

O SISTEMA DE LODO ATIVADO SOB
CONDIÇÕES DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS

ALTINA SANDRA MEDEIROS DE BRITO GARCEZ

* O SISTEMA DE LODO ATIVADO SOB
CONDIÇÕES DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNI
VERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA EM CUM
PRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTEN
ÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADOR: ADRIANUS CORNELIUS VAN HAANDEL

CO-ORIENTADOR: PAULA FRASSINETTI CAVALCANTI CATUNDA

CAMPINA GRANDE - PB

1 9 8 5



Q215s Garcez, Altina Sandra Medeiros de Brito.
O sistema de lodo ativado sob condições dinâmicas em regiões tropicais / Altina Sandra Medeiros de Brito Garcez. - Campina Grande, 1985.
106 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1985.
"Orientação : Prof. Dr. Adrianus Cornelius Van Haandel, Profa. Paula Frassinetti Cavalcanti Catunda".
Referências.

1. Lodo Ativado - Sistema. 2. Esgotos - Tratamento. 3. Águas Residuais - Tratamento. 4. Lodo Ativado - Regiões Tropicais. 5. Dissertação - Engenharia Civil. I. Haandel, Adrianus Cornelius Van. II. Catunda, Paula Frassinetti Cavalcanti. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 628.355(043)

O SISTEMA DE LODO ATIVADO SOB
CONDIÇÕES DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS

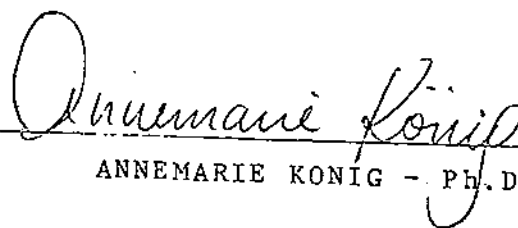
ALTINA SANDRA MEDEIROS DE BRITO GARCEZ

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/12/85.

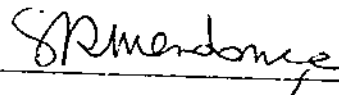


ADRIANUS CORNELIUS VAN HAANDEL - Ph.D.

ORIENTADOR



ANNEMARIE KONIG - Ph.D.



SÉRGIO ROLIM MENDONÇA - M.Sc.

CAMPINA GRANDE - PB

1 9 8 5

"Aproxima-te da sabedoria, como o que lavra e semeia,
e espera em paz pelos seus bons frutos".

(Eclesiástico 16, 19-20)

A meu filho

A meu esposo

A meus pais e sogros

A minha madrinha (in memoriam)

Dedico. . .

AGRADECIMENTOS

A

Deus, pelo conforto espiritual nas horas difíceis.

A meu esposo,

Alvaro de Freitas Garcez Neto, pelo incansável estímulo e incentivo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, que através de suporte financeiro possibilitou a realização da pesquisa experimental.

Aos Professores,

Adrianus Cornelius van Haandel e

Paula Frassinetti Cavalcanti Catunda, pela solidária orientação e constante apoio

Annemarie König e

Rui de Oliveira, pelas valiosas sugestões e críticas

Carmelita Pinto Fontes e

Hildete Nepomuceno de Araújo, pela revisão do texto.

A

Wolberg Guimarães Lima, pelo serviço de datilografia.

A

Todos, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

OFERECIMENTO	i
AGRADECIMENTO	ii
FOLHA DE APROVAÇÃO	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3 - AFERIÇÃO DO MODELO DE MARAIS	32
4 - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	39
5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	51
6 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	75
7 - DISCUSSÃO	91
8 - CONCLUSÕES	101
9 - SUGESTÕES	103
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2.1 - Representação esquemática de um sistema de lodo ativado com reator unitário	28
FIGURA 2.2 - Representação esquemática do modelo de <u>Ma</u> rais	29
FIGURA 4.1 - Esquema do sistema de lodo ativado utilizado na investigação experimental	49
FIGURA 4.2 - Esquema do teste da taxa de consumo de oxigênio	50
FIGURA 5.1 - Perfil da TCO (valores médios) em função do tempo, referente ao experimento E ₁	67
FIGURA 5.2 - Perfil da TCO (valores médios) em função do tempo, referente ao experimento E ₂	68
FIGURA 5.3 - Perfil da TCO (valores médios) em função do tempo, referente ao experimento E ₃	69
FIGURA 5.4 - Perfil da TCO (valores médios) em função do tempo, referente ao experimento E ₄	70
FIGURA 5.5 - Curva do consumo acumulativo de oxigênio para a oxidação do material armazenado em	

função do tempo, referente ao experimento E_1 .	71
FIGURA 5.6 - Curva do consumo acumulativo de oxigênio para a oxidação do material armazenado em função do tempo, referente ao experimento E_2	72
FIGURA 5.7 - Curva do consumo acumulativo de oxigênio para a oxidação do material armazenado em função do tempo, referente ao experimento E_3	73
FIGURA 5.8 - Curva do consumo acumulativo de oxigênio para a oxidação do material armazenado em função do tempo, referente ao experimento E_4	74
FIGURA 7.1 - Idade mínima de lodo em função do valor de K_{mp} , referente a uma lagoa aerada	100
FIGURA 7.2 - Idade mínima de lodo em função do valor de K_{mp} , referente a um sistema de lodo <u>ativa</u> do	100

LISTA DE SÍMBOLOS

- b_h = Constante de respiração endógena (d^{-1}).
- F = Razão máxima entre o material armazenado e o lodo ativo.
- f = Fração do lodo ativo decaído que é transformado em resíduo endógeno.
- f_{ca} = Razão entre o material rapidamente biodegradável e o material biodegradável influente.
- f_{up} = Fração não biodegradável e particulada do material orgânico influente ($mgSVS \cdot mgDQO^{-1}$).
- f_{us} = Fração não biodegradável e solúvel do material orgânico influente.
- K_m = Coeficiente específico de utilização de substrato ($mgS \cdot mgX^{-1} \cdot d^{-1}$).
- K_{mp} = Constante específica de utilização do material armazenado ($mgDQO \cdot mgSVS^{-1} \cdot d^{-1}$).
- K_{ms} = Constante específica de utilização do material rapidamente biodegradável ($mgDQO \cdot mgX_a^{-1} \cdot d^{-1}$).
- K_s = Coeficiente de meia saturação ($mgS \cdot l^{-1}$).

- K_{sp} = Constante de meia saturação do material armazenado ($\text{mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$).
- K_{ss} = Constante de meia saturação do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- K_v = Constante de armazenamento ($\ell \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- MS_{bp} = Massa do material orgânico influente lentamente biodegradável (mgDQO).
- MS_{ti} = Massa diária do material orgânico influente ($\text{mgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$).
- O_c = Taxa de consumo de oxigênio total ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- O_d = Taxa de consumo de oxigênio para respiração endógena ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- O_{sbp} = Taxa de consumo de oxigênio correspondente à taxa de utilização do material armazenado ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- O_u = Taxa de consumo de oxigênio para oxidação do material orgânico influente ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- P = Equivalente em DQO do lodo orgânico ($\text{mgDQO} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$).
- Q = Vazão influente ($\ell \cdot \text{d}^{-1}$).
- q = Vazão do lodo de excesso ($\ell \cdot \text{d}^{-1}$).
- R_h = Tempo de permanência hidráulico (d).
- R_s = Idade de lodo (d).
- R_{smin} = Idade mínima de lodo (d).

- r_a = Taxa de armazenamento do material lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_c = Taxa de crescimento do lodo ativo ($\text{mgX} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_d = Taxa de decaimento do lodo ativo devido à respiração endógena ($\text{mgX}_a \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_e = Taxa de aparecimento do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_u = Taxa de utilização de substrato ($\text{mgS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{up} = Taxa de utilização do material armazenado ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{us} = Taxa de utilização do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{sbp} = Taxa de reação (armazenamento) do material lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{sbs} = Taxa de reação do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{xa} = Taxa de reação do lodo ativo ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{xe} = Taxa de reação do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- r_{xs} = Taxa de reação do material armazenado ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
- S = Concentração de substrato ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_b = Concentração do material orgânico influente biodegradável que não é utilizado no sistema ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).

- S_{bi} = Concentração do material orgânico influente biodegradável total ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S'_{bi} = Concentração do material orgânico influente biodegradável efetivamente utilizado no sistema ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{bp} = Concentração do material orgânico influente lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{bs} = Concentração do material orgânico influente rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_m = Concentração do material orgânico na fase líquida do licor misto ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{ni} = Concentração do material orgânico influente não biodegradável total ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{te} = Concentração do material orgânico efluente ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{ti} = Concentração do material orgânico influente ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- S_{ui} = Concentração do material orgânico influente não biodegradável solúvel ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$).
- T = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- V_r = Volume do reator (ℓ).
- V_{cr} = Volume da carga repentina por alimentação (ℓ).
- X = Concentração de lodo ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).
- X_a = Concentração do lodo ativo ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).

- X_e = Concentração do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).
- X_i = Concentração do lodo inerte ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).
- X_{ii} = Concentração do material orgânico do influente não biodegradável e particulado ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).
- X_s = Concentração do material armazenado ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).
- X_v = Concentração dos sólidos orgânicos no licor misto ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$).

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 2.1 - Equações básicas de um sistema de lodo ativado (estado dinâmico), referente ao material orgânico biodegradável	31
TABELA 3.1 - Constantes do modelo de Marais ($14^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$)	38
TABELA 5.1 - Valores e médias: da DQO do influente- S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos sete testes do experimento E_1	53
TABELA 5.2 - Valores e médias: da DQO do influente- S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos quatro testes do experimento E_2	54
TABELA 5.3 - Valores e médias: da DQO do influente- S_{ti} ,	

da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos quatro testes do experimento E_3	55
TABELA 5.4 - Valores e médias: da DQO do influente- S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto antes e logo depois da alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico antes e logo depois da alimentação - X_v , relativos aos quatro testes do experimento E_4	56
TABELA 5.5 - Valores médios: da DQO do influente- S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m ; da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos experimentos realizados	57
TABELA 5.6 - Valores e médias da TCO nos sete testes do experimento E_1 em função do tempo	58
TABELA 5.7 - Valores e médias da TCO nos quatro testes do experimento E_2 em função do tempo	60
TABELA 5.8 - Valores e médias da TCO nos dois testes do experimento E_3 em função do tempo	62

TABELA 5.9 - Valores e médias da TCO nos quatro testes do experimento E ₄ em função do tempo	64
TABELA 6.1 - Valores dos parâmetros que definem a ciné- tica de utilização do material biodegradá- vel	90

RESUMO

Na prática do tratamento de esgoto, os sistemas com lodo em suspensão apresentam um comportamento dinâmico. Isto se deve à natureza cíclica da carga orgânica e hidráulica aplicada. O parâmetro fundamental para avaliar o comportamento desses sistemas sob condições dinâmicas é a taxa de consumo de oxigênio (TCO). Usando a TCO, Marais e seu grupo de pesquisadores desenvolveram um modelo cinético que descreve a utilização do material orgânico biodegradável influente pelos microrganismos presentes no sistema. Esse modelo descreve as variações com o tempo dos parâmetros relacionados à utilização do material biodegradável: concentração do material orgânico no efluente, concentração do lodo orgânico e taxa de consumo de oxigênio. O modelo foi testado para uma faixa de temperatura de 14 a 20°C e tem grande aplicabilidade prática em projetos e otimização de sistemas com lodo em suspensão, permitindo determinar a capacidade de oxigenação a ser instalada e a idade mínima de lodo para que haja remoção eficiente do material orgânico influente.

Com o objetivo de testar a aplicabilidade desse modelo para as condições prevalecentes no Nordeste do Brasil, realizou-se uma investigação experimental de um sistema de lodo ativado em escala de laboratório, operado sob condições dinâmicas de cargas orgânica e hidráulica, usando-se esgoto bruto mu

nicipal da cidade de Campina Grande - Pb. Baseado nos resultados obtidos, verificou-se que o modelo é válido para temperaturas de até 28°C, tornando-se aplicável para projetos em regiões tropicais. Foi possível determinar as constantes que definem a composição do material orgânico influente e as constantes cinéticas que descrevem a utilização do material armazenado. Os valores calculados para as constantes de composição do material orgânico foram semelhantes aos encontrados por Marais (para a faixa de temperatura de 14 a 20°C). Entretanto, os valores das constantes cinéticas de utilização do material armazenado diferiram.

ABSTRACT

In practice wastewater treatment processes with suspended sludge exhibit a dynamic behaviour, due to the cyclical nature of the applied organic and hydraulic load. Under dynamic conditions the fundamental parameter to evaluate the behaviour of these processes is the oxygen uptake rate (O.U.R.). Using O.U.R., Marais and his research group developed a kinetic model which describes the utilization of biodegradable influent organic material by microorganisms present in the process. This model describes the variations with time of parameters related to the utilization of biodegradable material. These parameters are: effluent organic material concentration, organic sludge concentration and oxygen uptake rate. The model has been tested for temperatures in the range between 14 and 20°C. It has great practical applicability for the design and optimization of treatment processes with suspended sludge. It also allows the determination of the required oxygenation capacity and the minimum sludge age for an efficient organic material removal.

In order to test the applicability of the model for the conditions prevailing in Northeast of Brazil, an experimental investigation was carried out, using bench scale activated sludge process. It was operated under dynamic conditions of organic and hydraulic load and using raw sewage of the city

of Campina Grande - Pb - Brazil. The results obtained have shown that the model is valid for temperatures up to 28°C, making it adequate for projects in tropical regions. It was possible to determine the constants which define the composition of the influent organic material. The kinetics constants describing the utilization of stored material were also determined. The calculated values for the constants of the composition of the influent organic material were near to those found by Marais (for temperatures varying between 14 and 20°C). However, the values for the kinetics constants for the utilization of the stored material were different.

ÍNDICE

	Página
OFERECIMENTO	i
AGRADECIMENTO	ii
FOLHA DE APROVAÇÃO	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 - Desenvolvimento histórico	04
2.2 - A cinética de utilização do material orgânico bio degradável	09
2.2.1 - Introdução	09
2.2.2 - O sistema de lodo ativado	11
2.2.3 - O modelo de Marais	12
2.2.3.1 - Quantificação do material orgânico	13
2.2.3.2 - Composição do material orgânico influente ...	14
2.2.3.3 - Composição do lodo orgânico	17
2.2.3.4 - Utilização do material orgânico biodegradável	19

2.2.3.5 - Reações do lodo orgânico	22
2.2.3.6 - A taxa de consumo de oxigênio	23
2.2.3.7 - Equações básicas	24
2.3 - Figuras	27
2.4 - Tabela	30
3 - AFERIÇÃO DO MODELO DE MARAIS	32
3.1 - Introdução	32
3.2 - Constantes a serem determinadas	32
3.3 - Métodos experimentais para determinar as constan <u>tes</u> relevantes	35
3.3.1 - O método das cargas cíclicas	36
3.3.2 - O método das cargas repentinas	36
3.4 - Tabela	37
4 - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	39
4.1 - Introdução	39
4.2 - Descrição do sistema	39
4.3 - Procedimento operacional	42
4.3.1 - Experiências pelo método das cargas cíclicas ..	43
4.3.2 - Experiências pelo método das cargas repentinas.	44
4.4 - Procedimento analítico	45
4.5 - Figuras	48
5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	51
5.1 - Introdução	51
5.2 - Tabelas	52
5.3 - Figuras	66
6 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	75

6.1 - Introdução	75
6.2 - Dados da DQO	76
6.2.1 - Cargas cíclicas	76
6.2.2 - Cargas repentinas	77
6.3 - Dados dos sólidos orgânicos	78
6.4 - Perfil da TCO	79
6.4.1 - Cargas cíclicas	81
6.4.1.1 - Cálculo da fração do material rapidamente bio degradável (f_{ca})	81
6.4.1.2 - Determinação das constantes cinéticas de uti lização do material armazenado (K_{mp} , K_{sp}) ...	83
6.4.2 - Cargas repentinas	85
6.4.2.1 - Cálculo da fração do material rapidamente bio degradável (f_{ca})	85
6.4.2.2 - Determinação das constantes cinéticas de uti lização do material armazenado (K_{mp} , K_{sp}) ...	86
6.5 - Tabela	89
7 - DISCUSSÃO	91
7.1 - Introdução	91
7.2 - Determinação da concentração do material armazena do	93
7.3 - Figuras	99
8 - CONCLUSÕES	101
9 - SUGESTÕES	103
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 - INTRODUÇÃO

Devido ao padrão cíclico natural da atividade humana, a produção de águas residuárias domésticas exibe grandes variações de vazão e concentração. Desse modo, os sistemas de tratamento de esgoto com lodo em suspensão apresentam, na prática, um comportamento dinâmico, ou seja, recebem cargas orgânicas e hidráulicas que variam com o tempo.

Os aspectos básicos de modelamento do comportamento desses sistemas sob condições dinâmicas são as relações entre a remoção de substrato (o material biodegradável influente), o crescimento do lodo ativo e o consumo de oxigênio para a oxidação desse substrato. Para descrever tal comportamento é preciso levar em consideração a cinética de utilização do material biodegradável influente pelos microorganismos presentes no sistema. Essa cinética descreve a taxa de utilização do material biodegradável em função da carga aplicada. Na prática, as cargas variam com o tempo e, portanto, a taxa de utilização também sofrerá variações.

Desenvolver um modelo para a cinética de utilização do material biodegradável influente é uma tarefa difícil, devido à natureza complexa da composição do material orgânico influente e dos microorganismos presentes no sistema. Idealmente esse modelo deveria descrever, em função do tempo, todos os parâmetros diretamente ligados à utilização do material biode

gradável, especialmente, os parâmetros de maior interesse prático: (a) concentração do material orgânico no efluente, que determina a qualidade da água tratada; (b) concentração do lodo orgânico, que determina a massa do lodo de excesso retirada do sistema e (c) taxa de consumo de oxigênio, que determina a capacidade de aeração a ser instalada no sistema.

Dos vários modelos propostos na literatura, somente o modelo desenvolvido por Marais e seu grupo de pesquisadores na Universidade da cidade do Cabo - África do Sul - descreve quantitativamente o comportamento dos três parâmetros de interesse prático. Esse modelo se refere a sistemas de tratamento de esgoto com lodo em suspensão, operados sob condições dinâmicas de cargas, inclusive naqueles compostos de mais de um reator em série. Tal modelo é aplicável a qualquer tipo de sistema aeróbio de tratamento de esgoto com lodo em suspensão (lodo ativado, valo de oxidação e lagoa aerada).

No presente trabalho, avalia-se a aplicabilidade do modelo de Marais para o caso específico de sistemas de lodo ativado, sob as condições prevaletentes no Nordeste do Brasil. Foram gerados dados experimentais dos parâmetros mensuráveis, os quais demonstraram a aplicabilidade do modelo e permitiram determinar as suas constantes relevantes. Para tanto, operou-se um sistema de lodo ativado completamente misturado com reator unitário em escala de laboratório, com cargas orgânica e hidráulica variáveis com o tempo (estado dinâmico) à temperatura de 28°C. Usou-se esgoto bruto municipal da cidade de Campina Grande - Pb, sendo possível determinar as constantes que definem a composição do material orgânico influente e as

constantes cinéticas que descrevem a utilização do material armazenado. Os valores calculados para as constantes de composição do material orgânico foram semelhantes aos encontrados por Marais para a faixa de temperatura de 14 a 20°C. Entretanto, os valores das constantes cinéticas de utilização do material armazenado diferiram.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Desenvolvimento histórico

As primeiras tentativas para descrever quantitativamente o comportamento de sistemas de lodo ativado surgiram a partir do trabalho pioneiro de Monod (1950), o qual relaciona o crescimento de microorganismos à utilização de substrato em sistemas biológicos:

$$r_c = (dX/dt)_c = Y_h \cdot r_u = Y_h \cdot (dS/dt)_u \quad (2.1)$$

onde:

r_c = taxa de crescimento de lodo ($\text{mgX} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

r_u = taxa de utilização de substrato ($\text{mgS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

Y_h = coeficiente de rendimento ou produção de massa de microorganismos por unidade de substrato utilizado ($\text{mgX} \cdot \text{mgS}^{-1}$);

S = concentração de substrato ($\text{mg DQO} \cdot \ell^{-1}$) e,

X = concentração de lodo ($\text{mg SVS} \cdot \ell^{-1}$).

Monod estabeleceu, ainda, que a taxa de utilização de substrato depende da concentração deste e da concentração dos microorganismos:

$$r_u = \left\{ \frac{K_m \cdot S}{(S + K_s)} \right\} \cdot X \quad (2.2)$$

onde:

K_m = coeficiente específico de utilização de substrato
($\text{mgS} \cdot \text{mgX}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) e,

K_s = coeficiente de meia saturação ($\text{mgS} \cdot \ell^{-1}$).

Baseados no trabalho de Monod, Garrett e Sawyer (1956); McKinney (1962); e Lawrence e McCarty (1970) desenvolveram modelos que descrevem a utilização do material orgânico do esgoto pelos microorganismos em sistemas de lodo ativado. Embora esses modelos possam descrever o comportamento médio das variáveis do processo, eles são inadequados para descrever quantitativamente essas variáveis. Isto se deve ao fato de que o substrato de esgoto (material biodegradável) é de uma natureza muito diferente dos monosubstratos solúveis usados por Monod. Em contraste, o substrato de esgoto é composto de muitas substâncias, algumas das quais se apresentam na forma solúvel enquanto que outras, a maior parte, na forma particulada (coloidal e não coloidal). O material particulado do substrato não pode ser utilizado diretamente pelos microorganismos. A utilização desse material ocorre após a sua transformação em material solúvel num processo denominado hidrólise.

