutralizar o pH dos despejos, sejam eles inicialmente ácidos ou básicos.

TABELA 12 - Condições dos ensaios e resultados dos testes preliminares de ozonização em unidade piloto

Teste	dosagem O ₃ (mg/l)	tempo de contato (min)	pH	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	cor (mgPT/l)	Nam (mg/l)	SS (mg/l)	turbidez (JTU)	col.iformes totais (NMP/100 ml)	coliformes fecais (NMP/100 ml)	Salmonella sp (NMP/100 ml)	% remoção							
													DBO	DQO	Cor	Nam	SS	turbidez	coliformes totais	coliformes fecais
1	10,0	30	7,0	228	377	80	45	58	30	5,0 x 10 ⁶	5,0 x 10 ⁵	<3	7,3	11,3	20	8,2	21,6	25,0	83,30	95,500
2	13,3	40	7,2	235	365	60	35	34	25	5,0 x 10 ⁴	8,0 x 10 ³	<3	4,5	14,1	40	28,6	54,0	37,5	99,80	99,930
3	16,7	50	7,2	210	341	50	44	27	15	3,0 x 10 ³	700	<3	14,6	19,8	50	18,4	63,5	62,5	99,99	99,994

A remoção de matéria orgânica foi negligível e, no melhor teste, foi de 15% (em termos de DBO), 20% (como DQO). Provavelmente, a dosagem de ozônio de 10 a 17 ppm foi muito pequena e para se obter uma boa redução de carga orgânica, com cerca de 250 mg DBO/l, seria necessário aplicar cerca de 50-60 ppm de O_3 .

Removeu-se até 28% de amônia. Na verdade, a ozonização oxida o nitrogênio amoniacal a nitritos e nitratos. Serão necessários entretanto, novos testes, antes de se afirmar que a oxidação da amônia irá ocorrer. Ressalte-se, entretanto, que esta oxidação não deve ser confundida com remoção de nutrientes. O nitrogênio apenas muda de forma, passando para nitratos. Se o efluente for lançado no solo para fertirrigação, a presença dos nitratos, que são facilmente absorvidos pelas plantas, será vantajosa; entretanto, se o despejo for lançado em corpos d'água, poderá haver um aumento na eutrofização, o que seria indesejável.

Nestes ensaios também se observou uma remoção significativa de cor verdadeira, sólidos suspensos e turbidez; as faixas de remoção destes parâmetros foram de 20-50%, 22-64% e 25-63%, respectivamente.

Em suma, os resultados são coerentes com os dados obtidos em laboratório. Pode-se prever que com a entrada do biodigestor em regime, e com a consequente obtenção de um efluente com menor conteúdo de matéria orgânica, será possível obter melhores resultados na ozonização. Será importante, também, verificar os problemas operacionais no pós-tratamento quando das episódicas perdas de sólidos, esperadas no efluente do biodigestor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VIEIRA, S.M.M Tratamento de esgotos por digestores anaeróbios de fluxo ascendente. R. DAE, 44 (139):322-8, dez. 1984.
2. FEACHEM, R.G. et alii. Health aspects of excreta and sullage management - a state-of-the-art review. Washington, World Bank, 1980 (Appropriate Technology for Water Supply and Sanitattion,3).
3. JORDÃO, E.F. & PESSOA, C.A. Tratamento de esgotos domésticos. São Paulo, CETESB, 1975.
4. METCALF & EDDY. Wastewater engineering - collection, treatment, disposal. New York, McGraw, 1972.
5. WILDSCHUT, L.R. et alii. Posttratamiento del efluente de un reactor UASB tratando desechos domesticos. (Trabalho apresentado ao Seminário Nacional sobre Tecnologia UASB para Águas Residuales Domésticas e Industriales. Cali, out. 1984).
6. Standard methods for the examination of water and wastewater, 15.^a edição.
7. LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. São Paulo, Edgard Blücher/USP, 1974.
8. THIRUMURTHI, D. Design criteria for waste stabilization ponds. J. Water Pollut. Control Fed., 46 (9): 2094-106, sep. 1974.
9. THIRUMURTHI, D. A break-through in the tracer studies of sedimentation tants. J. Water Pollut. Control Fed., 41 (11): R. 405- R. 418, nov. 1969.

10. KOTHANDARAMAN, V. & EVANS, R.L. Hydraulic model studies of chlorine contact tanks. J. Water Pollut. Control Fed., 44 (4): 625-33, apr. 1972.
11. EVANS III. F.L. Ozone in water and waste water treatment. Michigan, Ann Arbor, 1972.
12. WIENDL, W.G. Processo eletrolítico - dados iniciais em Campinas. São Paulo, CETESB (Apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 13. Maceió, 1985)