Para descrever a utilização do material particulado, vários pesquisadores (Katz e Rohlich, 1956; Blackwell, 1971; e Andrews e Busby, 1973) sugeriram o mecanismo de armazenamento, isto é, a adsorção do material particulado à superfície dos microorganismos. Após o armazenamento se inicia o pro

cesso de hidrólise do material armazenado por ação de exoenzimas e, subseqüentemente, os produtos de hidrólise, que são moléculas pequenas, são utilizados pelos microorganismos.

A importância fundamental do conceito de armazenamento sobre o modelamento da cinética de utilização do material biodegradável é assim justificada: através do armazenamento, o material biodegradável é removido da fase líquida do licor misto sem que isto implique, necessariamente, na sua utilização. Dessa forma, não há relação direta entre a concentração do material biodegradável na fase líquida e a taxa de utilização do material biodegradável. Essa taxa depende fundamentalmente da concentração do material armazenado. Portanto, a concentração do material biodegradável na fase líquida do licor misto é um parâmetro inadequado para avaliar a disponibilidade do material biodegradável e a cinética de utilização deste material. Também a ausência do material biodegradável no efluente não implica, necessariamente, que este material foi utilizado no sistema: parte do material biodegradável pode ser descarregado como material armazenado no lodo de excesso antes de ser utilizado. Assim, a concentração do material biodegradável no efluente não é indicativa para avaliar a eficiência de utilização deste material no sistema.

Do exposto acima, conclui-se que existe uma difícultade em se definir qual é a concentração do material biodegradável em um sistema de lodo ativado tratando esgoto. Diante dessa dificuldade, Marais e Ekama (1976) sugeriram um parâmetro que pode ser usado para avaliar diretamente a taxa de utilização do material biodegradável: a taxa de consumo de oxigênio

(TCO). Demonstraram esses autores que a TCO para oxidação do material orgânico biodegradável influente é proporcional à taxa de utilização deste material. O valor da constante de proporcionalidade pode ser deduzido da seguinte maneira: na utilização do material orgânico uma parte é incorporada como massa celular nova dentro do microorganismo (síntese), enquanto que o restante do material utilizado é oxidado. Sendo Y_h o coeficiente de rendimento, então, por unidade de massa de DQO utilizada, há síntese de Y_h massa de lodo ativo. Isto representa uma fração $P.Y_h$ da DQO utilizada (P é o equivalente em DQO do lodo orgânico). O restante $(1 - P.Y_h)$ é oxidado, reque-
rendo por definição uma massa de oxigênio também igual a $(1 - P.Y_h)$. Desse modo, tem-se que, na utilização de uma unidade de massa de material orgânico, uma fração $P.Y_h$ é sintetizada causando um aumento da massa de lodo ativo de Y_h , enquanto uma fração $(1 - P.Y_h)$ é oxidada, causando um consumo de oxigênio de $(1 - P.Y_h)$. Portanto, é possível correlacionar diretamente a TCO, para a oxidação do material orgânico do influente, à taxa de utilização deste material e, também, à taxa de crescimento de lodo:

$$O_u = (1 - P.Y_h)_u \cdot r_u \quad (2.3.a)$$

$$r_c = Y_h \cdot r_u \quad (2.3.b)$$

portanto:

$$r_c = Y_h \cdot O_u / (1 - P.Y_h) \quad (2.3.c)$$

onde:

O_u = TCO para a oxidação do material orgânico influente
($\text{mg O}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

r_c = taxa de crescimento do lodo ativo ($\text{mg SVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

r_u = taxa de utilização do material orgânico ($\text{mg DQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

Y_h = coeficiente de rendimento ($\text{mg SVS} \cdot \text{mg DQO}^{-1}$) e,

P = equivalente em DQO do lodo orgânico ($\text{mg DQO} \cdot \text{mg SVS}^{-1}$).

No sistema de lodo ativado a taxa de consumo de oxigênio não se deve unicamente à utilização do material orgânico influente. Existem dois outros processos que também consomem oxigênio: a digestão aeróbia do lodo ativo e a nitrificação. Somente a TCO total (TCO devido ao efeito dos três processos que consomem oxigênio) pode ser determinada experimentalmente. Entretanto é possível calcular a TCO devido à digestão aeróbia do lodo ativo e à nitrificação. A TCO para digestão aeróbia pode ser calculada a partir da cinética deste processo (Tenório, 1985) e a TCO para nitrificação pode ser avaliada a partir do aumento da concentração de nitrato, consequência deste processo. Desse modo, pode-se, a partir do valor experimental da TCO total, avaliar qual é a TCO para oxidação do material orgânico influente.

Usando a TCO como parâmetro fundamental, Dold, Ekama e Marais (1980) desenvolveram um modelo para a cinética do comportamento do sistema de lodo ativado quando as cargas orgânica e hidráulica variam com o tempo (estado dinâmico). Esse modelo, chamado de modelo de Marais, foi testado extensivamente em vários sistemas de lodo ativado, operando sob condições di

versas e, invariavelmente, foi capaz de descrever quantitativamente o comportamento dos sistemas em termos dos valores dos parâmetros mensuráveis em função do tempo.

2.2 - A cinética de utilização do material orgânico biodegradável

2.2.1 - Introdução

Na prática do tratamento de esgoto, os sistemas de lodo ativado apresentam um comportamento dinâmico - sistema não ideal - onde, a utilização do material orgânico biodegradável é incompleta, seja durante parte do tempo de operação, seja em parte do volume do sistema. Isto se deve aos seguintes fatores:

(a) devido à variação natural da atividade humana durante o dia, o esgoto exibe grandes flutuações de vazão e de concentração do material orgânico. Desse modo, os sistemas de tratamento de esgoto recebem cargas que variam acentuadamente com o tempo: períodos de carga alta são alternados com períodos de carga baixa. Durante o período de carga alta a massa bacteriana do sistema pode ser incapaz de utilizar todo o material orgânico influente. Entretanto, o material não utilizado pode ser armazenado para ser metabolizado no período de baixa carga subsequente. Assim, durante o período de carga alta muitos sistemas não operam em regime ideal;

(b) a maioria dos sistemas de tratamento de esgoto consiste em uma série de reatores. O primeiro reator, geralmente, recebe todo o influente mas, neste reator, a massa de microorganismos é insuficiente para utilizar todo o material biodegradável, fazendo com que parte deste material passe para os reatores subseqüentes. Portanto, esses sistemas não são ideais em parte do seu volume;

(c) em alguns sistemas de tratamento de esgoto a taxa de retirada do lodo de excesso é tão alta que a massa de lodo presente no sistema é insuficiente para a utilização completa do material biodegradável do influente. Parte desse material será descarregado nas vazões do lodo de excesso ou do efluente.

Uma investigação do comportamento dinâmico de sistemas de lodo ativado não pode ser iniciada antes que haja um entendimento completo do comportamento estacionário - sistema ideal - onde, a utilização do material biodegradável do influente pelos microorganismos vivos (o lodo ativo) é essencialmente completa (Marais e Ekama, 1976 e Dias et alli, 1983).

O estado estacionário desempenha um papel muito importante tanto no projeto do processo quanto nas investigações experimentais do comportamento cinético, pois forma a base para a determinação de algumas constantes do modelo (parâmetros de massa de lodo e constante de respiração endógena). Entretanto, o sistema operado sob condições estacionárias não fornece informações quanto à cinética de utilização do material biodegradável. Para tanto é preciso operar o sistema sob con

dições dinâmicas, isto é, variar a carga orgânica e/ou hidráulica aplicada com o tempo. O parâmetro fundamental para avaliar o comportamento de sistemas de lodo ativado sob carga variável é a TCO. Usando a TCO, Marais desenvolveu um modelo cinético para a utilização do material orgânico em sistemas de lodo ativado. O desenvolvimento desse modelo será descrito nas próximas seções.

2.2.2 - O sistema de lodo ativado

Lodo ativado é um dos processos biológicos aeróbicos destinado à remoção de energia dos compostos orgânicos de águas residuárias, onde o lodo se encontra em suspensão.

A Figura 2.1 fornece uma representação esquemática de um sistema de lodo ativado com reator unitário. Esse sistema é composto de reator e decantador. No reator ocorre todo o mecanismo de remoção da matéria orgânica do esgoto que entra no sistema via vazão influente. O conteúdo do reator é mantido em ambiente aeróbio por meio de aeração artificial. A disponibilidade de material orgânico biodegradável e o ambiente aeróbio são fatores que favorecem o desenvolvimento de uma massa de microorganismos no reator, os quais oxidam parte da matéria orgânica, obtendo assim, energia para a manutenção das células e síntese de nova massa celular. Esses microorganismos se unem às partículas sólidas orgânicas e inorgânicas, formando flocos cujos diâmetros variam de 2,0 a 5,0 mm, os quais formam por sua vez, o lodo ativado, assim denominado porque

apresenta atividade biológica na remoção do material orgânico da fase líquida. Os flocos são mantidos em suspensão através de agitação mecânica. Essa suspensão é chamada licor misto.

A operação dos sistemas de lodo ativado é feita mantendo-se constante o volume do reator. A vazão contínua do esgoto influente provoca uma igual vazão de descarga do licor misto, a qual chega ao decantador, cuja finalidade é separar os sólidos (flocos de lodo ativado) do líquido (esgoto tratado) através de sedimentação por gravidade. A parte líquida sai do sistema via vazão efluente e o lodo sedimentado retorna ao reator, onde é misturado novamente com o licor misto. Quando o sistema é projetado apropriadamente, os teores de sólidos e de material orgânico no efluente, que ainda podem ser utilizados por microorganismos, são insignificantes.

Devido à contínua transformação de parte do material orgânico influente em massa celular nova, há produção de lodo no sistema. Para se manter uma massa de lodo constante, uma quantidade equivalente ao lodo produzido é descarregada do mesmo (lodo de excesso). A taxa de descarga de lodo de excesso determina o tempo médio de permanência de lodo no sistema, também chamado de idade de lodo.

2.2.3 - O modelo de Marais

O modelo de Marais descreve quantitativamente os parâmetros relacionados com a utilização do material orgânico em sistemas de lodo ativado: concentração da DQO do efluente,

concentração do lodo orgânico e taxa de consumo de oxigênio. Se a carga orgânica aplicada ao sistema varia com o tempo (estado dinâmico), o modelo também descreve as variações desses parâmetros com o tempo.

A Figura 2.2 mostra esquematicamente o modelo de Marais. Nessa figura, observa-se que há vários processos que se desenvolvem simultaneamente em um sistema de lodo ativado. Para descrever quantitativamente a cinética desses processos, foi preciso formular algumas suposições quanto à composição do material orgânico influente e do lodo orgânico no sistema. Essas suposições serão descritas adiante.

No modelo de Marais os processos da Figura 2.2 são descritos como equações diferenciais, algumas das quais não são lineares, de modo que uma solução analítica não é possível. Obtém-se uma solução através da integração numérica dessas equações, usando-se um computador. Desse modo, é possível obter perfis teóricos dos parâmetros mensuráveis (DQO, SVS e TCO) em função do tempo para sistemas dinâmicos. Esses perfis teóricos podem ser comparados com perfis experimentais. Aceitam-se como verdadeiros os valores do conjunto de constantes cinéticas das equações que dão a melhor correlação entre os perfis teóricos (simulados) e os perfis experimentalmente observados das três variáveis.

2.2.3.1 - Quantificação do material orgânico

Na tecnologia de tratamento de águas residuárias dois

parâmetros são utilizados rotineiramente para avaliar a concentração do material orgânico: a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO). Ambos fornecem medidas indiretas da concentração do material orgânico em águas residuárias, através da determinação da concentração de um oxidante que é consumido na oxidação daquele material. Marais adotou a DQO como parâmetro de avaliação da concentração do material orgânico por ser um teste experimental de relativa rapidez, tornando-se no teste adequado para pesquisas, onde um controle intensivo é vital. Outra vantagem do uso da DQO é a possibilidade de se fazer um balanço de massa do material orgânico nos sistemas operados sob condições estacionárias, o que não é possível fazer ao se utilizar a DBO (Catunda e van Haandel, 1983).

2.2.3.2 - Composição do material orgânico influente

Para modelar o comportamento de sistemas de lodo ativado, Marais e Ekama (1976) subdividiram o material orgânico influente em diferentes frações (vede Figura 2.2). Essa subdivisão é teórica e, provavelmente, é uma simplificação de uma realidade mais complexa. Contudo, a partir dessa subdivisão foi possível construir o modelo que permite descrever, quantitativamente, todos os parâmetros mensuráveis relacionados com o material orgânico no processo de lodo ativado.

A aceitação dessa simplificação está no fato de que o

comportamento previsto pelo modelo é igual ao comportamento experimentalmente observado, em todos os casos investigados.

Segundo a simplificação feita por Marais, o material orgânico influente é composto das seguintes frações:

(a) Não Biodegradável e Solúvel. Fração do material orgânico influente que não é afetada pela atividade microbiana e deixa o sistema com o efluente sem sofrer modificações;

(b) Não Biodegradável e Particulado. Fração do material orgânico influente que não sofre modificações químicas ou bioquímicas mas, devido à ação floculenta do lodo, é adsorvido aos flocos, passando a fazer parte da fase sólida do lodo, gerando a fração inerte do lodo orgânico. A agitação intensa do líquido misto e a concentração alta de lodo justificam a suposição de que essa biofloculação é muito rápida;

(c) Biodegradável. Fração do material orgânico influente que se encontra disponível aos microorganismos para utilização. Essa fração é subdividida em duas outras frações que reagem diferentemente:

(c.1) Biodegradável e Solúvel. Fração do material biodegradável que, por ser composta de pequenas moléculas, pode ser utilizada diretamente pelos microorganismos sem que haja necessidade de passos preparatórios, como adsorção e hidrólise. A taxa de utilização é alta, razão pela qual este material é denominado rapidamente biodegradável;

(c.2) Biodegradável e Particulado. Fração do material biodegradável que, por ser composta de colóides e partículas não coloidais, não pode ser utilizada diretamente pelos microorganismos. Antes de sua utilização ocorrem adsorção (armazenamento) e hidrólise, transformando as macromoléculas em moléculas pequenas que podem atravessar a parede celular para, então, serem utilizadas. Devido aos passos preparatórios, a taxa de utilização desse material é relativamente baixa e por esta razão é denominado de material lentamente biodegradável.

Resumindo, a concentração total de material orgânico do influente pode ser dividida, segundo as suas frações, da seguinte forma:

$$\text{Não Biodegradável e Solúvel: } S_{ui} = f_{us} \cdot S_{ti} \quad (2.4)$$

$$\text{Não Biodegradável e Particulada: } X_{ii} = f_{up} \cdot S_{ti} \quad (2.5)$$

$$\text{Não Biodegradável Total: } S_{ni} = (f_{us} + P \cdot f_{up}) \cdot S_{ti} \quad (2.6)$$

$$\text{Biodegradável Total: } S_{bi} = (1 - f_{us} - P \cdot f_{up}) \cdot S_{ti} \quad (2.7)$$

$$\text{Rapidamente Biodegradável: } S_{bs} = f_{ca} \cdot S_{bi} \quad (2.8)$$

$$\text{Lentamente Biodegradável: } S_{bp} = (1 - f_{ca}) \cdot S_{bi} \quad (2.9)$$

onde:

S_{ui} = concentração do material orgânico do influente não biodegradável e solúvel (mg DQO. l^{-1});

f_{us} = fração não biodegradável e solúvel do material orgânico do influente (mg DQO / mg DQO $^{-1}$);

- S_{ti} = concentração do material orgânico do influente (mg DQO. ℓ^{-1});
- X_{ii} = concentração do material orgânico do influente não biodegradável e particulado (mgSVS. ℓ^{-1});
- f_{up} = razão entre a concentração do material não biodegradável e particulado e a concentração do material orgânico do influente (mgSVS.mgDQO $^{-1}$);
- S_{ni} = concentração do material orgânico do influente não biodegradável total (mgDQO. ℓ^{-1});
- P = equivalente em DQO do lodo orgânico (mgDQO.mgSVS $^{-1}$);
- S_{bi} = concentração do material orgânico do influente biodegradável total (mgDQO. ℓ^{-1});
- S_{bs} = concentração do material orgânico do influente rapidamente biodegradável (mgDQO. ℓ^{-1});
- f_{ca} = razão material rapidamente biodegradável/material biodegradável e,
- S_{bp} = concentração do material orgânico do influente lentamente biodegradável (mgDQO. ℓ^{-1}).

2.2.3.3 - Composição do lodo orgânico

Em sistemas de lodo ativado, nem todo o lodo orgânico é massa de microorganismos vivos. No modelo de Marais, consi

dera-se que o lodo orgânico em tais sistemas é composto das seguintes frações:

(a) Lodo Ativo. Fração do lodo orgânico constituída de micro organismos vivos capazes de utilizar o material orgânico do influente. É gerado dentro do sistema devido a síntese de par te do material orgânico influente;

(b) Resíduo Endógeno. Fração do lodo orgânico que é gerada dentro do sistema, devido à respiração endógena. A respiração endógena é um processo de obtenção de energia para manutenção dos microorganismos vivos, através da oxidação do próprio pro toplasma das células vivas. Mas, como nem toda a célula é bio degradável, uma certa parte (o resíduo endógeno) permanece co mo sólido não biodegradável no sistema, até ser descarregado no lodo de excesso;

(c) Lodo Inerte. Fração do lodo orgânico que se origina da floculação do material não biodegradável e particulado do in fluente passando a fazer parte da fase sólida do lodo;

(d) Material Armazenado. Fração do material lentamente biode gradável do influente que fica armazenado na massa ativa, fa zendo parte da fase sólida do lodo.

A divisão do lodo orgânico nessas frações é puramente teórica, já que somente a concentração do lodo orgânico total pode ser determinada experimentalmente. Entretanto, para fins de modelamento, essa subdivisão se mostra plenamente satisfa

tória, pois permite descrever o comportamento de sistemas de lodo ativado numa ampla faixa de condições operacionais.

Levaram-se em consideração apenas os microorganismos heterotróficos, pois não havia presença de microorganismos autotróficos (nitrificadores), uma vez que o desenvolvimento da nitrificação foi inibido artificialmente.

2.2.3.4 - Utilização do material orgânico biodegradável

No modelo em estudo, pressupõe-se que a taxa de utilização das duas frações biodegradáveis (rapidamente e lentamente) sejam independentes:

(a) Utilização do Material Rapidamente Biodegradável. A cinética de utilização do material rapidamente biodegradável é expressa pela equação de Monod:

$$r_{us} = - (dS_{bs}/dt)_u = \{K_{ms} \cdot S_{bs} / (S_{bs} + K_{ss})\} \cdot X_a \quad (2.10)$$

onde:

r_{us} = taxa de utilização do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

S_{bs} = concentração do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$);

X_a = concentração do lodo ativo ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$);

K_{ss} = constante de meia saturação do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$) e,

K_{ms} = constante específica de utilização do material rapidamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \text{mg} X_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

Refere-se o índice "u" à utilização do substrato.

(b) Utilização do Material Lentamente Biodegradável. A cinética de utilização do material lentamente biodegradável se dá através de:

(b.1) Adsorção. Na utilização do material lentamente biodegradável, primeiro há armazenamento (adsorção de S_{bp} à superfície do lodo ativo), podendo ser expressa por uma adaptação da equação proposta por Blackwell (1971):

$$r_a = -(dS_{bp}/dt)_a = \{K_v \cdot S_{bp} \cdot (F - X_s/X_a)\} \cdot X_a \quad (2.11)$$

onde:

r_a = taxa de armazenamento do material lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

S_{bp} = concentração do material lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$);

X_s = concentração do material armazenado ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$);

F = razão máxima entre X_s e X_a e,

K_v = constante de armazenamento ($\ell \cdot \text{mg} X_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

Refere-se o índice "a" à adsorção.

(b.2) Utilização. A utilização do material orgânico armazenado requer dois passos: (1) o material armazenado é hidrolizado e (2) o material hidrolizado é transformado em moléculas pequenas, podendo passar pela parede celular dos microorganismos para serem utilizados. Supõe-se que a hidrólise seja o processo que limita a taxa de utilização do material lentamente biodegradável. Marais propôs uma equação modificada da de Monod para descrever os processos de hidrólise e de utilização do material armazenado. Tendo em vista que o material armazenado está localizado na superfície do lodo ativo (no seio do líquido não há material armazenado), o parâmetro relevante para expressar a concentração deste material é a sua massa por unidade de massa de lodo ativo (X_s/X_a). Desse modo, tem-se:

$$\begin{aligned} r_{up} &= -P(dX_s/dt)_u = \{K_{mp} \cdot P \cdot (X_s/X_a) / (P \cdot (X_s/X_a) + K_{sp})\} \cdot X_a \\ &= \{K_{mp} \cdot P \cdot X_s / (P \cdot X_s + K_{sp} \cdot X_a)\} \cdot X_a \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde:

r_{up} = taxa de utilização do material armazenado ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

K_{sp} = constante de meia saturação do material armazenado ($\text{mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$) e,

K_{mp} = constante específica de utilização do material armazenado ($\text{mgDQO} : \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

2.2.3.5 - Reações do lodo orgânico

As reações mais importantes na fase líquida do licor misto se referem ao seguinte:

(a) Síntese do Lodo Ativo. Aceitando-se um coeficiente de rendimento Y_h para o material rapidamente biodegradável e o material armazenado, tem-se:

$$r_c = (dX_a/dt)_c = Y_h \cdot (r_{us} + r_{up}) \quad (2.13)$$

onde:

r_c = taxa de crescimento do lodo ativo ($mgX_a \cdot \ell^{-1} \cdot d^{-1}$).

Refere-se o índice "c" ao crescimento do lodo ativo.

(b) Resíduo Endógeno. Paralelamente e independente da síntese, ocorre decaimento de células dos microorganismos vivos num processo chamado respiração endógena. A taxa de decaimento do lodo ativo é proporcional à sua concentração (Marais e Ekama, 1976):

$$r_d = - (dX_a/dt)_d = b_h \cdot X_a \quad (2.14)$$

onde:

r_d = taxa de desaparecimento ou decaimento do lodo ativo devido à respiração endógena ($mgX_a \cdot \ell^{-1} \cdot d^{-1}$) e,

b_h = constante de respiração endógena (d^{-1}).

Refere-se o índice "d" ao decaimento de lodo ativo.

No decaimento do lodo ativo, a maior parte da massa ce lular é oxidada, permanecendo, entretanto, um resíduo sólido que não é biodegradável - o resíduo endógeno, segundo Washington e Hetling (1965). Observa-se que o aparecimento do resíduo endógeno ocorre a uma taxa proporcional à taxa de decaimento do lodo ativo:

$$r_e = (dX_e/dt)_e = f \cdot r_d = f \cdot b_h \cdot X_a \quad (2.15)$$

onde:

r_e = taxa de aparecimento do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) e,

f = fração do lodo ativo decaído que é transformado em resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$).

Refere-se o índice "e" à formação do resíduo endógeno.

2.2.3.6 - A taxa de consumo de oxigênio (TCO)

A parte do lodo ativo decaído que é oxidada causa consumo de oxigênio. Levando-se em consideração que cada miligrama de lodo (SVS) representa uma massa de P miligramas de DQO, a taxa de consumo de oxigênio devido à respiração endógena é:

$$O_d = P \cdot (1 - f) \cdot b_h \cdot X_a \quad (2.16)$$

onde:

O_d = TCO para a respiração endógena ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

A TCO para oxidação do material orgânico do influente é dada por:

$$O_u = (1 - P \cdot Y_h) \cdot (r_{us} + r_{up}) \quad (2.17)$$

onde:

$$O_u = \text{TCO para oxidação do material orgânico influente (mg } O_2 \cdot \ell^{-1} \cdot d^{-1} \text{)}.$$

Portanto, a TCO total (não incluindo nitrificação) é expressa como:

$$O_c = (1 - P \cdot Y_h) \cdot (r_{us} + r_{up}) + P \cdot (1 - f) \cdot r_d \quad (2.18)$$

onde:

$$O_c = \text{TCO total (mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot d^{-1} \text{)}.$$

2.2.3.7 - Equações básicas

As equações cinéticas derivadas nas seções anteriores permitem estabelecer expressões para as taxas de variação das concentrações dos diferentes materiais no sistema, devido às reações que nele ocorrem:

(a) Material Rapidamente Biodegradável. A única reação desse material é a sua utilização pelo lodo ativo. Portanto:

$$r_{sbs} = (dS_{bs}/dt)_r = -r_{us} \quad (2.19)$$

onde:

r_{sbs} = taxa de reação do material rapidamente biodegradável
($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

(b) Material Lentamente Biodegradável. A concentração desse material é afetada pelo armazenamento:

$$r_{sbp} = (dS_{bp}/dt)_r = -r_a \quad (2.20)$$

onde:

r_{sbp} = taxa de reação (armazenamento) do material lentamente biodegradável ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

(c) Material Armazenado. Sua concentração é afetada pela taxa com que ocorre o armazenamento e pela taxa de utilização desse material:

$$r_{xs} = (dX_s/dt)_r = (r_a - r_{up})/P \quad (2.21)$$

onde:

r_{xs} = taxa de reação do material armazenado ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

(d) Lodo Ativo. A concentração do lodo ativo varia devido à utilização do material biodegradável e à respiração endógena:

$$r_{xa} = (dX_a/dt)_r = Y_h \cdot (r_{us} + r_{up}) - r_d \quad (2.22)$$

onde:

r_{xa} = taxa de reação do lodo ativo ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

(e) Resíduo Endógeno. A taxa de produção do resíduo endógeno é proporcional à taxa de respiração endógena:

$$r_{xe} = (dX_e/dt)_r = f \cdot r_d \quad (2.23)$$

onde:

r_{xe} = taxa de reação do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

Na Tabela 2.1, observam-se as expressões que descrevem a taxa de reação para os diferentes materiais e a TCO para oxidação do material orgânico biodegradável.

O conjunto das equações diferenciais da Tabela 2.1 forma a base do modelo de Marais que descreve o comportamento de sistemas de lodo ativado quanto à utilização do material orgânico biodegradável.

2.3 - Figuras

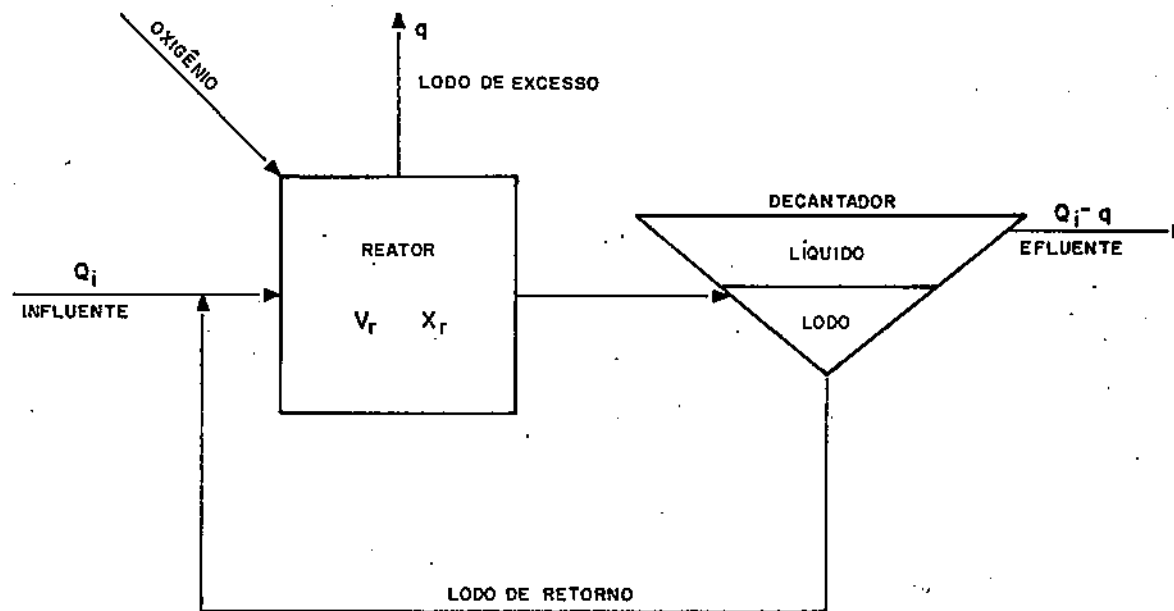


FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE LODO ATIVADO COM REATOR UNITÁRIO, ONDE: Q_i , q , $Q_i - q$, V_r , X_r SÃO RESPECTIVAMENTE, VAZÃO INFLUENTE, VAZÃO DE LODO DE EXCESSO, VAZÃO EFLUENTE, VOLUME DO REATOR E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NO REATOR.

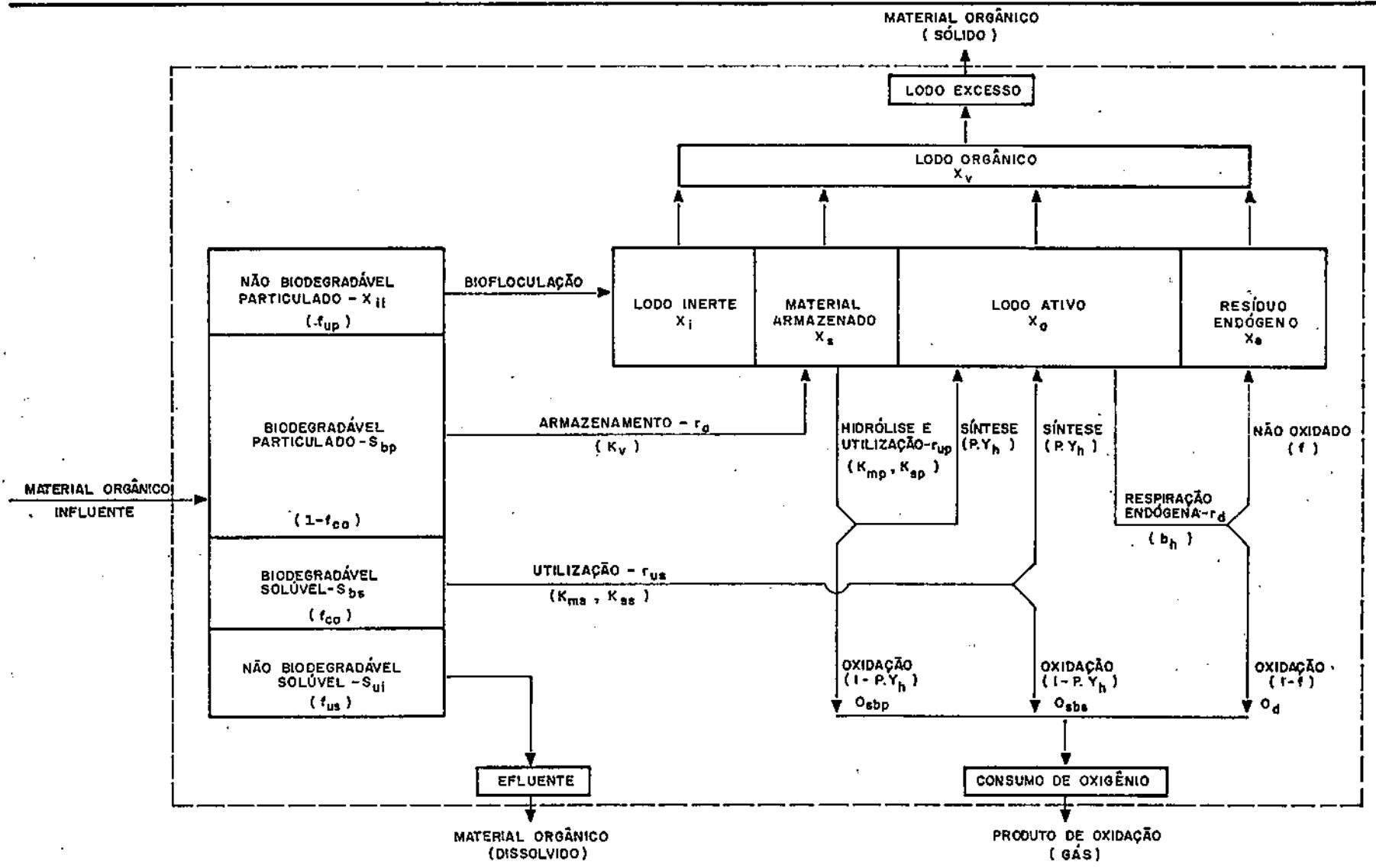


FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE MARAIS - MATERIAIS E PROCESSOS ENVOLVIDOS NA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL ORGÂNICO BIODEGRADÁVEL DO INFLUENTE EM UM SISTEMA DE LODO ATIVADO SOB CONDIÇÕES DINÂMICAS.

2.4 - Tabela

Tabela 2.1 - Equações básicas de um sistema de lodo ativado (estado dinâmico), referente ao material orgânico biodegradável.

1 - Taxa de consumo de oxigênio total

$$\begin{aligned}
 O_c &= (1-P.Y_h).(r_{us}+r_{up})+P(1-f).r_d \\
 &= \{(1-P.Y_h).(K_{ms}.S_{bs}/(S_{bs}+K_{ss})+K_{mp}.P.X_s/(P.X_s+K_{sp}.X_a)) + \\
 &\quad + P.(1-f).b_h\}.X_a \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

2 - Taxa de reação do material rapidamente biodegradável

$$r_{sbs} = -r_{us} = -\{K_{ms}.S_{bs}/(S_{bs}+K_{ss})\}.X_a \quad (2.19)$$

3 - Taxa de reação do material lentamente biodegradável

$$r_{sbp} = -r_a = -\{K_v.S_{bp}.(F-X_s/X_a)\}.X_a \quad (2.20)$$

4 - Taxa de reação do material armazenado

$$\begin{aligned}
 r_{xs} &= (r_a - r_{up})/P \\
 &= \{K_v.S_{bp}.(F-X_s/X_a)/P - K_{mp}.X_s/(P.X_s+K_{sp}.X_a)\}.X_a \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

5 - Taxa de reação do lodo ativo

$$\begin{aligned}
 r_{xa} &= Y_h.(r_{us} + r_{up}) - r_d \\
 &= \{Y_h.(K_{ms}.S_{bs}/(S_{bs}+K_{ss})+K_{mp}.P.X_s/(P.X_s+K_{sp}.X_a))-b_h\}.X_a \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

6 - Taxa de reação do resíduo endógeno

$$\begin{aligned}
 r_{xe} &= f . r_d \\
 &= f . b_h . X_a \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

3 - AFERIÇÃO DO MODELO DE MARAIS

3.1 - Introdução

Marais observou experimentalmente que a qualidade do efluente (expressa em termos de DQO) e a concentração de lodo (expressa em $\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$), praticamente, não são afetadas por variações da carga orgânica aplicada ao sistema. O fato de tais variáveis manterem um valor essencialmente constante, em um sistema operado sob carga variável, torna-as inadequadas para serem usadas na aferição dos valores numéricos das constantes das expressões cinéticas de utilização do material orgânico biodegradável. Em contraste, a taxa de consumo de oxigênio (TCO) exhibe grandes flutuações em um sistema sob carga variável, tornando-se no único parâmetro experimental que pode ser correlacionado racionalmente com a cinética de utilização do material orgânico biodegradável. Dessa forma, a TCO é o parâmetro adequado para aferir o modelo em estudo.

3.2 - Constantes a serem determinadas

Para usar o modelo de Marais, caracterizado pelas equações diferenciais da Tabela 2.1, é necessário que se conheçam os coeficientes ou constantes nelas presentes. Essas constan

tes podem ser divididas em três classes diferentes:

(a) Parâmetros de Massa de Lodo: Y_h , P , f e F ;

(b) Constantes que descrevem a composição do material orgânico do influente: f_{us} , f_{up} e f_{ca} ;

(c) Constantes cinéticas dos processos que ocorrem dentro do reator:

(c.1) Utilização do material rapidamente biodegradável: K_{ms} e K_{ss} ;

(c.2) Armazenamento do material lentamente biodegradável: K_v ;

(c.3) Utilização do material armazenado: K_{mp} e K_{sp} ;

(c.4) Respiração endógena: b_h .

Ekama e Marais (1978) determinaram essas constantes para o caso do esgoto doméstico da cidade do Cabo - África do Sul, na faixa de temperatura de 14 a 20°C. Os valores encontrados por esses pesquisadores se encontram na Tabela 3.1.

Os parâmetros de massa de lodo não parecem sofrer influência das características do esgoto influente e das condições operacionais. Num trabalho usando esgoto bruto da cidade de Campina Grande - Pb, a uma temperatura de 28°C, Dias et alii (1983) observaram valores de Y_h e f iguais aos da Tabela 3.1, enquanto que o valor de P encontrado foi um pouco maior ($P = 1,56 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$).

Quanto às constantes que descrevem a composição do material orgânico influente em termos de duas frações não biodegradáveis (solúvel, f_{us} e particulada, f_{up}) e de duas frações biodegradáveis (solúvel, f_{ca} e particulada, $1-f_{ca}$) parecem variar significativamente de um esgoto para outro. Pois, os valores encontrados para f_{us} por Sutton et alii (1979), Marais e Ekama (1976), Heidman (1979) e Dias et alii (1983), pesquisando esgoto no Canadá, África do Sul, Estados Unidos e Brasil, respectivamente oscilam entre 0,08 e 0,14. Enquanto que os valores encontrados para f_{up} oscilam entre 0,04 e 0,17 mgSVS. $mgDQO^{-1}$ e os valores de f_{ca} , entre 0,05 e 0,35. Portanto, é importante que se tenha um método que permita determinar os valores dessas constantes experimentalmente.

Quanto às constantes cinéticas, observou-se experimentalmente que os processos de utilização do material rapidamente biodegradável e de armazenamento do material biodegradável e particulado do influente ocorrem de forma tão rápida que podem ser considerados instantâneos. Dessa forma, o valor exato das respectivas constantes cinéticas (K_{ms} , K_{ss} e K_v) não tem muita importância prática. Os outros dois processos: utilização do material armazenado e respiração endógena são relativamente lentos, fazendo com que o conhecimento do valor das constantes cinéticas pertinentes (K_{mp} , K_{sp} e b_h) seja de grande importância para a descrição do comportamento de sistemas de lodo ativado. Usando esgoto bruto da cidade de Campina Grande - Pb à temperatura de 28°C, Tenório (1985) determinou experimentalmente, o valor de $b_h = 0,32d^{-1}$.

Ao se gerarem perfis das variáveis do processo, obser

va-se que as variações no valor da constante de meia saturação do material armazenado (K_{sp}) não afetam significativamente o comportamento teórico do sistema. Logo, não é tão importante conhecer o valor exato dessa constante. Entretanto, variações no valor da constante específica de utilização do material armazenado (K_{mp}) têm grande influência sobre o comportamento do sistema. Portanto, é de fundamental importância que se determine o valor dessa constante com precisão. Van Haandel e Marais (1981) acharam que o valor de K_{mp} , além da temperatura, depende, também, da origem do esgoto a ser tratado, diminuindo o seu valor quando a fração de água residuária industrial no esgoto aumenta.

Resumindo, para poder descrever adequadamente o comportamento de sistemas de lodo ativado sob condições dinâmicas, usando-se o modelo de Marais, é necessário que se determinem pelo menos as constantes relevantes, ou seja, as constantes de composição do material orgânico influente (f_{us} , f_{up} e f_{ca}) e de utilização do material armazenado (K_{mp} e K_{sp}).

3.3 - Métodos experimentais para determinar as constantes relevantes

Para determinar as constantes relevantes é necessário que se observe o comportamento do sistema sob condições dinâmicas, ou seja, é preciso que se criem situações transitórias. Isto pode ser obtido através do método das cargas cíclicas e do método das cargas repentinas.

3.3.1 - Método das cargas cíclicas

Ekama e Marais (1978) sugeriram o método das cargas cíclicas para determinar as constantes das equações diferenciais da Tabela 2.1. Nele, um sistema de lodo ativado completamente misturado e aeróbio é submetido a um padrão cíclico de carga orgânica: períodos de alimentação são alternados por períodos nos quais a alimentação do sistema é interrompida. Sob essas condições, determinam-se em função do tempo os valores das três variáveis mensuráveis do processo: DQO da fase líquida do licor misto; concentração e produção do lodo orgânico e taxa de consumo de oxigênio em função do tempo, antes e depois dos períodos de alimentação.

3.3.2 - Método das cargas repentinas

É um método alternativo ao de Ekama e Marais, que também possibilita determinar as constantes relevantes do modelo em estudo. Consiste em se aplicar a um sistema aeróbio de lodo ativado completamente misturado, cargas instantâneas de esgoto, procedendo-se da seguinte maneira: interrompe-se a aeração e a agitação do licor misto, permitindo assim a sedimentação do lodo no reator. Uma parte do líquido sobrenadante é sifonado sendo, então, substituído por um volume igual de esgoto bruto. Feito isso, retoma-se imediatamente a agitação e a aeração do licor misto. Antes e depois da substituição de parte do sobrenadante por esgoto bruto, observa-se o comportamento da DQO da fase líquida, da concentração de sólidos e da TCO em função do tempo.

3.4 - Tabela

Tabela 3.1 - Constantes do modelo de Marais ($14^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$)

(1) Parâmetros de massa de lodo

$$Y_h = 0,45 \text{ mgSVS} \cdot \text{mgDQO}^{-1}$$

$$P = 1,48 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$$

$$f = 0,2$$

$$F = 1,0$$

(2) Composição do material orgânico influente

$$f_{us} = 0,05 \text{ a } 0,10 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgDQO}^{-1}$$

$$f_{up} = 0,09 \text{ mgSVS} \cdot \text{mgDQO}^{-1} \text{ (esgoto bruto)}$$

$$f_{ca} = 0,24$$

(3) Constantes cinéticas

$$K_{ms} = 20 \cdot (1,2)^{T-20} \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$K_{ss} = 5 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$$

$$K_v = 0,25 \cdot (1,1)^{T-20} \ell \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$K_{mp} = (1,2 \text{ a } 1,5) \cdot (1,06)^{T-20} \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$K_{sp} = 0,04 \cdot (1,1)^{T-20} \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$$

$$b_h = 0,24 \cdot (1,029)^{T-20} \text{ d}^{-1}$$

4 - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução

Com o objetivo de testar a aplicabilidade do modelo de Marais para as condições prevalentes no Brasil, realizou-se uma investigação experimental de um sistema de lodo ativado, com reator unitário, em escala de laboratório. O sistema foi operado sob condições dinâmicas de cargas orgânica e hidráulica à temperatura de 28°C, usando-se esgoto bruto municipal da cidade de Campina Grande - Pb. Essa investigação se prolongou de Abril a Setembro de 1982.

4.2 - Descrição do sistema

A Figura 4.1 fornece uma representação esquemática do sistema utilizado na investigação experimental.

O esgoto bruto utilizado foi retirado do emissário do sistema de esgotos da cidade de Campina Grande - Pb. A coleta era feita entre 10 e 12 horas, horário em que a concentração da DQO no emissário é máxima. O armazenamento era feito em um freezer com capacidade de 200 litros, sendo mantida a temperatura entre 0 a 4°C para evitar decomposição anaeróbia do esgoto. Ao ser reabastecido, o freezer era lavado com água à temperatura ambiente.

Para alimentar o sistema, retirava-se o esgoto do freezer, peneirando-o em uma peneira de malha de 2 mm. O recipiente de alimentação era um balde de plástico com capacidade de 20ℓ, o qual era isolado termicamente do ambiente por meio de um isopor. Esse balde era lavado previamente com água quente para impedir o crescimento de organismos que pudessem alterar o valor da DQO. Em seguida, recebia o volume de esgoto correspondente ao funcionamento do sistema pelo período do experimento. O aumento da temperatura do esgoto dentro do recipiente era de apenas 4°C em 24 horas. Na tampa do recipiente havia um motor de baixa rotação (30 rpm) que acionava um eixo central no qual era fixada uma palheta. A agitação era intermitente: 5 segundos/minuto, o suficiente apenas para manter os sólidos em suspensão.

O esgoto era bombeado do recipiente de alimentação para o reator, através de uma bomba dosadora do tipo peristáltico com cabeçote livre, o qual permitia a operação desta por vários meses, sem substituição da mangueira e com vazão constante. O movimento de rotação do cabeçote da bomba era acionado por um motor de 0,1 HP a uma velocidade constante de 60 rpm. Ajustava-se a vazão regulando eletronicamente a fração de tempo de bombeamento, com auxílio de um temporizador. A vazão era ajustável entre 0,0 e 2,5ℓ.h⁻¹ por canal. Dos seis canais da bomba, apenas dois eram utilizados: um para a alimentação do reator com esgoto e o outro para o bombeamento do lodo de retorno. O esgoto bombeado entrava no reator juntamente com o lodo de retorno.

O reator era um recipiente cilíndrico, de acrílico

transparente, com um diâmetro interno de 21cm e uma altura de 45cm (capacidade máxima de 16ℓ). Na tampa do reator estava a coplado um motor de 30 rpm que acionava um eixo central de a alumínio ao qual estava fixado uma palheta de acrílico de 14 x 4cm². Essa agitação possibilitava uma suspensão uniforme dos flocos de lodo. O oxigênio era fornecido ao licor misto atrvês de uma bomba de ar do tipo usado em aquários. Uma boa dispersão do oxigênio era garantida com o uso de uma pedra porosa conectada no fim do tubo pelo qual o ar era introduzido no reator. O teor de oxigênio dissolvido variava entre 2 e 4 mg.ℓ⁻¹.

Para ser mantida uma temperatura de 28°C dentro do licor misto, usou-se um controle eletrônico que compreendia: um sensor de temperatura, um teristor e um resistor de 100W protegido por um tubo de cobre.

O volume do licor misto no reator era regulado por meio de um sifão invertido. Procurava-se manter um volume tal que a concentração do lodo dentro do reator tivesse um valor entre 1000 e 3500 mgSVS.ℓ⁻¹. Nesta faixa, ocorria uma boa sedimentação do lodo no decantador. A parte do licor misto que passava pelo sifão invertido era descarregado no decantador.

O decantador de acrílico tinha uma forma cilíndrica com um diâmetro interno de 7cm e um volume útil de 2ℓ e estava montado em um painel vertical com um ângulo de 60° em relação à horizontal. Fixado na tampa, um motor acionava um eixo central ao longo do volume cilíndrico a uma velocidade de 2 rpm. Ligada e paralela ao eixo estava uma palheta revestida de borracha, com largura de 1cm. Três pequenas molas pressio

navam essa palheta contra a parede interna do cilindro, varrendo partículas de lodo ali agregadas. A agitação provocada pela palheta aumentava a velocidade de sedimentação do lodo, possibilitando um bom adensamento deste. O lodo era recirculado para o reator através de um canal da bomba dosadora à mesma vazão influente. O sobrenadante do decantador, o efluente, era coletado em balde de plástico para posterior análise da DQO.

As conexões da bomba para o reator, do reator para o decantador e deste para a bomba eram feitas com mangueiras de 10 mm de diâmetro. Tais mangueiras eram de plástico transparente flexível. Esse tipo de conexão foi escolhido porque possibilitava uma visão dos percursos do lodo e do esgoto, além de não causar problemas de entupimento.

Passavam-se diariamente escovas no decantador, no reator e nas conexões a fim de se soltarem os flocos que ficavam aderidos às paredes. De 3 em 3 semanas todo o sistema era lavado com água quente. Nessa ocasião o lodo era retirado e após a lavagem, recolocado no sistema.

4.3 - Procedimento operacional

Para testar o modelo de utilização do material orgânico foi preciso inibir artificialmente o desenvolvimento dos processos de nitrificação e desnitrificação para que a TCO refletisse somente a oxidação do material orgânico. Isto foi conseguido através da adição diária de tiouréia (aproximadamente $4,2 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$) ao licor misto, uma vez que esta substância

é um inibidor seletivo para os organismos nitrificadores.

Eliminados os problemas de nitrificação e desnitrificação, iniciou-se a investigação experimental, permanecendo constante a idade de lodo ($R_s = 20d$), o volume do reator ($V_r = 12\ell$) e a temperatura ($T = 28^\circ C$).

Antes de se iniciar a operação do sistema sob condições dinâmicas, ele foi operado com uma alimentação contínua e constante, mantendo-se fixas a vazão e concentração da DQO do influente, para permitir que a massa e composição do lodo se adaptasse à carga alimentada (estado estacionário).

Para se manter a idade de lodo em 20 dias, descarregaram-se diariamente do reator 600 ml de lodo de excesso, o qual é definido pela razão entre o volume do reator e a idade do lodo. Esse lodo era descarregado de uma só vez, não causando grandes transtornos ao sistema, uma vez que a massa de lodo retirada era pequena em relação ao volume do reator (5%).

A operação do sistema sob condições dinâmicas foi obtida segundo os métodos descritos anteriormente. Foram feitas experiências com cargas cíclicas e com cargas repentinas.

4.3.1 - Experiências pelo método das cargas cíclicas

O procedimento operacional se desenvolveu através de 3 experimentos, nos quais se variaram os períodos de alimentação e de não alimentação, a carga hidráulica e o número de repetições de cada um deles (número de testes). Para efeito de orga

nização dos dados obtidos, foram assim denominados:

(a) Experimento - E_1 : Período de 1,25 h de alimentação alternnado por período de não alimentação de 4,75 h. Durante a alimentação, 3ℓ de esgoto eram adicionados ao reator. Esse experimento foi repetido 7 vezes;

(b) Experimento - E_2 : Período de 1,75 h de alimentação do reator alternado por período de não alimentação de 6,25 h. Durante a alimentação, 4ℓ de esgoto eram adicionados ao reator. Repetiu-se esse experimento 4 vezes;

(c) Experimento - E_3 : Período de 3,25 h de alimentação alternnado por período de não alimentação de 8,75 h. Durante a alimentação, 6ℓ de esgoto eram adicionados ao reator. Esse experimento foi repetido 2 vezes.

4.3.2 - Experiências pelo método das cargas repentinas

O procedimento operacional se resumiu em um único experimento, ou seja:

Experimento - E_4 : A agitação e a aeração do licor misto no reator eram interrompidas, permitindo a sedimentação do lodo no reator até que 6 litros do sobrenadante clarificado pudessem ser sifonados, o que levava aproximadamente 15 minutos. O volume sifonado era então substituído por 6 litros de esgoto

aerado previamente e com temperatura de 28°C. Imediatamente após ter sido adicionado o esgoto, iniciava-se a agitação e a aeração do licor misto, permanecendo assim, durante um período de 12 horas, após o qual outros 6 litros de esgoto eram introduzidos da mesma maneira. Esse experimento foi repetido 4 vezes.

Em todos os experimentos, observaram-se os seguintes parâmetros: DQO do influente, do efluente e do licor misto, concentração dos sólidos orgânicos e a TCO durante o período de alimentação e de não alimentação.

As amostras para a determinação da DQO da fase líquida do licor misto e da concentração dos sólidos orgânicos eram coletadas justamente antes e depois da alimentação para as experiências com cargas cíclicas e, antes de se interromper a agitação e a aeração e exatamente 1 minuto depois de reiniciadas estas operações para as experiências com cargas repentinas.

4.4 - Procedimento analítico

As amostras para a determinação da demanda química de oxigênio (DQO) e dos sólidos voláteis em suspensão (SVS) foram coletadas e analisadas conforme técnicas padrões do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1975.

Para a medição da taxa de consumo de oxigênio (TCO), utilizou-se um medidor de oxigênio modelo YSI 54 ABP provido de eletrodo de membrana seletiva de oxigênio gasoso e acoplada

do a um registrador PYE UNICAN modelo AR-55. As medições se basearam no procedimento proposto por Van Haandel e Catunda (1983): o eletrodo do medidor de oxigênio é mergulhado no licor misto do reator. Em seguida, interrompe-se o fornecimento de oxigênio. Devido ao consumo de oxigênio pelos microorganismos presentes no licor misto, a concentração de oxigênio dissolvido (OD) tenderá a diminuir. Determina-se a taxa de variação da concentração de OD mediante a observação da variação da concentração de OD no licor misto em função do tempo. O diagrama obtido normalmente se aproxima de uma reta, onde a declividade desta fornece a taxa de variação da concentração de OD no licor misto. Sob condições adequadamente escolhidas, a taxa de variação de OD é indicativa para a taxa de consumo de oxigênio. É importante frisar que o sistema era operado normalmente durante o teste, com exceção da aeração que era interrompida.

A Figura 4.2 ilustra o esquema do teste de taxa de consumo de oxigênio.

Vale salientar que a taxa de variação de OD no licor misto deveria depender unicamente da taxa de consumo de oxigênio (TCO) decorrente da atividade dos microorganismos, mas outros fatores influenciam também nesta variação. Porém, podem ser eliminados quando se tomam algumas providências antes de dar início ao teste da TCO:

(a) para que o transporte de oxigênio da fase líquida para o interior dos flocos não se torne fator limitante, a concentração de oxigênio no licor misto deve ser mantida acima do va

lor crítico de OD. Esse valor crítico está em torno de 1 a 2 $\text{mg.}\ell^{-1}$;

(b) o fator de relaxação do medidor de oxigênio é evitado quando se permite que o eletrodo de oxigênio permaneça em contato com o licor misto antes do começo do teste. O tempo necessário para a adaptação do eletrodo é dado pela constante de relaxação e, normalmente, é menor que 1 a 2 minutos;

(c) a influência do efeito hidráulico e de absorção de oxigênio do ar pode ser eliminada fazendo-se as devidas correções.

Tomando-se as referidas providências e fazendo-se as correções necessárias, é possível obter um valor acurado da TCO pelo método descrito.

4.5 - Figuras

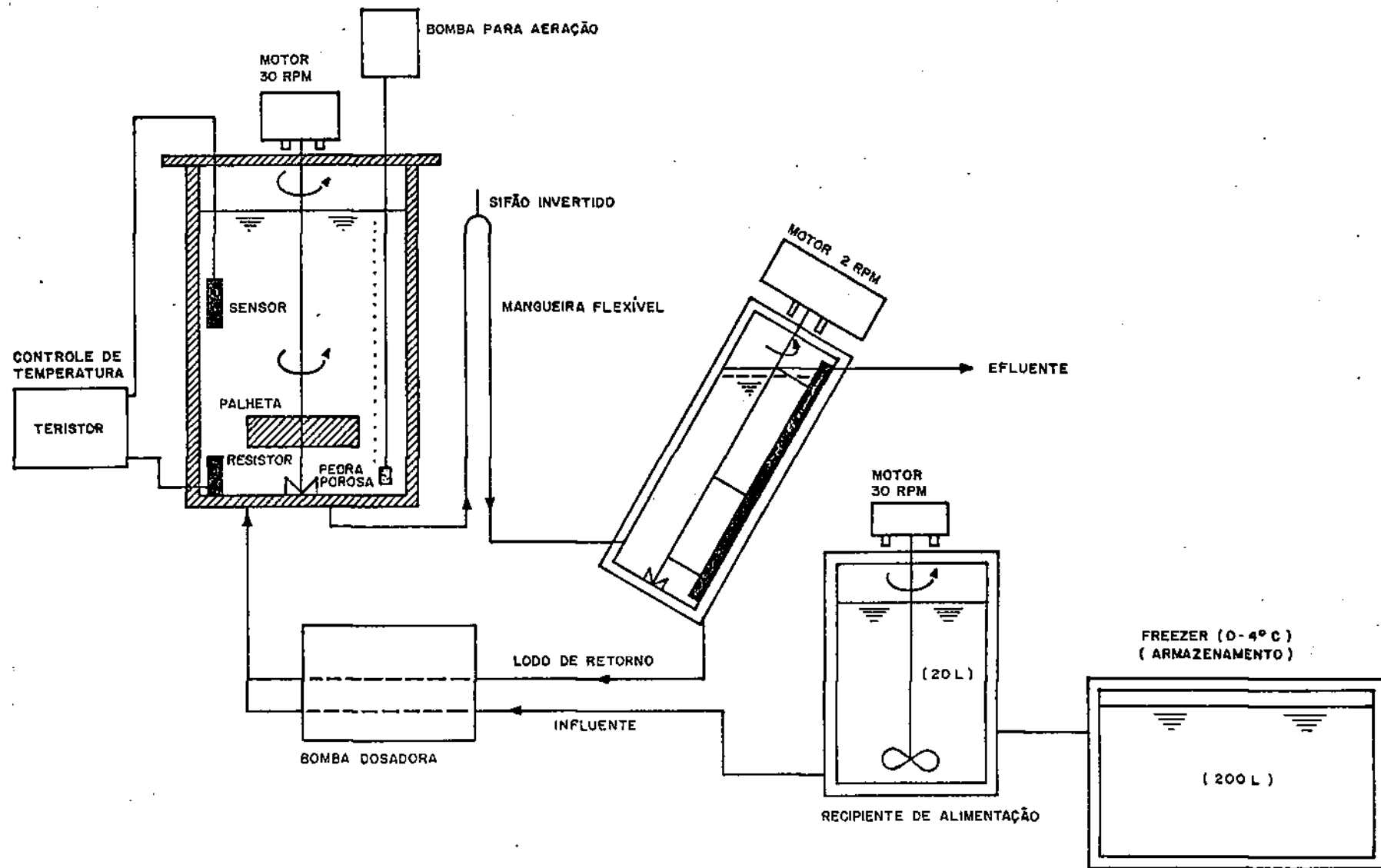


FIGURA 4.1 - ESQUEMA DO SISTEMA DE LODO ATIVADO UTILIZADO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.

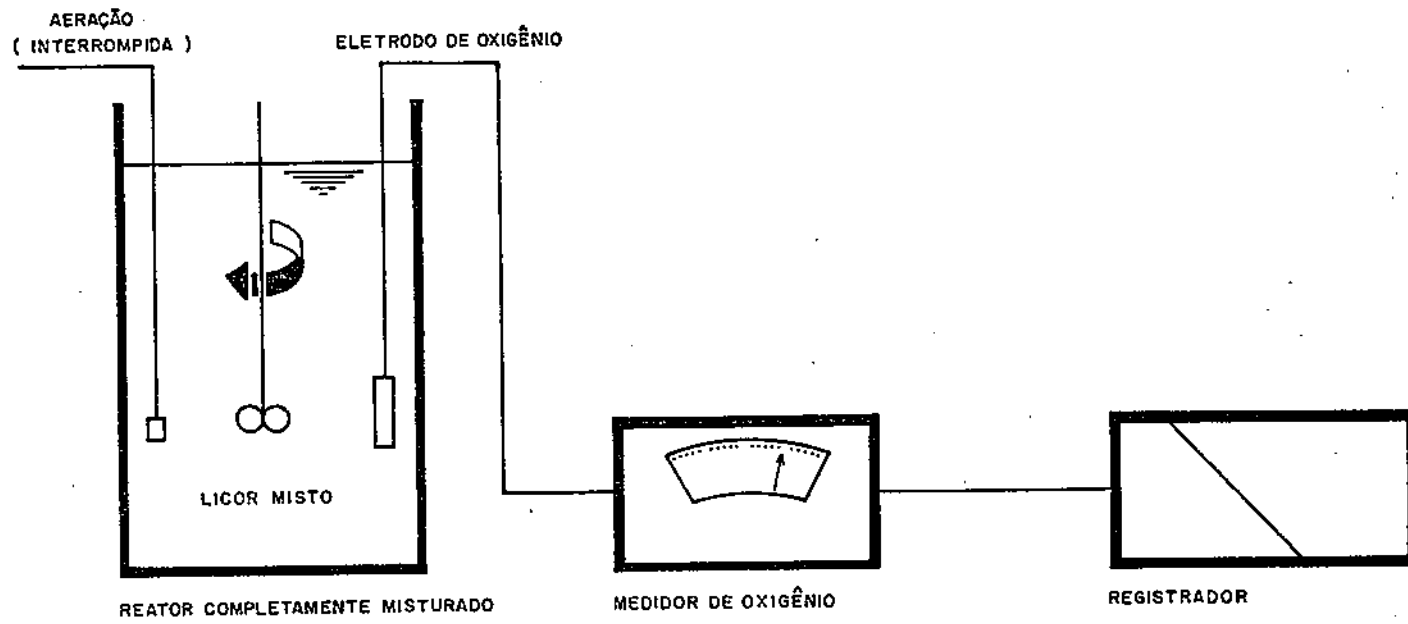


FIGURA 4.2 - ESQUEMA DO TESTE DA TAXA DE CONSUMO DE OXIGÊNIO.

5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 - Introdução

As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 fornecem para os testes realizados os valores e médias: da DQO do influente, da DQO da fase líquida do licor misto, da DQO do efluente e da concentração do lodo orgânico; correspondendo respectivamente aos experimentos E_1 , E_2 , E_3 e E_4 (vede seção 4.3.1). A Tabela 5.5 fornece um resumo dos valores médios desses parâmetros para os experimentos realizados.

Os valores e médias da TCO, para os períodos de alimentação e de não alimentação dos testes realizados, encontram-se nas Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, os quais correspondem aos experimentos E_1 , E_2 , E_3 e E_4 , respectivamente.

A partir dos valores médios da TCO, traça-se o perfil da TCO em função do tempo para cada experimento, os quais se encontram ilustrados nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

As Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 fornecem a curva do consumo acumulativo de oxigênio para a oxidação do material armazenado em função do tempo, para os experimentos E_1 , E_2 , E_3 e E_4 , respectivamente.

5.2 - Tabelas

Tabela 5.1 - Valores e médias: da DQO do influente - S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos sete testes do experimento E_1 *. (Todos os dados são em $mg.\ell^{-1}$).

Teste	S_{ti}	S_m		S_{te}	X_v	
		Início	Fim		Início	Fim
1	677	75	72	66	2396	2323
2	712	161	107	81	2610	2260
3	618	128	60	80	2250	2250
4	645	67	40	82	2410	2180
5	659	108	67	48	2710	2380
6	672	20	20	47	2460	2350
7	726	34	74	46	2510	2520
		85	63		2478	2323
Média	673		74	64		2401

* Experimento E_1 : Período de alimentação de 3 litros de esgoto em 1,25 h seguido por não alimentação durante 4,75h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20d$ e $T = 28^\circ C$.

Tabela 5.2 - Valores e médias: da DQO do influente - S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos quatro testes do experimento E_2^* . (Todos os dados são em $mg.\ell^{-1}$).

Teste	S_{ti}	S_m		S_{te}	X_v	
		Início	Fim		Início	Fim
1	618	60	74	45	2480	2210
2	685	60	54	46	2500	2050
3	632	60	60	44	2290	2600
4	647	60	53	45	3050	2140
		60	60		2580	2250
Média	646		60	45		2415

* Experimento E_2 : Período de alimentação de 4 litros de esgoto em 1,75h seguido por não alimentação durante 6,25h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20d$ e $T = 28^\circ C$

Tabela 5.3 - Valores e médias: da DQO do influente - S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos dois testes do experimento E_3^* . (Todos os dados são em $mg.l^{-1}$).

Teste	S_{ti}	S_m		S_{te}	X_v	
		Início	Fim		Início	Fim
1	752	98	83	60	2930	2410
2	782	98	83	60	2940	2440
		98	83		2935	2425
Média	767	91	83	60	2680	

* Experimento E_3 : Período de alimentação de 6 litros de esgoto em 3,25h seguido por não alimentação durante 8,75h. $V_r = 12l$, $R_s = 20d$ e $T = 28^\circ C$.

Tabela 5.4 - Valores e médias: da DQO do influente - S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto antes e logo depois da alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico antes e logo depois da alimentação - X_v , relativos aos quatro testes do experimento E_4^* . (Todos os dados são em $mg.l^{-1}$)

Teste	S_{ti}	S_m		S_{te}	X_v	
		Antes	Depois		Antes	Depois
1	744	80	84	75	2365	2220
2	734	105	75	105	2590	1970
3	617	158	98	105	3680	2260
4	587	90	68	45	1960	2270
		108	81		2649	2180
Média	671	95		83	2415	

* Experimento E_4 : Carga repentina de 6 litros de esgoto aplicada a cada 12h. $V_r = 12l$, $R_s = 20d$ e $T = 28^{\circ}C$

Tabela 5.5 - Valores médios: da DQO do influente - S_{ti} , da DQO da fase líquida do licor misto no início e no fim do período de alimentação - S_m , da DQO do efluente - S_{te} e da concentração do lodo orgânico no início e no fim do período de alimentação - X_v , relativos aos experimentos realizados. (Todos os dados são em $mg.l^{-1}$).

Método	Experimento	S_{ti}	S_m		S_{te}	X_v	
			Início	Fim		Início	Fim
Carga Cíclica	E_1	673	85	63	65	2478	2328
	E_2	645	60	60	45	2580	2250
	E_3	767	98	83	60	2935	2425
Carga Repentina	E_4	670	108	81	82	2649	2180

Tabela 5.6 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos sete testes do experimento E_1^* em função do tempo.

(continua)

Tempo (h)	Teste da TCO							Média
	1	2	3	4	5	6	7	
-0:30	12,0	14,0	14,0	15,0	14,0	16,0	16,0	14,4
-0:05	13,0	12,0	14,0	14,5	14,5	15,0	16,0	14,1
0:05	20,5	20,5	21,0	24,5	27,5	27,0	28,0	24,1
0:15	27,5	25,5	28,0	25,0	29,0	29,5	28,5	27,6
0:30	30,0	26,5	28,0	29,0	30,5	29,0	31,0	29,1
0:45	31,5	28,0	28,0	31,0	31,0	32,0	32,0	30,5
1:00	32,0	29,5	26,5	31,5	31,0	33,5	32,5	30,9
1:15	33,0	32,5	28,0	30,5	27,5	33,0	31,0	30,8
1:18	24,5	23,5	22,5	24,0	24,0	25,0	25,0	24,1
1:30	24,0	23,5	21,0	23,0	23,5	24,0	25,0	23,4
1:45	23,5	24,0	20,0	23,0	22,0	23,5	24,0	22,9
2:00	23,0	24,5	20,0	21,5	21,5	26,0**	22,5	22,2
2:15	22,0	23,0	20,0	21,0	21,0	23,0	23,5	21,9
2:30	21,5	23,0	20,5	20,5	20,0	22,5	26,0**	21,3
2:45	20,5	21,5	19,0	20,0	19,5	33,0**	21,5	20,3
3:00	19,5	21,5	18,0	20,0	20,0	22,0	21,0	20,3
3:15	18,5	20,5	18,0	19,0	20,0	21,5	21,0	19,8
3:30	17,0	20,0	18,0	18,0	18,5	21,0	20,5	19,0
3:45	15,5	19,0	17,0	18,0	19,0	20,5	20,0	18,4
4:00	14,5	18,0	16,5	28,0**	17,5	19,0	19,5	17,5
4:15	14,0	18,0	15,0	17,0	17,0	19,0	19,0	17,0
4:30	13,5	16,0	15,0	17,0	16,0	19,0	18,5	16,4

Tabela 5.6 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos sete testes do experimento E_1 * em função do tempo.

(conclusão)

Tempo (h)	Teste da TCO							Média
	1	2	3	4	5	6	7	
4:45	13,0	15,0	14,0	17,0	16,5	18,5	18,0	16,0
5:00	13,0	15,5	16,0	17,0	16,5	18,0	18,0	16,3
5:15	12,5	15,0	15,5	16,0	16,0	16,5	17,5	15,6
5:30	12,4	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,5	15,3
5:45	12,0	14,0	31,5**	15,0	16,0	16,0	17,0	15,0
6:00	12,0	14,0	14,5	14,5	16,5	16,0	16,0	14,8

* Experimento E_1 : Alimentação de 3 litros de esgoto em 1,25h seguido por não alimentação durante 4,75h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20d$ e $T = 28^\circ\text{C}$. Tempo 0:00h se refere ao momento de aplicação da carga.

** Processo de nitrificação em desenvolvimento, tendo sido a dicionado tiouréia para inibi-lo. Esse valor não foi compu tado no cálculo da média para não alterar o valor médio da TCO.

Tabela 5.7 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos quatro testes do experimento E_2^* em função do tempo

(continua)

Tempo (h)	Teste da TCO				Média
	1	2	3	4	
-0:30	13,0	14,0	15,0	15,0	14,3
-0:05	12,0	12,5	16,0	15,0	13,9
0:05	25,5	26,5	26,0	27,0	26,3
0:15	30,0	27,0	26,0	28,5	27,9
0:30	29,5	28,5	30,5	30,0	29,6
0:45	33,5	30,0	30,5	29,0	30,8
1:00	31,5	31,0	28,0	32,0	30,6
1:15	31,5	29,5	28,0	33,5	30,6
1:30	31,5	28,5	31,0	34,5	31,4
1:45	31,0	28,0	31,5	36,5	31,8
1:48	25,0	24,0	25,5	27,0	25,4
2:00	24,5	31,5**	23,5	27,5	25,2
2:15	24,0	23,0	23,0	21,5	22,9
2:30	23,5	23,5	23,0	22,0	23,0
2:45	21,0	22,0	21,0	22,5	21,6
3:00	22,0	20,5	20,0	21,5	21,0
3:15	22,5	20,5	19,0	18,5	20,1
3:30	19,5	21,0	18,5	18,0	19,3
4:00	18,5	20,5	18,5	16,5	18,5
4:30	16,0	19,0	18,0	15,5	17,1
5:00	16,5	18,5	16,0	16,5	16,9
5:30	15,5	17,5	15,0	15,5	15,9

Tabéla 5.7 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos quatro testes do experimento E_2^* em função do tempo

(conclusão)

Tempo (h)	Teste da TCO				Média
	1	2	3	4	
6:00	15,5	18,5	15,0	15,5	16,1
6:30	15,5	18,0	16,0	15,5	16,3
7:00	14,0	17,0	15,5	14,0	15,1
7:30	14,0	17,0	15,0	13,0	14,8
8:00	12,5	16,0	15,0	16,0	14,9

* Experimento E_2 : Alimentação de 4 litros de esgoto em 1,75h seguido por não alimentação durante 6,25h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20\text{d}$ e $T = 28^\circ\text{C}$. Tempo 0:00h se refere ao momento de aplicação da carga.

** Processo de nitrificação em desenvolvimento, tendo sido adicionado tiouréia para inibi-lo. Esse valor não foi computado no cálculo da média para não alterar o valor médio da TCO.

Tabela 5.8 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos dois testes do experimento E₃* em função do tempo

(continua)

Tempo (h)	Teste da TCO		Média
	1	2	
-0:30	13,5	14,5	14,0
-0:05	13,0	14,0	13,5
0:05	25,5	23,0	24,3
0:15	26,0	22,5	24,3
0:30	26,5	22,5	24,5
0:45	27,0	25,0	26,0
1:00	28,0	24,5	26,3
1:30	27,5	27,5	27,5
2:00	29,5	27,0	28,3
2:30	29,0	34,0	31,5
3:00	28,0	33,5	30,8
3:15	29,0	30,0	29,5
3:18	24,5	26,5	25,5
3:30	22,5	25,0	23,8
4:00	21,0	25,0	23,0
4:30	21,0	25,5	23,3
5:00	20,5	23,0	21,8
5:30	20,5	22,5	21,5
6:00	19,0	21,5	20,3
6:30	18,5	27,0**	18,5
7:00	16,0	23,0	19,5
7:30	15,5	22,0	18,8

Tabela 5.8 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos dois testes do experimento E_3^* em função do tempo

(conclusão)

Tempo (h)	Teste da TCO		Média
	1	2	
8:00	16,0	18,0	17,0
8:30	16,5	17,5	17,0
9:00	16,0	17,0	16,5
9:30	15,0	16,0	15,5
10:00	26,0**	16,5	16,5
10:30	15,5	16,5	16,0
11:00	14,5	15,0	14,8
11:30	14,0	15,0	14,5
12:00	14,5	14,0	14,3

* Experimento E_3 : Alimentação de 6 litros de esgoto em 3,25h seguido por não alimentação durante 8,75h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20\text{d}$ e $T = 28^\circ\text{C}$. Tempo 0:00h se refere ao momento de aplicação da carga.

** Processo de nitrificação em desenvolvimento, tendo sido adicionado tiouréia para inibi-lo. Esse valor não foi computado no cálculo da média para não alterar o valor médio da TCO.

Tabela 5.9 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos quatro testes do experimento E₄* em função do tempo

(continua)

Tempo (h)	Testes da TCO				Média
	1	2	3	4	
-0:30	14,0	12,5	13,0	12,5	13,0
-0:05	11,0	12,5	13,0	12,0	12,1
0:03	74,0	68,0	60,0	72,0	68,5
0:08	40,0	40,5	39,0	38,0	39,4
0:15	34,0	31,5	33,0	30,5	32,3
0:30	32,0	31,2	32,0	30,5	31,4
0:45	32,0	31,7	33,0	30,5	31,8
1:00	30,5	29,0	28,0	30,5	29,5
1:15	30,0	29,0	28,5	29,5	29,3
1:30	29,5	28,2	27,5	29,0	28,6
1:45	29,0	28,7	28,5	29,0	28,8
2:00	28,0	26,7	26,5	27,0	27,1
2:15	27,0	26,0	26,5	25,5	26,3
2:30	26,5	23,7	25,0	22,5	24,4
2:45	25,5	23,5	26,0	21,0	24,0
3:00	24,0	23,0	24,0	22,0	23,3
3:15	22,0	22,7	24,0	21,5	22,6
3:30	20,5	21,5	22,0	21,0	21,3
3:45	20,0	21,7	22,5	21,0	21,3
4:00	19,5	21,5	23,0	20,0	21,0
4:15	20,0	21,0	21,5	20,5	20,8
4:30	19,5	20,7	21,0	20,5	20,4

Tabela 5.9 - Valores e médias da TCO ($\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) nos quatro testes do experimento E_4^* em função do tempo

(conclusão)

Tempo (h)	Testes da TCO				Média
	1	2	3	4	
4:45	19,0	19,2	20,0	18,5	19,2
5:00	19,0	19,5	19,0	20,0	19,4
5:15	18,5	19,0	18,5	19,5	18,9
5:30	18,0	18,5	18,5	18,5	18,4
5:45	17,0	16,7	17,0	16,5	16,8
6:00	17,5	16,7	17,5	16,0	16,9
6:30	17,5	16,2	16,5	16,0	16,6
7:00	16,5	16,7	17,0	16,5	16,7
7:30	16,0	15,5	15,0	16,0	15,6
8:00	16,0	15,0	15,0	15,0	15,3
8:30	15,0	15,0	14,5	15,5	15,0
9:00	14,5	14,5	14,0	15,0	14,5
9:30	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
10:00	14,0	14,2	15,0	13,5	14,2
10:30	12,0	13,5	12,5	14,0	13,0
11:00	12,0	13,0	12,0	14,0	12,8
11:30	12,5	13,0	12,5	14,0	13,0
12:00	12,5	13,0	12,0	14,0	12,9

* Experimento E_4 : Carga repentina de 6 litros de esgoto aplicada a cada 12h. $V_r = 12\ell$, $R_s = 20d$ e $T = 28^\circ\text{C}$. Tempo 0:00h se refere ao momento de aplicação da carga.

5.3 - Figuras

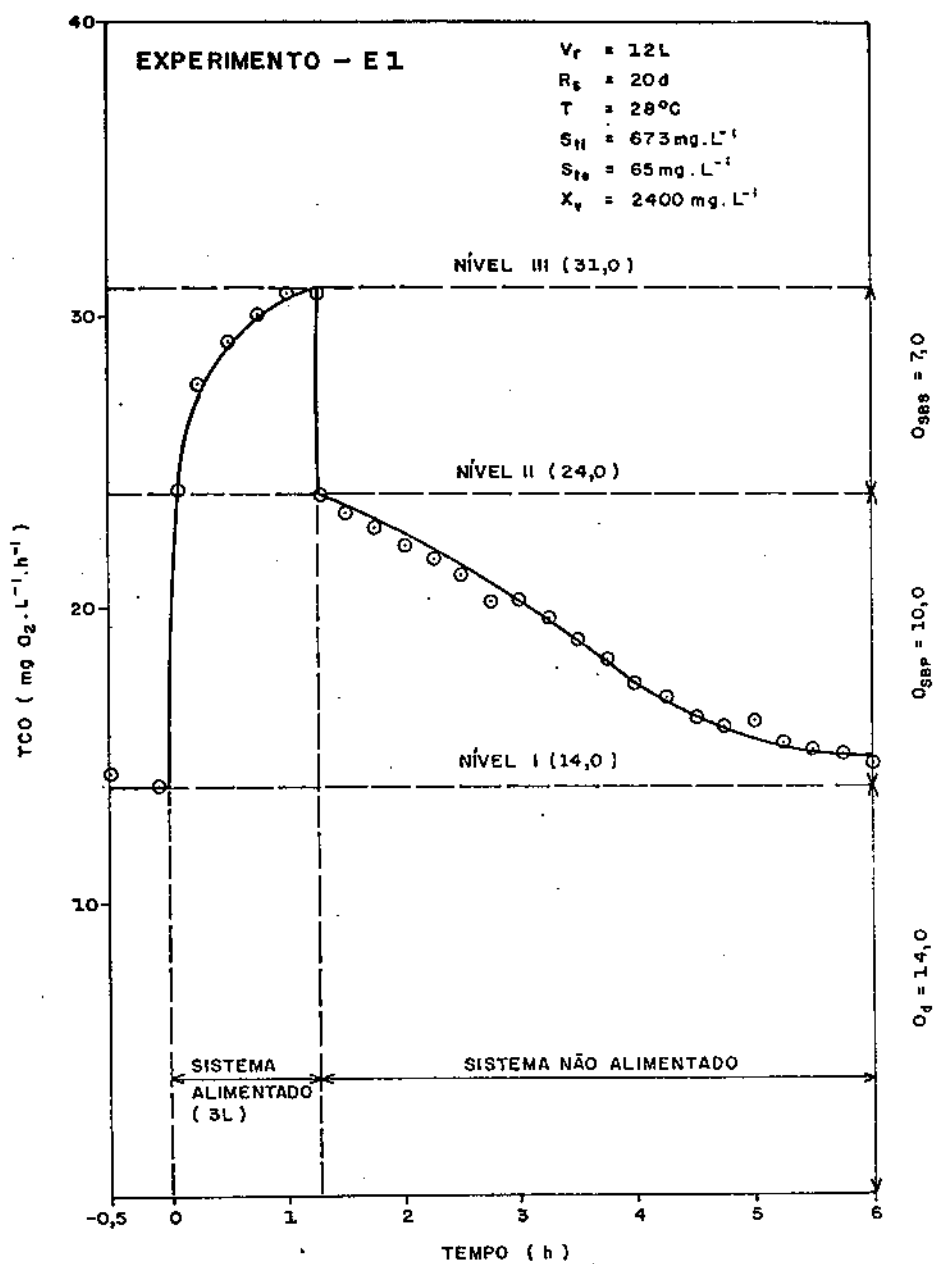


FIGURA 5.1 - PERFIL DA TCO (VALOR MÉDIO) EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E1 (ALIMENTAÇÃO DE 3L DE ESGOTO EM 1,25 h SEGUIDO POR NÃO ALIMENTAÇÃO DURANTE 4,75h. TEMPO 0:00h INDICA O MOMENTO DE APLICAÇÃO DA CARGA).

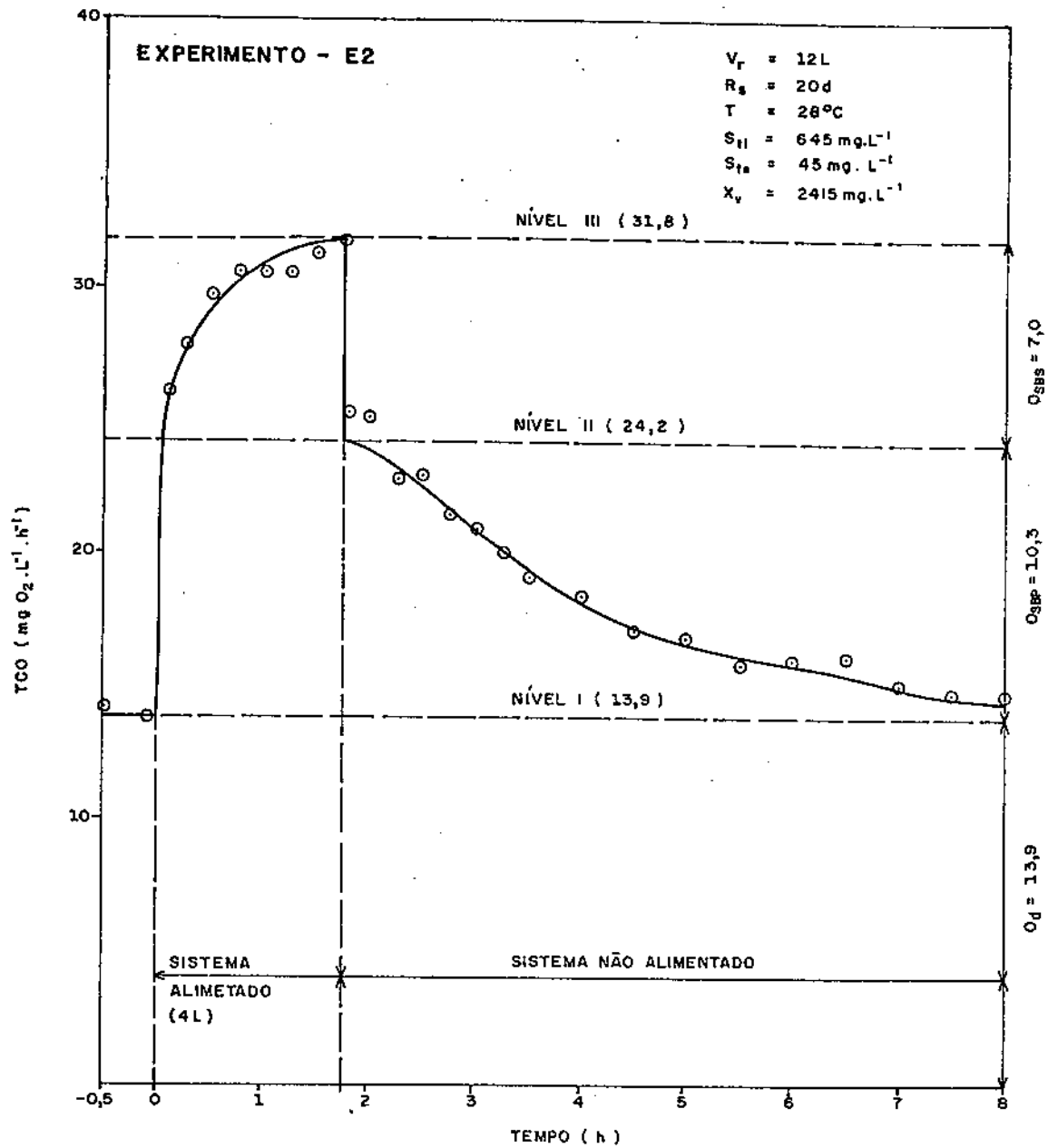


FIGURA 5.2 - PERFIL DA TCO (VALOR MÉDIO) EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E2 (ALIMENTAÇÃO DE 4L DE ESGOTO EM 1,75h SEGUIDO POR NÃO ALIMENTAÇÃO DURANTE 6,25h. TEMPO 0:00h INDICA O MOMENTO DE APLICAÇÃO DA CARGA).

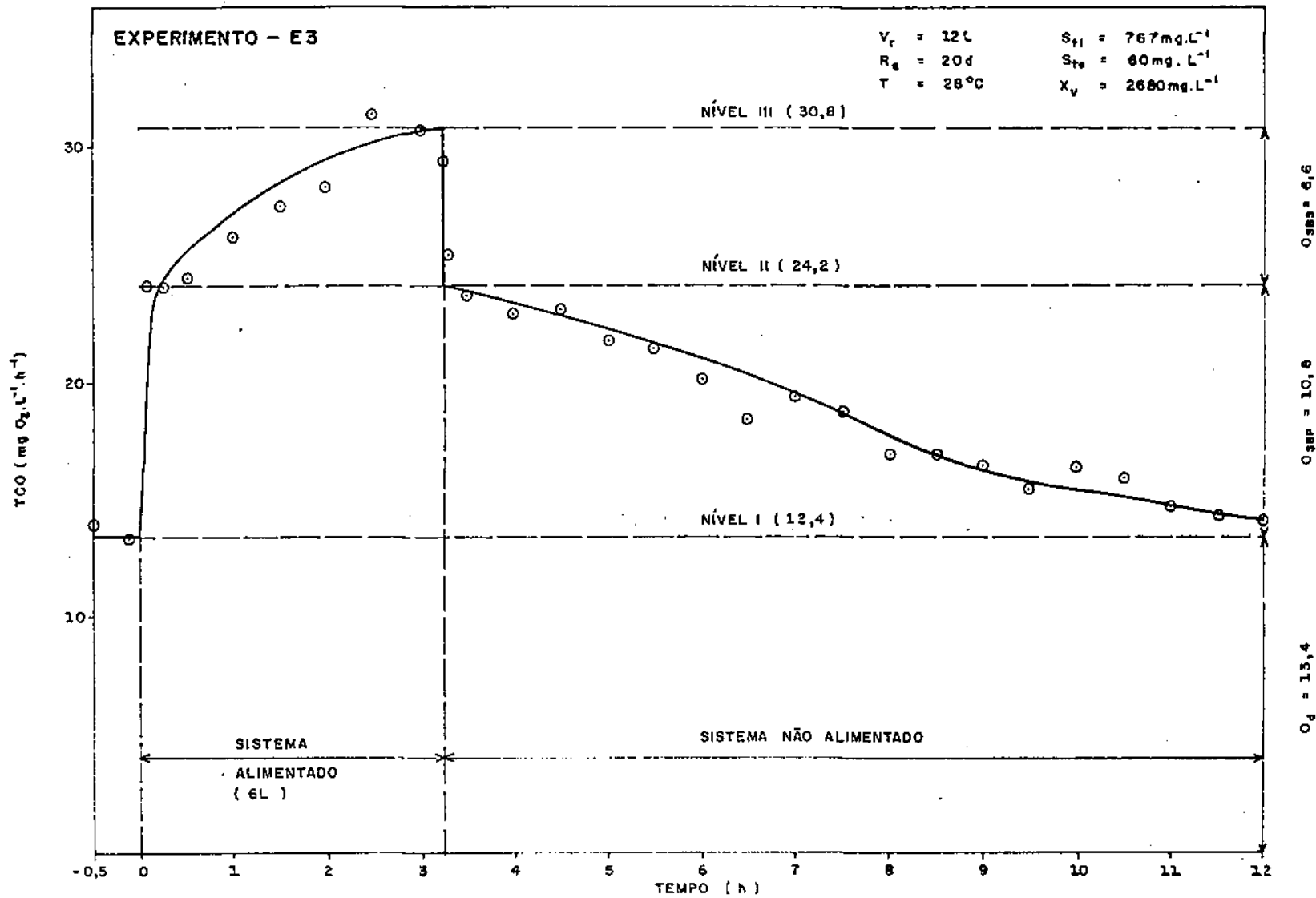


FIGURA 5.3 - PERFIL DA TCO (VALOR MÉDIO) EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E3 (ALIMENTAÇÃO DE 6L DE ESGOTO EM 3,25h SEGUIDO POR NÃO ALIMENTAÇÃO DURANTE 8,75h. TEMPO 0:00h INDICA O MOMENTO DE APLICAÇÃO DA CARGA).

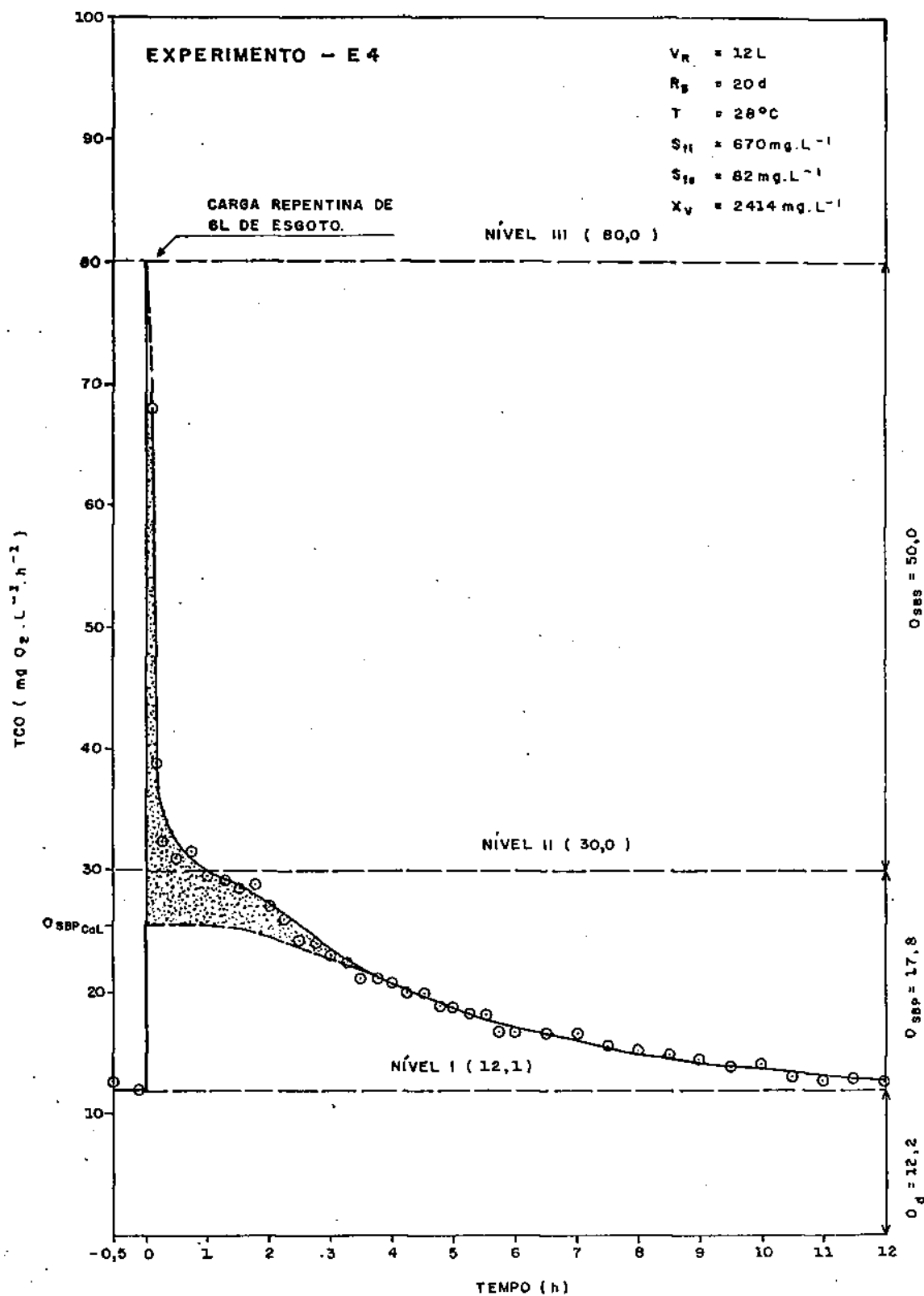


FIGURA 5.4 - PERFIL DA TCO (VALOR MÉDIO) EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E4 (CARGA REPENTINA DE 6L DE ESGOTO A CADA 12h. TEMPO 0:00h INDICA O MOMENTO DE APLICAÇÃO DA CARGA).

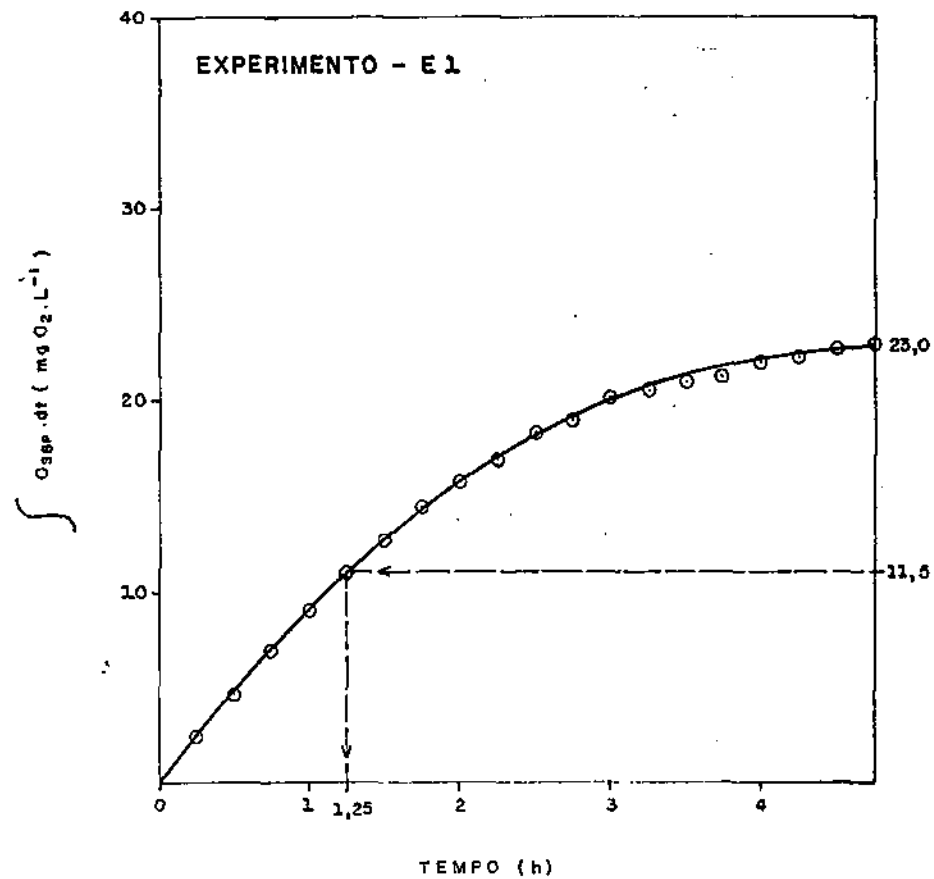


FIGURA 5.5 - CURVA DO CONSUMO ACUMULATIVO DE OXIGÊNIO PARA OXIDAÇÃO DO MATERIAL ARMAZENADO EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E1. (TEMPO 0:00h. INDICA O FIM DO PERÍODO DE ALIMENTAÇÃO).

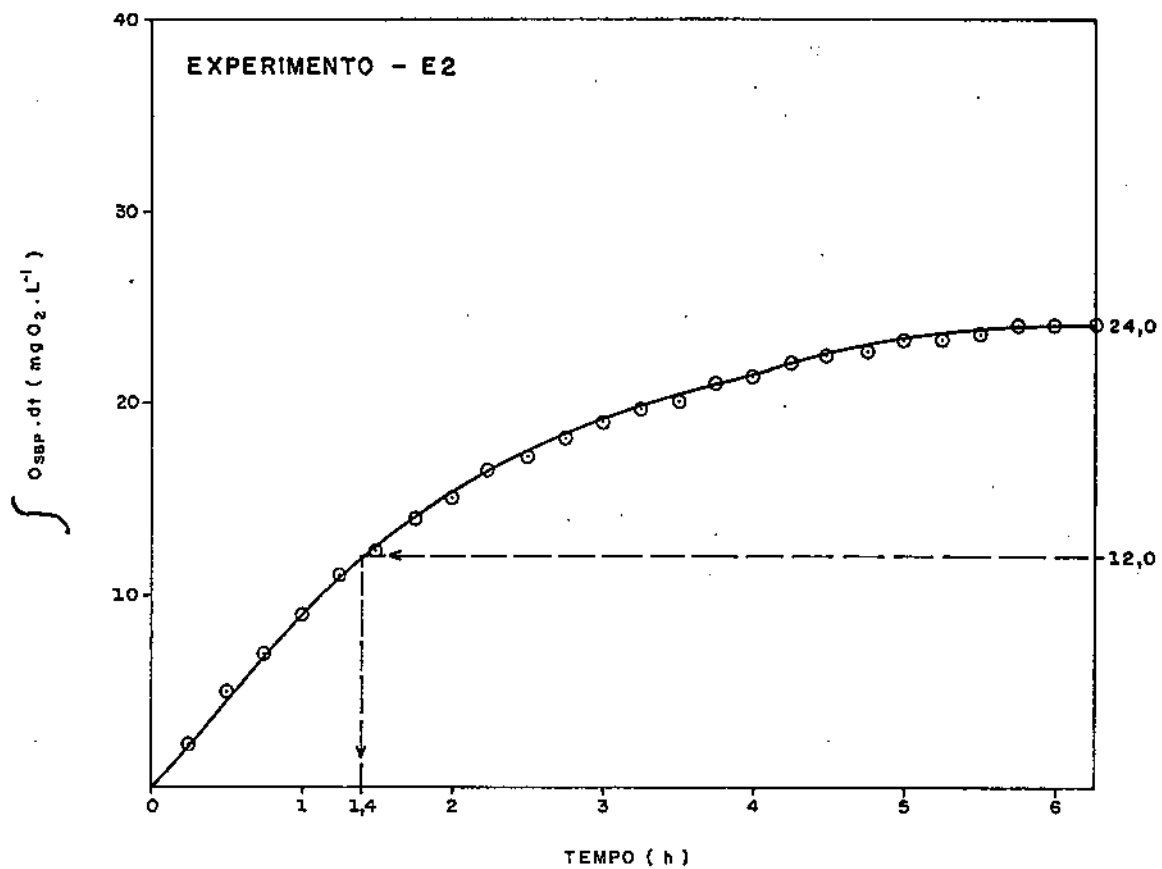


FIGURA 5.6 - CURVA DO CONSUMO ACUMULATIVO DE OXIGÊNIO PARA OXIDAÇÃO DO MATERIAL ARMazenADO EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO -E2. (TEMPO 0:00h. INDICA O FIM DO PERÍODO DE ALIMENTAÇÃO).

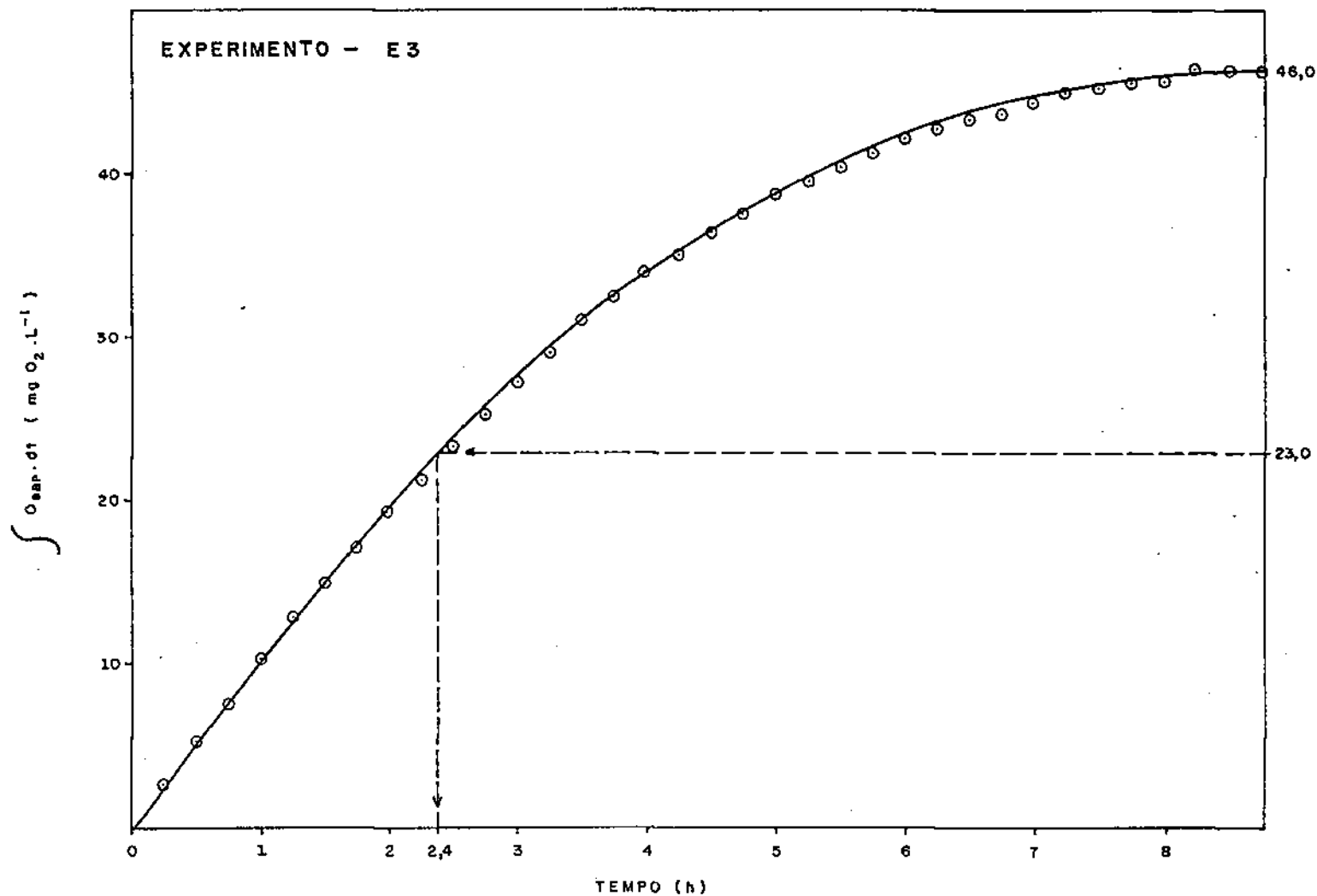


FIGURA 5.7 - CURVA DO CONSUMO ACUMULATIVO DE OXIGÊNIO PARA OXIDAÇÃO DO MATERIAL ARMAZENADO EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO -E3. (TEMPO 0:00 INDICA O FIM DO PERÍODO DE ALIMENTAÇÃO).

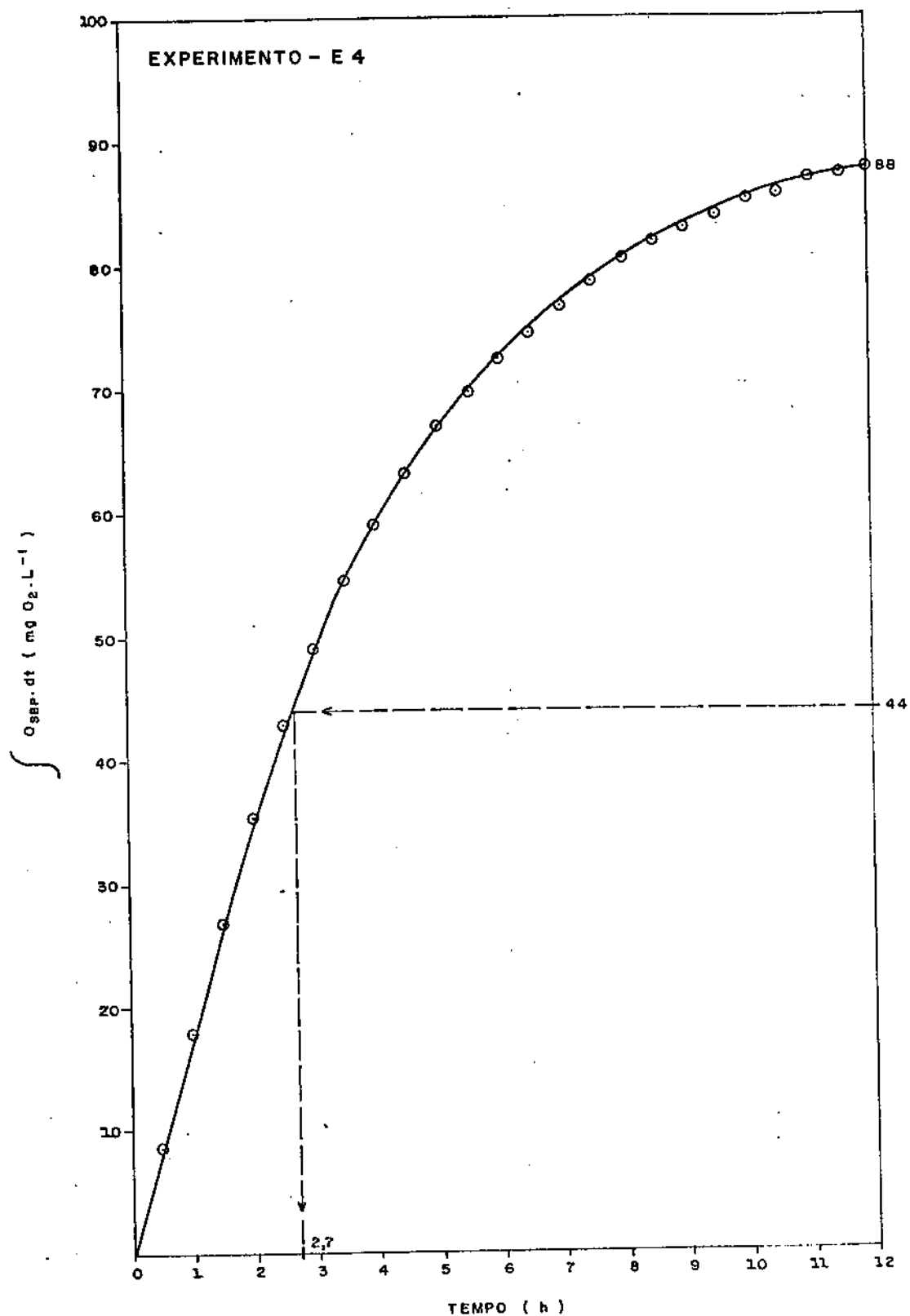


FIGURA 5.8 - CURVA DO CONSUMO ACUMULATIVO DE OXIGÊNIO PARA OXIDAÇÃO DO MATERIAL ARMAZENADO EM FUNÇÃO DO TEMPO, REFERENTE AO EXPERIMENTO - E4. (TEMPO 0:00h. INDICA O FIM DO PERÍODO DE ALIMENTAÇÃO).

6 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

6.1 - Introdução

Os dados das Tabelas 5.1 a 5.4 e das Figuras 5.1 a 5.4 são suficientes para se analisar o comportamento do sistema em termos do modelo de Marais.

Pela experiência de Marais e Ekama (1976) e Dias et alli (1983), ficou estabelecido que os valores dos parâmetros de massa de lodo (Y_h , P , f e F) independem das condições operacionais do sistema e das características do esgoto, podendo ser aceitos como apresentados na Tabela 3.1. Tenório (1985) determinou que a constante de respiração endógena depende apenas da temperatura. Restando, assim, determinar três constantes de composição do material orgânico influente (f_{us} , f_{up} e f_{ca}) e cinco constantes cinéticas de utilização do material orgânico biodegradável, as quais se referem à utilização do material rapidamente biodegradável (K_{ms} e K_{ss}), ao armazenamento do material lentamente biodegradável (K_v) e à utilização do material armazenado (K_{mp} e K_{sp}).

Essas constantes podem ser determinadas com auxílio de um computador, gerando-se perfis simulados dos parâmetros mensuráveis: DQO do efluente, concentração do lodo orgânico e TCO. Comparam-se os perfis simulados com os perfis experimentalmente observados, continuando com as simulações até que

se obtenha uma boa correlação entre os dois perfis. Aceita-se como verdadeiro o conjunto de constantes que fornece esse resultado.

Na ausência de um computador, as constantes de composição do material orgânico influente (f_{us} , f_{up} e f_{ca}) e as constantes de utilização do material armazenado (K_{mp} e K_{sp}) podem ser calculadas manualmente, sendo possível estimar os valores destas constantes a partir da investigação experimental realizada. Entretanto, vale salientar que mesmo dispondo de todas as constantes é imprescindível o uso do computador para projetos e otimização de sistemas de lodo ativado operados sob condições dinâmicas.

Os valores das constantes de utilização do material rapidamente biodegradável (K_{ms} e K_{ss}) e de armazenamento do material lentamente biodegradável (K_v) não têm importância prática e não são relevantes para o sistema, pois são processos muito rápidos que, para todos os efeitos, podem ser considerados quase instantâneos.

6.2 - Dados da DQO

6.2.1 - Cargas cíclicas

Analisando-se os dados das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, observa-se que nas experiências com cargas cíclicas, a DQO da fase líquida do licor misto não varia mensuravelmente com o tempo e mantém um valor aproximadamente constante durante os

períodos de alimentação e de não alimentação. A concentração da DQO da fase líquida é aproximadamente igual à do efluente. Conclui-se que, durante o período de alimentação, a concentração do material biodegradável é desprezível na fase líquida do licor misto devendo, pois, ser atribuída exclusivamente à presença do material não biodegradável e solúvel. Desse modo, é possível estimar a fração de material orgânico no influente que é não biodegradável e solúvel (f_{us}) por:

$$f_{us} = S_{te} / S_{ti} \quad (6.1)$$

onde:

S_{te} = concentração do material orgânico efluente ou da fase líquida do licor misto ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$)

S_{ti} = concentração do material orgânico influente ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$)

O valor médio encontrado para os experimentos com cargas cíclicas foi de 0,082 (veja Tabela 6.1). Esse valor foi adotado como a melhor estimativa de f_{us} .

6.2.2 - Cargas repentinas

A Tabela 5.4 mostra que, mesmo no caso das cargas repentinas, manteve-se a invariabilidade da DQO da fase líquida do licor misto, sendo, portanto, válida a Equação 6.1. Encontrou-se um valor de 0,122 para f_{us} .

Os valores médios encontrados nos dois métodos são coe

rentes com o valor de 0,14 obtido numa investigação anterior (Dias et alli, 1983), e com o valor obtido por Marais (f_{us} entre 0,05 e 0,10).

6.3 - Dados dos sólidos orgânicos

A concentração dos sólidos orgânicos sob condições dinâmicas (cargas cíclicas ou repentinas) não variou, também, mensuravelmente com o tempo (vede Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4). Desse modo, o padrão de alimentação não parece afetar a concentração dos sólidos. Portanto, a concentração dos sólidos pode ser calculada usando-se a expressão derivada por Marais e Ekama (1976) para sistemas sob carga constante:

$$X_v = X_a + X_e + X_i$$

$$= \left((1-f_{us} - P \cdot f_{up}) \cdot (1+f \cdot b_h \cdot R_s) \cdot Y_h \cdot R_s / (1+b_h \cdot R_s) + f_{up} \cdot R_s \right) \cdot MS_{ti} / V_r \quad (6.2)$$

com:

$$MS_{ti} = V_r \cdot S_{ti} \quad (6.3)$$

onde:

X_e = concentração do resíduo endógeno ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$)

X_i = concentração do lodo inerte ($\text{mgSVS} \cdot \ell^{-1}$)

MS_{ti} = massa diária da DQO influente ($\text{mgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$)

Adotando-se os valores conhecidos ($b_h = 0,32 \text{d}^{-1}$; $f = 0,2$; $R_s = 20 \text{d}$ e $V_r = 12 \ell$) e supondo-se o valor de $f_{up} = 0,04 \text{ mgSVS} \cdot \text{mgDQO}^{-1}$ e de $P = 1,56 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$, conforme encontrado

por Dias et alii (1983), calcula-se para os experimentos com cargas cíclicas e cargas repentinas os valores teóricos de X_v .

Na Tabela 6.1, observa-se que os valores teóricos se aproximam dos valores médios experimentais encontrados, concluindo-se que a Equação 6.2 pode ser aplicada ao sistema submetido a cargas dinâmicas e que, nas experiências desenvolvidas neste trabalho, o valor de f_{up} é $0,04 \text{ mgSVS.mgDQO}^{-1}$, aproximadamente.

6.4 - Perfil da TCO

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 mostram que a TCO exhibe grandes variações com o tempo.

Ao se analisar a variação da TCO com o tempo para as experiências com cargas cíclicas (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3), observa-se o seguinte comportamento:

- (a) no início do período de alimentação, a TCO aumenta rapidamente até chegar a um valor praticamente constante (nível III). Esse valor quase constante indica que a taxa de utilização do material orgânico tende a um valor também constante;
- (b) logo após o término do período de alimentação, observa-se uma queda brusca, quase instantânea, da TCO (nível II) para, em seguida, a TCO diminuir gradualmente;
- (c) decorrido algum tempo do término da alimentação, a TCO

tende ao valor que tinha antes da aplicação da carga (nível I), correspondente à TCO de respiração endógena.

A Figura 5.4 mostra o comportamento da TCO com o tempo quando se aplicam cargas repentinas. Esse comportamento pode ser descrito como se segue:

(a) logo após a aplicação da carga repentina, a TCO adquire um valor muito alto (nível III), permanecendo assim, por pouco tempo;

(b) depois de uma curta fase de consumo de oxigênio a alta taxa, a TCO diminui rapidamente até ficar praticamente constante por algum tempo (nível II) para, em seguida, diminuir gradualmente com o tempo, aproximando-se do valor que tinha antes da aplicação da carga repentina (nível I), correspondente ao nível de respiração endógena.

Para poder calcular as constantes relevantes do modelo com auxílio dos perfis da TCO (Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4) é necessário que se estime a TCO referente à respiração endógena usando-se a Equação 2.16. Para tanto, é preciso calcular a concentração do lodo ativo no reator. Considerando-se, em ambas as experiências (cargas cíclicas e cargas repentinas), que a TCO se aproxima de um nível constante durante os períodos de não alimentação (nível I), conclui-se que, neste período, a utilização do material biodegradável introduzido durante a alimentação é praticamente completa, isto é, a utilização do material biodegradável no reator é essencialmente completa, embora ela não se realize inteiramente após a sua introdução no

sistema. Se a utilização do material biodegradável é completa, então a concentração média do lodo ativo no sistema sob cargas cíclicas ou repentinas será igual àquela que haveria em um sistema sob carga constante equivalente. Essa concentração é dada por (Marais e Ekama, 1976):

$$X_a = \{(1 - f_{us} - P \cdot f_{up}) \cdot Y_h \cdot R_s / (1 + b_h \cdot R_s)\} \cdot MS_{ti} / V_r \quad (6.4)$$

Os valores de O_d e X_a , teóricos, para as experiências com cargas cíclicas e repentinas encontram-se na Tabela 6.1, bem como os valores experimentais de O_d , os quais são observados dos perfis das TCO's.

O perfil da TCO em função do tempo pode ser dividido em duas partes: a TCO abaixo do nível I, devido à respiração endógena e, a TCO acima do nível I, devido à utilização do material biodegradável do influente. A parte superior do perfil da TCO permite calcular alguns parâmetros de massa e constantes cinéticas como se mostra a seguir.

6.4.1 - Cargas cíclicas

6.4.1.1 - Cálculo da fração do material rapidamente biodegradável (f_{ca})

Observa-se na Figura 5.1 que a queda da TCO no fim do período de alimentação é de aproximadamente $7,0 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Essa queda se deve ao fato de que, cessada a alimentação, o material rapidamente biodegradável não está mais disponível.

Concluindo-se que, durante o período de alimentação, a TCO referente à utilização do material rapidamente biodegradável é de $7,0 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Portanto, a taxa de utilização do material rapidamente biodegradável, durante este período, é de $7,0 / (1 - P \cdot Y_h) = 23,5 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Tendo em vista que a utilização do material rapidamente biodegradável é muito rápida, conclui-se que a taxa de utilização deste material será igual à taxa de alimentação. Portanto, durante o período de alimentação, a taxa do material rapidamente biodegradável no influente era de $23,5 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, ou para $V_r = 12\ell$, de $23,5 \times 12 = 282 \text{ mgDQO} \cdot \text{h}^{-1}$. Durante o período de alimentação a vazão do influente era de 3ℓ em $1,25\text{h}$ ou $2,4\ell \cdot \text{h}^{-1}$. Portanto, havia 282 miligramas de material rapidamente biodegradável em $2,4\ell$ ou seja, a concentração deste material era de:

$$S_{bs} = 282 / 2,4 = 118 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$$

Pela Tabela 5.1, $S_{ti} = 673 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$, calcula-se a concentração do material biodegradável no influente por:

$$S_{bi} = (1 - 0,097 - 1,56 \times 0,04) \cdot 673 = 566 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$$

Logo, a fração do material rapidamente biodegradável era de :

$$f_{ca} = 118 / 566 = 0,208$$

Procede-se de maneira análoga para os experimentos E_2 e E_3 , encontrando-se na Tabela 6.1 os valores determinados. O valor médio da fração do material rapidamente biodegradável nos três experimentos foi $f_{ca} = 0,21$. Valor este, bem próximo ao

encontrado por Marais para o esgoto doméstico da cidade do Cabo - África do Sul ($f_{ca} = 0,24$).

6.4.1.2 - Determinação das constantes cinéticas de utilização do material armazenado (K_{mp} , K_{sp})

O cálculo dessas duas constantes se dá através da utilização do perfil da TCO durante o período de não alimentação. No período de não alimentação, a TCO total se deve à soma da TCO de respiração endógena e de utilização do material armazenado, O_{sbp} . Sabendo-se que a TCO correspondente à taxa de utilização do material armazenado é igual a um fator $(1-P.Y_h)$ do valor desta taxa, tem-se:

$$O_{sbp} = (1-P.Y_h).r_{up} = \{(1-P.Y_h).K_{mp}.P.X_s / (P.X_s + K_{sp}.X_a)\}.X_a \quad (6.5)$$

Na equação 6.5, as duas constantes K_{mp} e K_{sp} e a variável X_s são desconhecidas. Portanto, é necessário que se estimem dois valores de X_s e os valores correspondentes de O_{sbp} para que se possam calcular os valores de K_{mp} e K_{sp} .

O valor de O_{sbp} logo após um período de alimentação pode ser determinado graficamente. Na Figura 5.1 esse valor é de $10\text{mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. A área contida entre a curva da TCO e o nível I, durante o período de não alimentação, representa o consumo de oxigênio por litro de licor misto para a utilização do material armazenado. É possível determinar o consumo de oxigênio para utilização do material armazenado através da integração gráfica da área determinada pela curva da TCO e o nível

vel de respiração endógena. A Figura 5.5 mostra a curva da integração dessa área (curva do consumo acumulativo de oxigênio para oxidação do material armazenado em função do tempo). Observa-se nessa figura que o consumo de oxigênio para utilização do material armazenado durante todo o período de não alimentação é de $23 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1}$, ou seja, neste período há utilização de $23/(1-P \cdot Y_h) = 77 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$ ou $77/P = 49 \text{ mgSVS} \cdot \ell^{-1}$ do material armazenado. Pela curva da Figura 5.1, observa-se que no fim do período de alimentação a utilização do material armazenado é praticamente completa (a TCO se aproxima do nível I de respiração endógena). Portanto, no começo do período de não alimentação a concentração do material armazenado era de $49 \text{ mgSVS} \cdot \ell^{-1}$. Desse modo, tem-se um par de valores a ser inserido na Equação 6.5 : $O_{sbp} = 10,0 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ e $X_s = 49,0 \text{ mgSVS} \cdot \ell^{-1}$.

Um outro par pode ser obtido facilmente pela curva integrada da TCO para material armazenado (Figura 5.5). Nessa curva, observa-se que metade do oxigênio requerido para utilização do material armazenado é consumida durante um tempo de 1,25h após o término do período de alimentação. Reportando-se à Figura 5.1, nota-se que a TCO para utilização do material armazenado no momento correspondente a 1,25h após o término do período da alimentação é de $7,6 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Desse modo o segundo par de valores a ser inserido na Equação 6.5 é: $O_{sbp} = 7,6 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ e $X_s = 24,5 \text{ mgSVS} \cdot \ell^{-1}$. Assim, usando-se a Equação 6.5, têm-se duas equações com duas incógnitas (K_{mp} e K_{sp}), que permitem determinar $K_{mp} = 1,70 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e $K_{sp} = 0,05 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$.

Analogamente, calcula-se K_{mp} e K_{sp} para os experimentos E_2 e E_3 . Os valores determinados encontram-se na Tabela 6.1.

6.4.2 - Cargas repentinas

6.4.2.1 - Cálculo da fração do material rapidamente biodegradável (f_{ca})

A brusca variação da TCO logo após a aplicação da carga repentina, impossibilita uma determinação acurada da curva TCO x Tempo no início do experimento. Assim, uma estimativa dessa curva e conseqüentemente de f_{ca} não fornece um resultado muito confiável, como será mostrado a seguir.

Na Figura 5.4, a área contida entre o perfil da TCO estimado (extrapolando a curva para o tempo 0:00h) e o nível I representa a massa de oxigênio utilizada por litro de licor misto para a utilização do material biodegradável contido nos 6 litros de esgoto da carga repentina. Semelhantemente, a área contida entre o perfil da TCO e o nível II representa a massa de oxigênio necessária para a utilização do material rapidamente biodegradável. Essas áreas podem ser determinadas por integração gráfica, representando aproximadamente $100,0 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1}$ para o primeiro caso e $12,0 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1}$ para o segundo caso. Supondo que a utilização do material biodegradável seja essencialmente completa e, sabendo-se que o consumo de oxigênio é proporcional à massa do material orgânico utilizado,

tem-se que a fração do material rapidamente biodegradável era de:

$$f_{ca} = 12,0/100,0 = 0,12$$

Esse valor é muito baixo quando comparado com os valores encontrados pelas experiências com cargas cíclicas.

6.4.2.2 - Determinação das constantes cinéticas de utilização do material armazenado (K_{mp} , K_{sp})

No perfil da TCO em função do tempo, tem-se teoricamente que: o valor da TCO entre o nível I e o nível II corresponde a O_{sbp} e da TCO entre o nível II e o nível III a O_{sbs} . Calculam-se os valores das constantes K_{mp} e K_{sp} seguindo-se o mesmo roteiro usado no caso das experiências com cargas cíclicas. Obtêm-se: $K_{mp} = 3,70 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e $K_{sp} = 0,32 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$. Esses valores são bem diferentes dos encontrados para as cargas cíclicas (vede Tabela 6.1).

Adotando-se, na experiência com carga repentina, os valores médios de K_{mp} e K_{sp} determinados nas experiências com cargas cíclicas ($2,0 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e $0,10 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$, respectivamente), pode-se calcular a TCO para o material lentamente biodegradável (O_{sbp}) logo após a aplicação da carga repentina, como será mostrado a seguir.

No momento de aplicação da carga, a concentração do material armazenado é dada por:

$$X_s = MS_{bp} / (P \cdot V_r) \quad (6.6)$$

$$MS_{bp} = V_{cr} \cdot (1 - f_{ca}) \cdot (1 - f_{us} - P \cdot f_{up}) \cdot S_{ti} \quad (6.7)$$

onde:

MS_{bp} = massa do material orgânico influente que é lentamente biodegradável (mgDQO) e,

V_{cr} = volume da carga repentina por alimentação (ℓ).

Substituindo os valores conhecidos ($V_{cr} = 6\ell$; $f_{ca} = 0,213$; $f_{us} = 0,082$; $P = 1,56 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgSVS}^{-1}$; $f_{up} = 0,004 \text{ mgSVS} \cdot \text{mgDQO}^{-1}$ e $S_{ti} = 670 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$) na Equação 6.6, calcula-se $X_s = 145 \text{ mgSVS} \cdot \ell^{-1}$.

Com o valor de X_s calculado e os valores médios de K_{mp} e K_{sp} determinados para as experiências com cargas cíclicas, determina-se pela Equação 6.5, $O_{sbp} = 13,7 \text{ mgO}_2 \cdot \ell^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. A partir desse valor, estima-se uma nova curva da TCO para o material lentamente biodegradável (curva inferior à área hachurada da Figura 5.4). Admite-se que toda a área entre a nova curva e a curva da TCO total se deve à oxidação do material rapidamente biodegradável. Desse modo, estima-se também, um novo valor para a constante f_{ca} . O valor encontrado foi $f_{ca} = 0,205$, o qual se aproxima bastante do valor médio de f_{ca} determinado para as experiências com cargas cíclicas ($f_{ca} = 0,213$). Esse resultado justifica a suposição de que os valores de K_{mp} e K_{sp} encontrados nas experiências com cargas cíclicas também são válidos para as experiências com cargas repentinas. Entretanto, nas experiências com cargas repentinas, os microorganismos parecem ser incapazes de utilizar, em um tempo muito curto, a alta concentração de material rapidamente biodegradável. Pela Figura 5.4, tem-se que a utilização

completa do material rapidamente biodegradável leva aproximadamente 3,25 h. Desse modo, quando na experiência com carga repentina, a TCO se estabiliza no nível II, ainda ocorre consumo de oxigênio para a utilização do material rapidamente biodegradável. Logo, a TCO dada pela diferença do nível II e nível I não é representativa para o consumo de oxigênio devido ao material lentamente biodegradável. Conseqüentemente, o método das cargas repentinas se mostrou inadequado para determinar as constantes K_{mp} , K_{sp} e f_{ca} .

6.5 - Tabela

TABELA 6.1 - Valores dos parâmetros que definem a cinética de utilização do material biodegradável

Método	Experimento	f_{us}	MS_{ti}	X_v		X_a	O_d		f_{ca}	K_{mp}	K_{sp}
			(mgDQO. d^{-1})	(mgSVS. ℓ^{-1}) Teor. Exp.	(mgSVS. ℓ^{-1})	(mgO ₂ . ℓ^{-1} .h ⁻¹) Teor. Exp.	(mgDQO.mg X_a^{-1} .d ⁻¹)	(mgDQO.mg X_a^{-1} .d ⁻¹)			
Carga Cíclica	E ₁	0,097	8076	2107	2400	688	11,4	14,0	0,208	1,70	0,05
	E ₂	0,070	7740	2068	2415	681	11,3	13,9	0,214	2,70	0,15
	E ₃	0,078	9204	2442	2680	802	13,3	13,4	0,217	1,60	0,10
	Média	0,082	8340	2206	2498	724	12,0	12,2	0,213	2,00	0,10
Carga Repentina	E ₄	0,122	8040	2051	2414	665	11,1	12,2	0,122	3,70	0,32

7 - DISCUSSÃO

7.1 - Introdução

Para as condições prevalecentes na investigação experimental realizada, a utilização do material orgânico biodegradável influente era essencialmente completa, apesar de não se realizar imediatamente após a introdução da carga ao sistema.

Na prática, dependendo das condições operacionais, a utilização desse material pode ser incompleta, embora isso não se reflita numa deteriorização da qualidade do efluente. Os materiais rapidamente e lentamente biodegradáveis são removidos da fase líquida através de processos muito rápidos, de modo que a concentração do material biodegradável no efluente será muito baixa. Entretanto, a utilização do material armazenado no lodo ativo oriundo do material lentamente biodegradável é um processo com velocidade relativamente baixa. Desse modo, é possível que uma parte do material armazenado seja descarregado com o lodo de excesso antes que a sua utilização se materialize. A fração do material armazenado e não utilizado no sistema será maior à medida que a idade de lodo diminui, ou seja, à medida que se aumenta a taxa de retirada do lodo de excesso.

A aplicação prática mais importante do modelo cinético

apresentado no presente trabalho é a determinação da concentração do material armazenado no sistema, pois, a partir dessa concentração, determina-se a idade mínima de lodo para o funcionamento do sistema.

A concentração do material armazenado é limitada pela capacidade de adsorção. Dold et alii (1980) determinaram que a concentração máxima do material armazenado é igual a concentração do lodo ativo. Sob essas condições o lodo ativo está saturado e a sua capacidade de adsorver material biodegradável está esgotada. Desse modo, o sistema de tratamento só funcionará se a idade de lodo aplicada for suficiente para que a concentração do material armazenado seja igual ou menor que a concentração do lodo ativo. Se a idade de lodo tem um valor a baixo da mínima determinada onde $X_s = X_a$ então parte do material biodegradável e particulado do influente não será armazenado e aparecerá no efluente deteriorando a sua qualidade.

Van Haandel e Marais (1981) demonstraram, para o caso de sistemas de lodo ativado, que a sedimentabilidade de lodo diminui sensivelmente quando a proporção do material armazenado em relação à do lodo ativo se torna grande. Para não comprometer a eficiência da sedimentação de lodo no decantador final, é preciso limitar a concentração do material armazenado. Esses pesquisadores observaram que, para uma concentração do material armazenado de até 20 por cento do lodo ativo, a velocidade de sedimentação não diminui consideravelmente. Desse modo, para sistemas com um decantador final há uma idade mínima de lodo imposta pela seguinte condição: a concentração do material armazenado não deve exceder a 20 por cento da concentra

ção do lodo ativo.

Para calcular a concentração do material armazenado em função do tempo para um sistema de lodo ativado com vários reatores em série e alimentado sob condições dinâmicas, o uso de um computador se torna indispensável. Entretanto, para o caso de um reator completamente misturado sob condições estacionárias, essa concentração pode ser calculada manualmente, como será demonstrado nas próximas seções.

7.2 - Determinação da concentração do material armazenado

O material biodegradável do influente pode ser utilizado pelos microorganismos ou deixar o sistema como material armazenado no lodo de excesso. Através de um balanço de massa, tem-se que a DQO diária do material biodegradável influente que não é utilizado é igual à DQO diária do material armazenado e lançado no lodo de excesso. Portanto:

$$Q.S_b = q.P.X_s \quad (7.1)$$

onde:

$Q.S_b$ = massa diária da DQO do material biodegradável não utilizado que entra no sistema e,

$q.P.X_s$ = massa diária da DQO do material biodegradável armazenado e não utilizado que é descarregado do sistema.

Usando-se na Equação 7.1 as expressões para as vazões

influyente e do lodo de excesso ($Q = V_r/R_h$ e $q = V_r/R_s$), tem-se:

$$S_b = P \cdot X_s \cdot (R_h/R_s) \quad (7.2)$$

onde:

S_b = concentração do material biodegradável não utilizado no sistema ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$)

R_h = tempo de permanência hidráulico (d)

Portanto, a concentração do material biodegradável efetivamente utilizado no sistema é dada por:

$$S'_{bi} = S_{bi} - S_b = S_{bi} - P \cdot X_s \cdot R_h/R_s \quad (7.3)$$

onde:

S'_{bi} = concentração do material biodegradável efetivamente utilizado no sistema ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$)

S_{bi} = concentração do material biodegradável influente ($\text{mgDQO} \cdot \ell^{-1}$)

Desse modo, a concentração do lodo ativo pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} X_a &= Y_h \cdot R_s \cdot S'_{bi} / (1 + b_h \cdot R_s) \cdot R_h \\ &= Y_h \cdot R_s \cdot (S_{bi} - P \cdot X_s \cdot R_h/R_s) / ((1 + b_h \cdot R_s) \cdot R_h) \end{aligned} \quad (7.4)$$

Uma expressão para a concentração do material armazena

do em um reator completamente misturado, operado sob condições estacionárias é obtida a partir da observação de que essa concentração não varia com o tempo. Assim, a taxa de produção do material armazenado no reator a partir do material biodegradável e particulado do influente será igual à taxa de remoção do material armazenado devido ao efeito combinado da utilização pelo lodo ativo e da descarga no lodo de excesso:

$$r_{xs} = (r_a/P) - (r_{up}/P) - (X_s/R_s) = 0 \quad (7.5)$$

onde:

r_{xs} = taxa de variação da concentração do material armazenado

r_a/P = taxa de produção do material armazenado a partir de S_{bp}

r_{up}/P = taxa de utilização do material armazenado

X_s/R_s = taxa de descarga do material armazenado

Tendo em vista que a adsorção do material biodegradável e particulado do influente é um processo muito rápido, a taxa de adsorção pode ser igualada à taxa de alimentação desse material.

$$r_a = S_{bp}/R_h \quad (7.6)$$

Usando-se a expressão para r_{up} (Equação 2.12), tem-se:

$$(S_{bp}/R_h) - (K_{mp} \cdot P \cdot X_s / (P \cdot X_s + K_{sp} \cdot X_a)) - (X_s/R_s) = 0 \quad (7.7)$$

Resolvendo essa equação para X_s , tem-se:

$$X_s = B + \sqrt{B^2 + 4 S_{bp} \cdot R_s \cdot K_{sp} / (X_a \cdot R_h) / 2P} \quad (7.8)$$

onde:

$$B = S_{bp} \cdot R_s / (X_a \cdot R_h) - K_{mp} \cdot R_s - K_{sp}$$

Observa-se na Equação 7.8 que o valor de X_s depende da concentração do lodo ativo (X_a). Porém, a Equação 7.4 mostra que X_a só pode ser calculada quando se sabe a concentração do material armazenado (X_s). A solução desse problema pode ser obtida por um método iterativo de cálculo:

- (a) como condição inicial, considera-se o sistema ideal, ou seja, $X_s = 0$ e calcula-se X_a com o auxílio da Equação 7.4;
- (b) usa-se o valor obtido de X_a na Equação 7.8 para calcular o valor de X_s ;
- (c) o valor obtido de X_s é usado para estimar o valor de X_a , usando-se de novo a Equação 7.4. Com o novo valor de X_a calcula-se um novo valor de X_s na Equação 7.8;
- (d) esse procedimento é repetido até que em duas iterações consecutivas os valores de X_s e de X_a não variem mais que uma determinada fração, por exemplo: 0,1 por cento. Em geral 4 ou 5 iterações são suficientes para que isto aconteça.

Observa-se na Equação 7.8 que a concentração do mate

rial armazenado em um reator completamente misturado sob condições estacionárias depende das concentrações S_{bp} e S_{bi} (esta última concentração determina o valor de X_a); dos valores das constantes K_{sp} e K_{mp} e da idade de lodo (R_s). Nota-se que tal concentração independe do tempo de permanência hidráulico: o produto $X_a \cdot R_h$ não depende de R_h (X_a é inversamente proporcional a R_h). Desse modo, para determinados valores das concentrações S_{bi} e S_{bp} e das constantes K_{sp} e K_{mp} a única variável que influencia é R_s . Se os valores de S_{bi} , S_{bp} , K_{sp} e K_{mp} são conhecidos, pode-se calcular R_s para que $X_s = X_a$ e R_s para que $X_s = 0,2X_a$. Esses valores de R_s definem a idade mínima para o funcionamento do sistema e para haver boa sedimentabilidade de lodo, respectivamente.

Na Figura 7.1, a idade mínima de lodo ($R_{s\min}$) para o funcionamento do sistema ($X_s = X_a$) está plotada em função do valor de K_{mp} ; para valores típicos de esgoto doméstico, onde: $S_{bp} = 360 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$ e $S_{bi} = 480 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$ aproximadamente e, para valores de K_{sp} : 0,05; 0,10 e 0,15 $\text{mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$ (valores encontrados na investigação experimental realizada). Observa-se que $R_{s\min}$ para o funcionamento do sistema é praticamente independente do valor de K_{sp} . A diferença entre $R_{s\min}$ para $K_{sp} = 0,05$ e $K_{sp} = 0,15 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$ é muito pequena. Entretanto, o valor de $R_{s\min}$ depende muito do valor de K_{mp} . Para o menor valor encontrado na investigação experimental ($K_{mp} = 1,6 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), tem-se $R_{s\min} = 1,65 \text{ d}$ aproximadamente. Para o maior valor encontrado ($K_{mp} = 2,7 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), tem-se $R_{s\min} = 0,85 \text{ d}$. Para projetos de sistemas de tratamento de esgoto com lodo em suspensão sem decantador final, por exem

plo, uma lagoa aerada, R_s deverá ser igual ou superior a $R_{s_{\min}}$ apresentada na Figura 7.1. No caso de não se conhecer o valor de K_{mp} para o projeto em questão, adota-se um valor conservador: o menor valor encontrado na investigação experimental ($K_{mp} = 1,6 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$). Portanto, $R_{s_{\min}}$ para uma lagoa aerada seria de 1,65 d. Um valor de R_s menor que 1,65 d poderia implicar em um mau funcionamento do sistema: material biodegradável e particulado do influente passaria para o efluente sem ser armazenado pelo lodo ativo.

A Figura 7.2 mostra a idade de lodo mínima ($R_{s_{\min}}$) para que o lodo tenha boa sedimentabilidade ($X_s = 0,2X_a$) em função do valor de K_{mp} e dos três valores de K_{sp} : 0,05; 0,10 e 0,15 $\text{mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$ determinados experimentalmente, admitindo-se $S_{bp} = 360 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$ e $S_{bi} = 480 \text{ mgDQO} \cdot \ell^{-1}$. A idade de lodo determinada para $X_s = 0,2X_a$ é a idade mínima para o funcionamento com uma boa sedimentabilidade, de um sistema com lodo em suspensão, por exemplo, um sistema de lodo ativado com decantador final. Observa-se pela Figura 7.2 que, para determinar $R_{s_{\min}}$ de um sistema de lodo ativado, tanto o valor de K_{sp} como o de K_{mp} influenciam. Nesse caso, $R_{s_{\min}}$ de projeto seria a idade determinada pelo menor valor de K_{mp} e o maior valor de K_{sp} encontrados na investigação experimental ($K_{mp} = 1,6 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e $K_{sp} = 0,15 \text{ mgDQO} \cdot \text{mgX}_a^{-1}$, respectivamente). Desse modo, $R_{s_{\min}}$ para um sistema de lodo ativado funcionar com boa sedimentabilidade de lodo seria de 3,9 d.

7.3 - Figuras

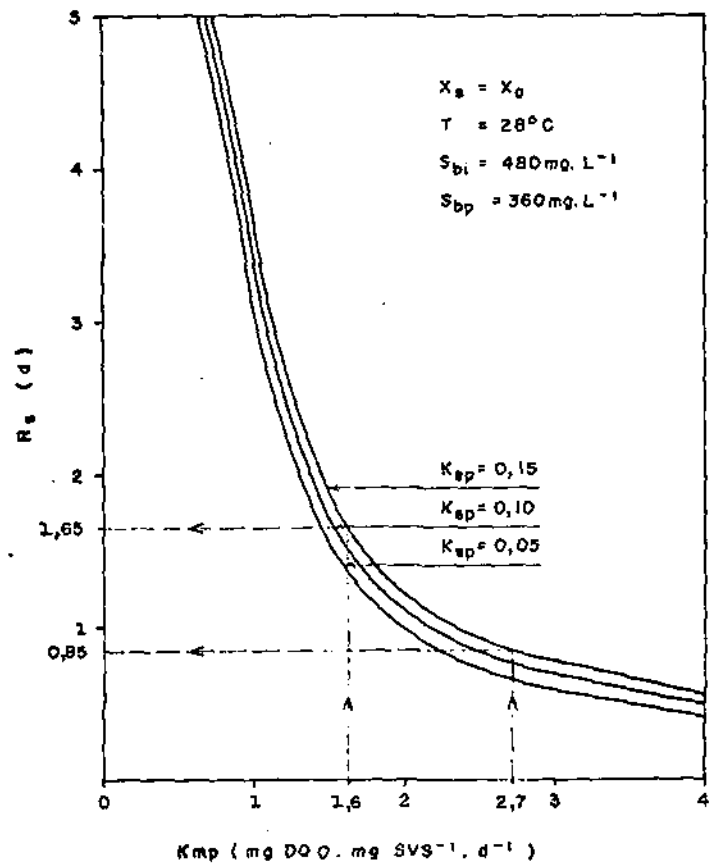


FIGURA 7.1 - IDADE MÍNIMA DE LODO EM FUNÇÃO DO VALOR DE K_{mp} , REFERENTE A UMA LAGOA AERADA.

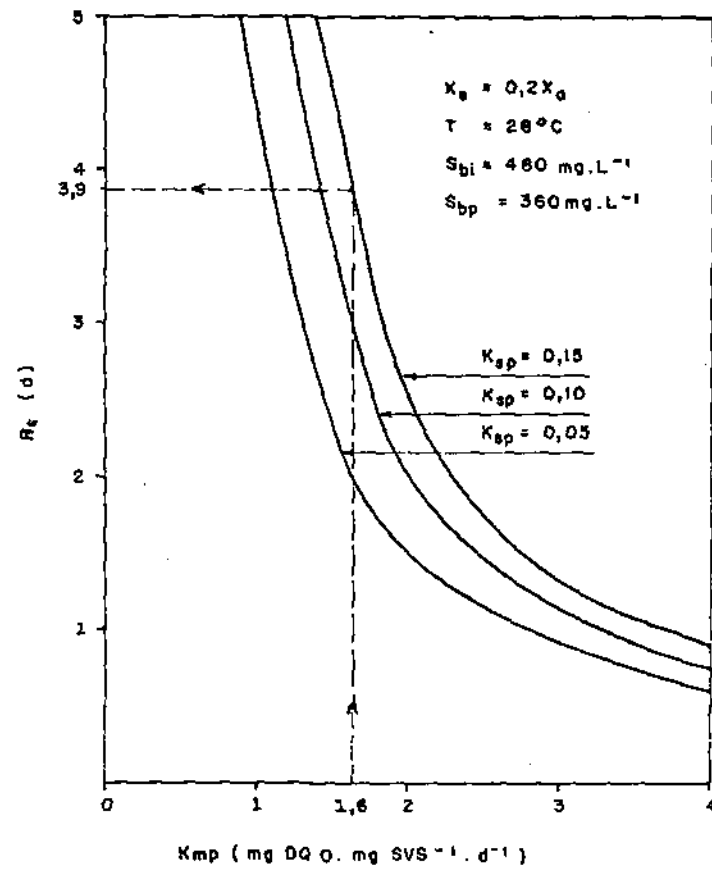


FIGURA 7.2 - IDADE MÍNIMA DE LODO EM FUNÇÃO DO VALOR DE K_{mp} , REFERENTE A UM SISTEMA DE LODO ATIVADO.

8 - CONCLUSÕES

- Os resultados experimentais apresentados nesse trabalho mostram que o modelo de Marais, que descreve o comportamento dinâmico de sistemas de tratamento esgoto com lodo em suspensão, é aplicável para regiões tropicais até a temperatura testada de 28°C.
- Para aferir o modelo, devem-se impor condições dinâmicas (transitórias) ao sistema. Isto pode ser feito através da aplicação de cargas cíclicas (períodos de alimentação do sistema seguidos por períodos de não alimentação) ou de cargas repentinas (aplicação periódica de uma carga instantânea). Verificou-se que o método mais adequado é o das cargas cíclicas, não levando a resultados confiáveis o método das cargas repentinas.
- O comportamento de sistemas de tratamento de esgoto com lodo em suspensão depende da composição do material orgânico influente e do valor das constantes cinéticas do modelo de Marais. Esses parâmetros tendem a variar com os hábitos socio-econômicos da população contribuinte e, idealmente, devem ser determinados experimentalmente para cada caso de projeto.
- As constantes de composição do material orgânico influente e as constantes cinéticas relevantes para a taxa de utiliza

- ção deste material em sistema de tratamento com lodo em suspensão (lodo ativado, valo de oxidação e lagoa aerada), podem ser determinadas experimentalmente sem o uso de um computador, usando-se o método das cargas cíclicas. Entretanto, na aplicação do modelo para projetos e otimização, o computador é indispensável.
- Na caracterização da composição do material orgânico do esgoto municipal de Campina Grande - Pb, obtiveram-se os seguintes resultados: material não biodegradável igual a 16 por cento (10 por cento solúvel, $f_{us} = 0,10$ e 6 por cento particulado, $f_{up} = 0,04 \text{ mgSVS.mgDQO}^{-1}$) e material biodegradável igual a 84 por cento dos quais, 21 por cento rapidamente biodegradável e 79 por cento lentamente biodegradável.
 - As constantes cinéticas mais relevantes são as de utilização do material armazenado. O valor da constante específica de utilização do material armazenado, K_{mp} , variou entre 1,6 e $2,7 \text{ mgDQO.mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e da constante de meia saturação do material armazenado, K_{sp} , entre 0,05 e $0,15 \text{ mgDQO.mgX}_a^{-1}$. ($T=28^\circ\text{C}$).
 - Usando-se valores conservadores para as constantes cinéticas de utilização do material armazenado ($K_{mp} = 1,6 \text{ mgDQO.mgX}_a^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e $K_{sp} = 0,15 \text{ mgDQO.mgX}_a^{-1}$), pode-se determinar a idade mínima de lodo para o funcionamento de sistemas de tratamento de esgoto com lodo em suspensão. Essa idade mínima é de 1,65 d para sistemas sem decantador final (lagoa aerada) e de 3,9 d para sistemas com decantador final (lodo ativado ou valo de oxidação).

9 - SUGESTÕES

- Baseado no modelo apresentado, escrever um programa de computação que permita a simulação dos dados experimentais pelo computador e, dessa maneira, a determinação das constantes cinéticas.
- Determinar experimentalmente a relação entre a velocidade de sedimentação de lodo e a concentração do material armazenado.
- Determinar experimentalmente se a idade mínima de lodo calculada para lagoas aeradas se verifica na prática.
- Determinar as constantes de composição do material orgânico influente e as constantes cinéticas de utilização do material armazenado para o esgoto bruto de Campina Grande - Pb, à temperatura de 20°C.

10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREWS, J.F. and Busby, J.R. (1973), "Dynamic Modelling and Control Strategies for the Activated Sludge Process", Res. Rept., Dep. of Environ. Systems. Eng. Clemson Univ., Clemson, South Carolina, U.S.A.

APHA - American Public Health Association - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 14th edition, New York, 1975.

BLACKWELL, L.G. (1971), "A Theoretical and Experimental Evaluation of the Transient Response of the Activated Sludge Process", Ph.D thesis, Clemson Univ., Clemson, South Carolina, U.S.A.

CATUNDA, P.F.C. e van Haandel, A.C. (1983), "O Balanço de Massa do Material Orgânico e Nitrogenado em Sistemas de Tratamento de Esgoto com Lodo em Suspensão", Engenharia Sanitária / Rio de Janeiro, 22,(4), 528-537.

DIAS, M.C., Catunda, P.F.C. e van Handel, A.C. (1983), "O Sistema de Lodo Ativado I - Estado Estacionário", apresentado no 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Camboriú - Santa Catarina.

DOLD, P.L., Ekama, G.A. and Marais, G.v.R. (1980), "A General Model for the Activated Sludge Process", Proc. 10th Int. Conf. IAWPR, Toronto, in Prog. Wat. Tech., 12, 47-77.

EKAMA, G.A. and Marais, G.v.R. (1978), "The Dynamic Behaviour of the Activated Sludge Process, Res. Rep. n^o 27, Dept. Civil Eng., Univ. of Cape Town.

GARRET, M.T. and Sawyer, C.N. (1956), "Kinetics of Removal of Soluble BOD by Activated Sludge", Proc 7th Inds. Waste Cont., Purdue Univ.

HEIDMAN, J.A. (1979), "Sequential Nitrification - Denitrification in a Plug Flow Activated Sludge System", U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, U.S.A., Rept. EPA 600/2-79-157.

KATZ, W.O. and Rohlich, G.A. (1956), "A Study of the Equilibria and Kinetics of Adsorption by Activated Sludge", Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Ed. McCabe B.J. and Eckenfelder M.W. Jr., Reinhold New York.

LAWRENCE, A.W. and McCarty, P.L. (1970), "Unified Basis for Biological Treatment Design and Operation", J. Sanit. Eng. Div., Proc. An. Soc. Civil Eng., 96, SA3, pp. 757-778.

MARAIS, G.v.R. and Ekama, G.A. (1976), "The Activated Sludge Process: Steady State Behaviour", Water S.A., 2, (4), 163-200.

- MCKINNEY, R.E. (1962), "Mathematics of Complete Mixing Activated Sludge", J. San. Eng. Div. ASCE. 88, SA3, Proc. Paper 3133, 87.
- MONOD, J. (1950), "Technique of Continuous Culture - Theory and Application" (Translation from French), Ann. Inst. Pasteur, 79, p. 167.
- SUTTON, P.M., Jank, B.E., Monaghan, B.A. and Murphy, K.L. (1979), "Single Sludge Nitrogen Removal Systems", Research Report nº 88, Environmental Protection Service, Canadá.
- TENÓRIO, M.A.A. (1985), "A Cinética de Digestão Aeróbia de lodo Ativado". Campina Grande - Pb - 85 p. (Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFPb).
- VAN HAANDEL, A.C. e Catunda, P.F.C. (1983), "Determinação da Taxa de Consumo de Oxigênio em Sistemas de Tratamento de Esgoto". Eng. Sanitária / Rio de Janeiro, 21, (4), 481-488.
- VAN HAANDEL, A.C. and Marais, G.v.R. (1981), "Nitrification and Denitrification Kinetics in the Activated Sludge Process", Res. Rep. nº W39. Dep. Civ. Univ. of Cape Town - África do Sul.
- WASHINGTON, D.R. and Hetling, L.J. (1965), "Volatile Sludge Accumulation in Activated Sludge Plants", J. Wat. Pollut. Control Fed., 37, 4, pp 499-507.